

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
ҚАРАҒАНДЫ МЕМЛЕКЕТТІК ИНДУСТРИЯЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

№ 4 (51) 2025 г.

e-ISSN: 3134-8467
p-ISSN: 2309-1177

ҚАРАҒАНДЫ МЕМЛЕКЕТТІК ИНДУСТРИЯЛЫҚ
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ

BULLETIN OF THE
KARAGANDA STATE INDUSTRIAL UNIVERSITY

ВЕСТНИК КАРАГАНДИНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

ҚАЗАН-ЖЕЛТОҚСАН 2025
ОCTOBER-DECEMBER 2025
ОКТЯБРЬ-ДЕКАБРЬ 2025

ЖЫЛЫНА 4 РЕТ ШЫҒАДЫ
QUARTERLY JOURNAL
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

Теміртау - 2025

БАС РЕДАКТОР

Жаутиков Бахыт Ахатович – т.ғ.к., т.ғ.д., энергетика профессоры, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ Басқарма төрағасы–Ректоры.

РЕДАКЦИЯЛЫҚ КОЛЛЕГИЯ

Белов Николай Александрович – т.ғ.д., профессор, «Құю процестерінің технологиясы» кафедрасы жанындағы ИЛТМ инжиниринг орталығының директоры, «Мәскеу болат және қорытпалар институты» Ұлттық зерттеу технологиялық университеті, Ресей; **Ким Александр Сергеевич** – т.ғ.д., Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институтының БОР зертханасының бас ғылыми қызметкері, Қазақстан; **Павлов Александр Васильевич** – т.ғ.д., «Болат және ферроқорытпалар металлургиясы» кафедрасының профессоры, «Мәскеу болат және қорытпалар институты» Ұлттық зерттеу технологиялық университеті, Ресей; **Панин Евгений Александрович** – PhD, «Металдарды қысыммен өңдеу» кафедрасының доценті, Қарағанды индустриялық университеті, Қазақстан; **Riad Taha Al-Kasasbeh** – PhD, Әл-Балқа қолданбалы университетінің профессоры (Al-Balqa' Applied University), Амман қ., Иордания; **Richard Fabik** – PhD, «Материалдарды өңдеу» кафедрасының профессоры, Техникалық университет, Острава қ., Чехия; **Syed Abdul Rahman Al-Haddad** – т.ғ.д., PhD, Компьютерлік және коммуникациялық жүйелер факультетінің профессоры, Universiti Putra Malaysia (UPM), Малайзия; **Nur Nabihah Yusof** – Universiti Sains Malaysia Физика мектебі, PhD, Пинанг, Малайзия; **Abdeslam Hassani** – Маркетинг және ақпараттық жүйелер кафедрасының профессоры, Квебек университеті Трүа-Ривьерде (Université du Québec à Trois-Rivières), Бизнес мектебі, Канада; **Sri Rizki Putri Primandari** – Инженерия факультетінің профессоры, Universitas Negeri Padang (UNP), химиялық және технологиялық инженерия саласының докторы, Индонезия; **Didik Hariyanto** – Электртехникалық білім беру кафедрасының профессоры, Universitas Negeri Yogyakarta (UNY), Индонезия; **Abdul Hafidz Bin Yusoff** – Биоинженерия және технологиялар факультетінің доценті, Universiti Malaysia Kelantan, Малайзия; **Кенжалиев Олжас Багдаулетович** – PhD, Ғылыми жұмыс және халықаралық ынтымақтастық жөніндегі проректор, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, Қазақстан; **Мыңжасар Есмұрат Аманғалиұлы** – Металлургия және машина жасау факультеті, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, PhD, Қазақстан; **Касымова Гүлжайна Куралбаевна** – PhD, «ИМиО» АҚ Зияткерлік меншік және халықаралық ынтымақтастық бөлімінің басшысы, Алматы қ., Қазақстан; **Christian S. Ugwuanyi** – Нигерия университетінің ғылыми білім беру бөлімі Білім факультеті, Еркін мемлекет университеті, Блумфонтейн, Оңтүстік Африка; **Кабиева Сауле Казжановна** – х.ғ.к., Қарағанды индустриялық университетінің Химиялық технология және экология кафедрасының профессоры, Теміртау қ., Қазақстан; **Кунаев Вячеслав Александрович** – Ғылым және инновация департаментінің директоры, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, PhD, Қазақстан.

Жауапты хатшы

Солтан Айдана – Ғылым және инновация департаментінің жетекші маманы, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, Қазақстан.

Луценко Виталий Сергеевич – Ғылым және инновация департаментінің маманы, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, Қазақстан.

Журналдың сайты: https://vestnik.tttu.edu.kz/index.php/kariu_vestnik

Электрондық почта: bulletin@tttu.edu.kz

Байланыс телефоны: +7 (721) 391-39-01

Қарағанды мемлекеттік индустриалық университетінің хабаршысы

Меншік иесі: «Қарағанды индустриялық университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы
1991 жылы құрылған - 2001 және 2013 жылдары атауы өзгертілген.

Мерзімді баспасөз басылымын және интернет-басылымды қайта есепке қою туралы куәлік: 08.05.2026 ж.

Баспахананың атауы, мекенжайы және редакцияның мекенжайы:
Қарағанды индустриалық университетінің даму орталығы, Республикалық даңғылы, 30,
Теміртау, Қарағанды облысы, 101400

EDITOR-IN-CHIEF

Zhautikov Bakhyt Akhatovich – Chairman of the Board - Rector of the NAO "Karaganda Industrial University", PhD, Doctor of Engineering, Professor of Energy.

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Belov Nikolay Aleksandrovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Director of the ILTM Engineering Center at the Department of Foundry Technology at the National Research Technological University "Moscow Institute of Steel and Alloys", Russia; **Kim Alexander Sergeevich** – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the BOR Laboratory of the Chemical-Metallurgical Institute named after. Zh. Abisheva, Kazakhstan; **Pavlov Alexander Vasilyevich** – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Metallurgy of Steel and Ferroalloys at the National Research Technological University "Moscow Institute of Steel and Alloys", Russia; **Panin Evgeny Alexandrovich** – PhD, Associate Professor of the Department of Metal Forming at the Karaganda Industrial University, Kazakhstan; **Riad Taha Al-Kasasbeh** – PhD, Professor, Al-Balqa Applied University, Amman, Jordan; **Richard Fabik** – PhD, Professor of the Department of Materials Processing, Technical University of Ostrava, Czech Republic; **Syed Abdul Rahman Al-Haddad** – Doctor of Engineering, PhD, Professor, Faculty of Computer and Communication Systems, Universiti Putra Malaysia (UPM), Malaysia; **Nur Nabihah Yusof** – School of Physics, Universiti Sains Malaysia, 11800, USM, Pulau Pinang, Malaysia; **Abdeslam Hassani** – Professor, Business School, University of Quebec at Trois-Rivieres, Department: marketing and information systems Member of Institut of research on SMEs, University of Quebec at Trois-Rivieres, Canada; **Sri Rizki Putri Primandari** – PhD in Chemical and Process Engineering, Professor, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang (UNP), Indonesia; **Didik Hariyanto** – Professor, Department of Electrical Engineering Education, Universitas Negeri Yogyakarta (UNY), Indonesia; **Abdul Hafidz Bin Yusoff** – Associate Professor, Faculty of Bioengineering & Technology, Universiti Malaysia Kelantan Director, Research Management and Division, Universiti Malaysia Kelantan; **Kenzhaliyev Olzhas Bagdauletovich** – PhD, Member of the Management Board – Vice-Rector for Research and International Cooperation, Non-Profit Joint-Stock Company "Karaganda Industrial University", Kazakhstan; **Myngzhassar Yesmurat** - Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Industrial University, Kazakhstan; **Kassymova Gulzhaina Kuralbayevna** – PhD, Head of the Department of Intellectual Property and International Cooperation, Joint-Stock Company "Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation" (JSC IMOB), Almaty, Kazakhstan; **Christian S. Ugwuanyi** – Department of Science Education, University of Nigeria Faculty of Education, University of the Free State, Bloemfontein, South Africa; **Kabieva Saule Kazhanovna** – Candidate of Chemical Sciences, Professor, Department of Chemical Technology and Ecology, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan; **Kunaev Vyacheslav Alexandrovich** - Director of the Department of Science and Innovation of the Karaganda Industrial University, Kazakhstan.

Executive Secretary

Soltan Aidana – Leading Specialist, Department of Science and Innovation, Non-Profit Joint-Stock Company "Karaganda Industrial University", Kazakhstan.

Vitaliy Sergeyevich Lutsenko – Specialist, Department of Science and Innovation, Non-Profit Joint-Stock Company "Karaganda Industrial University", Kazakhstan.

Сайт журнала: https://vestnik.tttu.edu.kz/index.php/kariu_vestnik

Электронная почта: bulletin@tttu.edu.kz

Контактный телефон: +7(721)3913901

Bulletin of the Karaganda State Industrial University
Owner: Non-profit Joint-Stock Company "Karaganda Industrial University"

Founded in 1991 - Renamed in 2001 and 2013
Certificate of Re-registration of the Periodical Print and Online Publication dated 08 May 2026.

Printing house name, address, and editorial office address:
Karaganda Industrial University Development Center, 30 Respubliki Ave.,
Temirtau, Karaganda Region, 101400

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Жаутиков Бахыт Ахатович – Председатель Правления-Ректор НАО «Карагандинский индустриальный университет», к.т.н., д.т.н., профессор энергетики.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Белов Николай Александрович – PhD, д.т.н., профессор, Директор Инжинирингового центра ИЛТМ, кафедра «Технология литейных процессов», Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», Россия; **Ким Александр Сергеевич** – д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории БОР Химико-металлургического института им. Ж. Абишева, Казахстан; **Павлов Александр Васильевич** – д.т.н., профессор кафедры «Металлургия стали и ферросплавов» Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов», Россия; **Панин Евгений Александрович** – PhD, доцент кафедры «Обработка металлов давлением» НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан; **Riad Taha Al-Kasasbeh** – PhD, профессор Прикладного университета Al-Balqa (Al-Balqa' Applied University), г. Амман, Иордания; **Richard Fabik** – PhD, профессор кафедры «Обработка материалов» Технического университета, г. Острава, Чехия; **Syed Abdul Rahman Al-Haddad** – д.т.н., PhD, профессор факультета компьютерных и коммуникационных систем, Universiti Putra Malaysia (UPM), Малайзия; **Nur Nabihah Yusof** – PhD, профессор, Школа физики, Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang, Малайзия; **Abdeslam Hassani** – Профессор кафедры маркетинга и информационных систем, Школа бизнеса Университета Quebec at Trois-Rivieres, Канада; **Sri Rizki Putri Primandari** – профессор факультета инженерии Universitas Negeri Padang (UNP), доктор наук в области химической и технологической инженерии, Индонезия; **Didik Hariyanto** – профессор кафедры электротехнического образования, Universitas Negeri Yogyakarta (UNY), Индонезия; **Abdul Hafidz Bin Yusoff** – доцент факультета биоинженерии и технологий, Universiti Malaysia Kelantan, Малайзия; **Кенжалиев Олжас Багдаулетович** – PhD, Член Правления-Проректор по НРиМС НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан; **Мынжасар Есмұрат Аманғалиұлы** - Факультет металлургии и машиностроения, НАО «Карагандинский индустриальный университет», PhD, Казахстан; **Касымова Гулжайна Куралбаевна** – PhD, Руководитель отдела интеллектуальной собственности и международного сотрудничества АО «ИМиО», Алматы, Казахстан; **Christian S. Ugwuanyi** – кафедра естественнонаучного образования, University of Nigeria Факультет образования, University of the Free State, г. Блумфонтейн, Южно-Африканская Республика; **Кабиева Сауле Казжановна** – к.х.н., профессор кафедры химической технологии и экологии Карагандинского индустриального университета, г. Темиртау, Казахстан; **Кунаев Вячеслав Александрович** - Директор Департамента науки и инновации НАО «Карагандинский индустриальный университет», PhD, Казахстан.

Ответственный секретарь

Солтан Айдана – ведущий специалист Департамента науки и инноваций, НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан.

Луценко Виталий Сергеевич – специалист Департамента науки и инноваций, НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан.

Сайт журнала: https://vestnik.tttu.edu.kz/index.php/kariu_vestnik

Электронная почта: bulletin@tttu.edu.kz

Контактный телефон: +7(721)3913901

Вестник Карагандинского государственного индустриального университета
Собственник: Некоммерческое акционерное общество «Карагандинский индустриальный университет»

Основан в 1991 году - Переименован в 2001 г. и 2013 г.

Свидетельство о постановке на переучет периодического печатного издания, интернет издания: 08.05.2026

Наименование типографии, её адрес и адрес редакции:
ДЦТ Карагандинского индустриального университета, 101400, пр. Республики, 30,
г. Темиртау, Карагандинская обл.

Металлургия, жаңа материалдар технологиясы

DOI: <https://doi.org/10.53002/088>

ANALYSIS OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF INNOVATIVE MATERIALS

Zheksen Z. Zh.

Yessenov university, Aktau, Kazakhstan

**Corresponding author e-mail: zulpina_zh@mail.ru*

Author information:

Zheksen Zulpina Zheksenovna, Yessenov University, Aktau, Kazakhstan, e-mail: zulpina_zh@mail.ru

Abstract — This article provides an overview of the design features and electric drive of existing hot rolling flying shears, which is the basis of the doctoral thesis “Automation of the rolling cutting process on hot rolling flying shears”. The article presents the main task of rolling production, the purpose and technical requirements for the design and electric drive of flying shears. The designs and electric drive of existing flying shears are considered. There are the following main types of flying shears: drum, crank, swing, pendulum, and planetary. Three types of motors are also considered: asynchronous motor, synchronous motor, and DC motor, which would meet the technical requirements for this technological mechanism. A study of the design and electric drive of flying shears has shown a number of advantages and disadvantages. An analysis of the results of the study showed that the best choice is a pair of drum shears. Since the drums rotate evenly at a constant speed and the rotating masses are fully balanced, they allow cutting at significantly higher speeds than other types of shears. An independently actuated DC motor was chosen as the electric drive of the flying shears, as it has a large control range, smoothness, efficiency, speed stability, load tolerance at various speeds, and rigidity of the mechanical characteristics that meet the technical and technological requirements for the electric drive.

Keywords — innovative materials, strength characteristics, composite materials, nanostructures, mechanical properties, analysis methods.

ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ СВОЙСТВА

Жексен З. Ж.

«Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инженеринг университеті» КеАҚ, Ақтау, Қазақстан

**Автор-корреспондент e-mail: zulpina_zh@mail.ru*

Автор туралы ақпарат:

Жексен Зүлфина Жексенқызы, «Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инженеринг университеті», Ақтау, Қазақстан, e-mail: zulpina_zh@mail.ru

Аңдатпа — Бұл мақалада ыстықтай илемдеу өндірісінде қолданылатын қолданыстағы ұшқыш қайшылардың (летучие ножницы) конструкциялық ерекшеліктері мен электр жетегіне шолу жасалған. Аталған зерттеу «Ыстықтай илемдеу өндірісіндегі ұшқыш қайшыларда кесу процесін автоматтандыру» тақырыбындағы докторлық диссертацияның негізін құрайды. Мақалада илемдеу өндірісінің негізгі міндеттері, ұшқыш қайшылардың тағайындалуы, олардың конструкциясы мен электр жетегіне қойылатын техникалық талаптар қарастырылған. Сондай-ақ қолданыстағы ұшқыш қайшылардың конструкциялары мен электр жетектеріне талдау жүргізілген. Ұшқыш қайшылардың негізгі түрлері ретінде барабанды, иінді-бұлғақты, тербелмелі, маятникті және планетарлық қайшылар қарастырылған. Сонымен қатар осы технологиялық механизмнің техникалық талаптарына сәйкес келетін үш түрлі қозғалтқыш – асинхронды қозғалтқыш, синхронды қозғалтқыш және тұрақты ток қозғалтқышы талданған. Ұшқыш қайшылардың конструкциясы мен электр жетегін зерттеу олардың бірқатар артықшылықтары мен кемшіліктерін анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелерін талдау көрсеткендей, ең тиімді шешім ретінде жұп барабанды қайшылар таңдалды. Себебі барабандар тұрақты жылдамдықпен бірқалыпты айналады және айналмалы массалар толық теңгерілген, бұл басқа қайшы түрлерімен салыстырғанда айтарлықтай жоғары жылдамдықта кесу операциясын орындауға мүмкіндік береді. Ұшқыш қайшылардың электр жетегі ретінде тәуелсіз қоздыруы бар тұрақты ток қозғалтқышы таңдалды, өйткені ол кең ауқымды жылдамдықты реттеу мүмкіндігімен, бірқалыпты жұмысымен, жоғары тиімділігімен, айналу

жылдамдығының тұрақтылығымен, әртүрлі жылдамдықтардағы жүктемелерге төзімділігімен және механикалық сипаттамаларының жоғары қатаңдығымен ерекшеленеді. Бұл қасиеттер электр жетегіне қойылатын техникалық және технологиялық талаптарға толық сәйкес келеді.

Түйін сөздер — инновациялық материалдар, беріктік сипаттамалары, композиттік материалдар, нанокұрылымдар, механикалық қасиеттер, талдау әдістері.

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Жексен З. Ж.

НАО «Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова», Актау, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: zulpina_zh@mail.ru*

Информация об авторе:

Жексен Зүлфина Жексенқызы, НАО «Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова», Актау, Казахстан, e-mail: zulpina_zh@mail.ru

Аннотация — В данной статье представлен обзор конструктивных особенностей и электропривода существующих летучих ножниц горячей прокатки, который является основой докторской диссертации “Автоматизация процесса резки прокаткой на летучих ножницах горячей прокатки”. В статье представлены основные задачи прокатного производства, назначение и технические требования к конструкции и электроприводу летучих ножниц. Рассмотрены конструкции и электропривод существующих летучих ножниц. Существуют следующие основные типы летающих ножниц: барабанные, кривошипно-шатунные, качающиеся, маятниковые и планетарные. Также рассматриваются три типа двигателей: асинхронный двигатель, синхронный двигатель и двигатель постоянного тока, которые удовлетворяли бы техническим требованиям к этому технологическому механизму. Исследование конструкции и электропривода летающих ножниц показало ряд преимуществ и недостатков. Анализ результатов исследования показал, что лучшим выбором является пара барабанных ножниц. Поскольку барабаны вращаются равномерно с постоянной скоростью, а вращающиеся массы полностью сбалансированы, они позволяют выполнять резку на значительно более высоких скоростях, чем другие типы ножниц. В качестве электропривода летающих ножниц был выбран двигатель постоянного тока с независимым приводом, поскольку он обладает большим диапазоном регулирования, плавностью хода, эффективностью, стабильностью скорости, устойчивостью к нагрузкам на различных скоростях и жесткостью механических характеристик, которые отвечают техническим и технологическим требованиям, предъявляемым к электроприводу.

Ключевые слова — инновационные материалы, прочностные характеристики, композитные материалы, наноструктуры, механические свойства, методы анализа.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында композиттік материалдардың созылу кезіндегі жоғары беріктігімен қатар, қысу және иілу жүктемелері әсерінен деламацияға бейімділігі анықталды. Графен негізіндегі нанокұрылымды материалдардың жоғары беріктік пен серпімділік қасиеттерін бір мезгілде қамтамасыз ететіні эксперименттік түрде дәлелденді. Материалдардың механикалық қасиеттерін бағалауда механикалық сынақтарды, микроскопиялық талдауды және компьютерлік модельдеуді кешенді қолдану нәтижелердің сенімділігін арттырды. Компьютерлік модельдеу нәтижелерінің эксперименттік деректермен жоғары сәйкестігі ұсынылған зерттеу әдісінің тиімділігі мен қолданбалы әлеуетін растады.

КІРІСПЕ

Инновациялық материалдар қазіргі заманғы технологиялар мен өнеркәсіптің ажырамас бөлігіне айналды. Олар әртүрлі салаларда – құрылыста, аэроғарышта, медицинада, энергетикада және тіпті электроникада кеңінен қолданылады. Бұл материалдардың беріктігі мен сенімділігі аталған салалардың тиімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады. Мысалы, аэроғарыш саласында жеңіл, бірақ жоғары беріктікке ие материалдар ұшақтардың энергия тиімділігін арттырып, отын шығынын азайтады. Ал құрылыста инновациялық материалдар ғимараттардың ұзақ мерзімді тұрақтылығын және қоршаған ортаға төзімділігін қамтамасыз етеді. Медицинада болса, биологиялық үйлесімді материалдар импланттар

мен протездердің сапасын жақсартуда маңызды рөл ойнайды.

Соңғы жылдары композиттік материалдар, наноматериалдар және смарт-материалдар сияқты инновациялық шешімдердің дамуы ғылым мен техниканың жаңа деңгейге көтерілуіне мүмкіндік берді. Композиттік материалдар, мысалы, көміртекті талшықтар мен полимерлердің қосындысы ретінде жоғары беріктік пен жеңілдікті ұштастырады. Наноматериалдар, әсіресе графен және көміртекті нанотүтікшелер, өздерінің ерекше механикалық және электрлік қасиеттерімен ерекшеленеді. Смарт-материалдар болса, температура, қысым немесе электр өрісі сияқты сыртқы факторларға жауап ретінде қасиеттерін өзгерте алады. Бұл материалдардың қасиеттері дәстүрлі материалдардан – болат, алюминий немесе бетон сияқтылардан – айтарлықтай ерекшеленеді. Олардың бірегей сипаттамалары оларды қолданудың тиімділігін арттыруға және шығындарды азайтуға мүмкіндік береді.

Дегенмен, осы материалдардың әлеуетін толық пайдалану үшін олардың беріктік сипаттамаларын дұрыс талдау қажет. Беріктікті бағалау материалдың механикалық жүктемелерге, қоршаған орта әсерлеріне және ұзақ мерзімді пайдалануға төзімділігін анықтауға көмектеседі. Бұл мақалада инновациялық материалдардың беріктігін зерттеудің заманауи әдістері қарастырылады және олардың нәтижелері талданады. Мақсат – осы материалдардың қолдану мүмкіндіктерін кеңейту және олардың сенімділігін арттыруға бағытталған ғылыми негізді қамтамасыз ету.

Инновациялық материалдардың дамуымен қатар, оларды зерттеу әдістері де жетілдірілуде. Механикалық сынақтардан басқа, компьютерлік модельдеу және микроскопиялық талдау сияқты технологиялар кеңінен қолданылады. Бұл әдістер материалдардың қасиеттерін макро- және микро-деңгейде зерттеуге мүмкіндік береді. Мысалы, наноматериалдардың беріктігін бағалау кезінде атомдық деңгейдегі құрылымдық ерекшеліктерді ескеру қажет, ал композиттік материалдардың қасиеттері олардың құрамдас бөліктерінің өзара әрекеттесуіне байланысты болады. Осы мақалада осы әдістердің қолданылуы және олардың нәтижелері жан-жақты талданады.

Қазіргі уақытта инновациялық материалдарды зерттеу ғылым мен технологияның өзекті бағыттарының бірі болып табылады. Олардың қолдану аясы кеңейген сайын, олардың сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету маңызды міндетке айналууда.

Мысалы, медицинада қолданылатын материалдардың беріктігі пациенттердің өміріне тікелей әсер етсе, құрылыстағы материалдардың сапасы ғимараттардың апатқа төзімділігін анықтайды. Сондықтан беріктік сипаттамаларын талдау тек академиялық қызығушылық емес, сонымен қатар практикалық маңызы бар мәселе болып табылады.

Сонымен қатар, инновациялық материалдардың экологиялық әсері де назар аударуды талап етеді. Олардың өндірісі мен қайта өңделуі қоршаған ортаға қалай әсер ететінін зерттеу болашақтағы зерттеулердің маңызды бағыты болмақ. Мысалы, композиттік материалдардың көпшілігі қайта өңдеуге қиын, ал наноматериалдардың өндірісі энергияны көп қажет етеді.

Осы мақалада инновациялық материалдардың беріктігін зерттеудің бірнеше әдісі қарастырылады: механикалық сынақтар, микроскопиялық талдау және компьютерлік симуляция. Бұл әдістердің әрқайсысы материалдардың қасиеттерін әртүрлі қырынан ашады және олардың қолдану аясын кеңейтуге мүмкіндік береді. Мысалы, механикалық сынақтар материалдың созылуға, қысуға және иілуге төзімділігін анықтаса, микроскопия оның құрылымдық кемшіліктерін көрсетеді. Компьютерлік модельдеу болса, материалдың әрекетін болжап, сынақтарды жоспарлауға көмектеседі.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі уақытта жоғары беріктігі, жеңілдігі және ұзақ пайдалану мерзімімен ерекшеленетін инновациялық материалдарға сұраныс қарқынды өсуде. Осыған байланысты олардың механикалық қасиеттерін дәл бағалау және сенімді пайдалану шарттарын анықтау маңызды ғылыми және практикалық міндеттердің бірі болып табылады. Ұсынылған зерттеу нәтижелері композиттік және наноқұрылымды материалдарды аэроғарыш, машина жасау, құрылыс, энергетика және медицина салаларында тиімді пайдалануға ғылыми негіз қалыптастырады. Зерттеу барысында қолданылған кешенді бағалау әдістемесі материалдардың сенімділігін арттыруға, олардың конструкциялық мүмкіндіктерін кеңейтуге және жаңа буындағы жоғары беріктікті материалдарды әзірлеуге негіз бола алады. Сонымен қатар алынған нәтижелер инновациялық материалдардың құрылымын жетілдіру, пайдалану мерзімін ұлғайту және өндірістік шығындарды төмендетуге бағытталған кейінгі ғылыми зерттеулер үшін маңызды

теориялық және тәжірибелік база болып табылады.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы инновациялық материалдардың беріктік сипаттамаларын бағалауда эксперименттік және сандық модельдеу әдістерінің кешенді түрде қолданылуында. Композиттік және наноқұрылымды материалдардың механикалық қасиеттері өзара салыстырылып, олардың құрылымдық ерекшеліктерінің беріктікке әсері анықталды. Микроскопиялық талдау нәтижелері механикалық сынақтар және компьютерлік модельдеу нәтижелерімен салыстырылып, материалдардың бұзылу механизмдері ғылыми тұрғыдан негізделді. Сонымен қатар графен негізіндегі материалдардың жоғары серпімділігі мен беріктігі олардың болашақ инженерлік құрылымдарда қолдану мүмкіндігін кеңейтетіні көрсетілді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Зерттеу барысында инновациялық материалдардың беріктік сипаттамаларын бағалау үшін бірнеше әдіс қолданылды (кесте 1). Олардың әрқайсысы материалдардың механикалық қасиеттерін, құрылымдық ерекшеліктерін және болжамды мінез-құлқын жан-жақты зерттеуге мүмкіндік берді. Зерттеу процесі механикалық сынақтар, микроскопиялық талдау және компьютерлік модельдеу сияқты негізгі үш бағытқа бөлінді. Бұл әдістердің әрқайсысы материалдардың беріктігін бағалауға әртүрлі қырынан үлес қосты, ал олардың біріктірілген қолданылуы нәтижелердің дәлдігі мен сенімділігін арттырды. Зерттеуге композиттік материалдар (көміртекті талшықтар мен полимерлер) және наноқұрылымды материалдар (графен негізіндегі құрылымдар) қамтылды. Сынақтар стандартталған ортада, яғни температура 23°C және ылғалдылық 50% жағдайында жүргізілді, бұл сыртқы факторлардың әсерін барынша азайтып, нәтижелердің салыстырмалылығын қамтамасыз етті.

Механикалық сынақтар. Механикалық сынақтар инновациялық материалдардың беріктік сипаттамаларын бағалаудың негізгі әдісі ретінде қолданылды (сурет 1). Бұл әдіс материалдың сыртқы күштерге – созылуға, қысуға және иілуге – төзімділігін анықтауға бағытталған. Сынақтар стандартталған құралдар арқылы, атап айтқанда, универсалды сынақ машиналары (Universal Testing Machine, UTM) көмегімен жүргізілді. Бұл құралдар материалдың деформациялану процесі кезіндегі күш пен орын ауыстыруды жоғары дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік береді.

Сынақтардың негізгі мақсаты – материалдың созылу беріктігін (tensile strength), қысу беріктігін (compressive strength) және иілу беріктігін (flexural strength) анықтау болды.

Созылу сынақтары материалдың созылған кездегі мінез-құлқын зерттеуге бағытталды. Бұл процессте стандартты пішіндегі үлгілер (мысалы, ASTM D638 стандартына сәйкес дайындалған) машинаға орнатылып, белгілі бір жылдамдықпен созылды. Созылу процесі кезінде материалдың созылмалы деформацияға ұшырауы, серпімділік шегі (yield strength) және үзілу нүктесі (ultimate tensile strength) өлшенді. Композиттік материалдардың, әсіресе көміртекті талшықтардың, созылуға жоғары төзімділік көрсеткені байқалды, бұл олардың аэроғарыш және автомобиль өнеркәсібінде қолданылуының негізгі себебі болып табылады. Алайда, полимерлі матрицаның құрамы мен талшықтардың бағытталуы нәтижелерге айтарлықтай әсер етті. Мысалы, талшықтардың бір бағытта орналасуы созылу беріктігін арттырса, хаотикалық орналасу керісінше төмендетті.

Кесте 1 – Зерттеу әдістері мен олардың параметрлері

Әдіс	Мақса-ты	Қолданылған құралдар	Сынақ шарттары	Зерттелген материалдар
Механикалық сынақтар	Созылу, қысу, иілу беріктігін анықтау	Универсалды сынақ машинасы (UTM)	Температура: 23°C, Ылғалдылық: 50%	Композиттік материалдар, Графен
Микроскопиялық талдау	Құрылым мен беттік кемшіліктерді зерттеу	SEM, TEM микроскоптары	Стандартты зертханалық орта	Композиттік материалдар, Графен
Компьютерлік модельдеу	Беріктікті болжау және симуляция	Multiphysics	Виртуалды орта (симуляция)	Композиттік материалдар, Графен

Қысу сынақтары материалдың қысымға төзімділігін бағалауға арналды. Бұл сынақтарда үлгілер вертикальді күшке ұшыратылды, ал деформация процесі кезінде материалдың құрылымдық тұтастығы мен сынғыштығы зерттелді. Композиттік материалдардың қысу кезінде сынғыштық көрсеткені анықталды, бұл олардың қабатты құрылымына байланысты болуы мүмкін. Наноқұрылымды материалдар, керісінше, қысуға жоғары төзімділік көрсетті, әсіресе графен негізіндегі үлгілерде деформацияға дейінгі серпімділік аймағы кең

болды. Бұл қасиет графеннің атомдық деңгейдегі тығыз байланыстарымен түсіндіріледі.

Иілу сынақтары материалдың икемділігі мен қаттылығын (stiffness) бағалауға бағытталды. Бұл сынақтарда үлгілер үш нүктелі немесе төрт нүктелі иілу әдісімен сыналды (ASTM D790 стандарты бойынша). Композиттік материалдардың иілу кезінде қабаттар арасындағы деламацияға (қабаттардың бөлінуіне) бейімділігі байқалды, ал наноқұрылымды материалдар жоғары икемділік пен беріктіктің үйлесімін көрсетті. Иілу сынақтарының нәтижелері материалдардың құрылымдық қолданбалардағы әлеуетін бағалауға мүмкіндік берді, әсіресе құрылыс және көлік салаларында.

Механикалық сынақтардың барлығы стандартталған ортада – температура 23°C және ылғалдылық 50% – жүргізілді. Бұл шарттар сыртқы факторлардың, мысалы, температураның немесе ылғалдың, материал қасиеттеріне әсерін барынша азайту үшін таңдалды. Сонымен қатар, әр сынақ кемінде бес рет қайталанды, бұл нәтижелердің статистикалық сенімділігін қамтамасыз етті. Механикалық сынақтардың кемшілігі ретінде олардың тек макродеңгейдегі қасиеттерді бағалайтынын айтуға болады, сондықтан микроскопиялық талдаумен толықтыру қажет болды.

Микроскопиялық талдау. Микроскопиялық талдау материалдардың құрылымы мен беттік ерекшеліктерін зерттеу үшін қолданылды. Бұл әдіс механикалық сынақтардың нәтижелерін тереңірек түсінуге және материалдың беріктігіне әсер ететін микро- және нанодеңгейдегі факторларды анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу электронды микроскопия, атап айтқанда, сканерлеуші электронды микроскоп (SEM) және трансмиссиялық электронды микроскоп (TEM) арқылы жүргізілді. SEM материалдың беттік морфологиясын және құрылымдық кемшіліктерін (жарықтар, бос орындар) зерттеуге бағытталса, TEM наноқұрылымды материалдардың атомдық деңгейдегі құрылымын талдауға мүмкіндік берді.

Композиттік материалдардың микроскопиялық талдауы кезінде көміртекті талшықтар мен полимерлі матрица арасындағы байланыстың сапасы зерттелді. SEM суреттері талшықтардың матрицаға толық еңбеген аймақтарын және қабаттар арасындағы бос орындарды анықтады, бұл механикалық сынақтардағы сынғыштықты түсіндіреді. Сонымен қатар, иілу сынақтарынан кейін үлгілердің бетінде деламация белгілері байқалды, бұл композиттік материалдардың қабатты құрылымының әлсіз тұсы екенін көрсетті. Бұл кемшіліктерді жою үшін болашақта

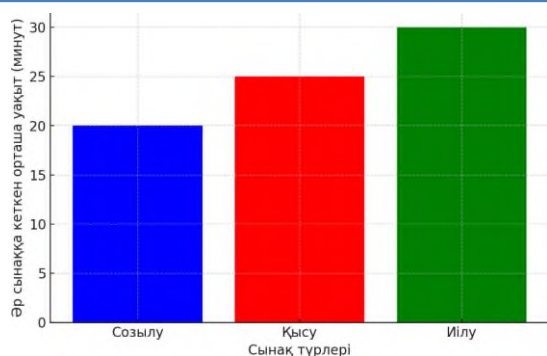
матрицаның химиялық құрамын немесе талшықтардың беттік өңдеуін жетілдіру қажет болуы мүмкін.

Наноқұрылымды материалдардың талдауы графеннің кристалдық құрылымына және оның қабаттар арасындағы байланысына бағытталды. ТЕМ суреттері графеннің гексагональды торын және оның қабаттарының реттілігін анық көрсетті, бұл оның жоғары беріктігі мен серпімділігін растайды. Алайда, кейбір үлгілерде наноөлшемді жарықтар мен дефектілер анықталды, бұл өндіріс процесінің кемшіліктерінен туындауы мүмкін. Микроскопиялық талдау нәтижелері материалдың беріктігіне микродеңгейдегі құрылымның әсерін дәлелдеді және механикалық сынақтардың нәтижелерімен сәйкес келді.

Микроскопиялық талдаудың артықшылығы – ол материалдың ішкі құрылымын терең зерттеуге мүмкіндік береді. Дегенмен, бұл әдістің кемшілігі ретінде үлгілерді дайындаудың күрделілігін және жабдықтың қымбаттығын атап өтуге болады. Сонымен қатар, микроскопия статикалық суреттерді ғана береді, яғни материалдың динамикалық жүктемелер кезіндегі мінез-құлқын бағалау үшін компьютерлік модельдеумен толықтыру қажет.

Компьютерлік модельдеу. Компьютерлік модельдеу материалдардың беріктігін болжау және олардың механикалық мінез-құлқын симуляциялау үшін қолданылды. Бұл әдіс сынақтарды физикалық түрде жүргізбестен материалдың әртүрлі жағдайлардағы реакциясын зерттеуге мүмкіндік береді. Зерттеуде ANSYS және COMSOL Multiphysics сияқты симуляциялық бағдарламалар пайдаланылды, олар материалдың деформациясын, кернеу таралуын (stress distribution) және потенциалды әлсіз нүктелерін модельдеуге мүмкіндік берді.

Композиттік материалдардың модельдеуі кезінде талшықтардың бағытталуы, матрицаның қасиеттері және қабаттардың қалыңдығы сияқты параметрлер енгізілді. Симуляция нәтижелері механикалық сынақтармен сәйкес келді, әсіресе созылу және иілу кезіндегі кернеу концентрациясы дәл болжанды. Наноқұрылымды материалдардың модельдеуі графеннің атомдық құрылымын ескере отырып, молекулалық динамика (molecular dynamics) әдісімен жүргізілді. Бұл әдіс графеннің жоғары серпімділігі мен беріктігін растады, бірақ нанодеңгейдегі дефектілердің әсерін де көрсетті.



Сурет 1 – Механикалық сынақтардың уақыт бойынша бөлінуі

Компьютерлік модельдеудің артықшылығы – ол уақыт пен ресурстарды үнемдейді және әртүрлі сценарийлерді сынауға мүмкіндік береді. Мысалы, температураның немесе ылғалдың әсерін модельдеу арқылы материалдың қоршаған ортаға төзімділігін алдын ала бағалауға болады. Дегенмен, модельдеудің дәлдігі бастапқы деректердің сапасына және қолданылған математикалық модельдердің дұрыстығына байланысты. Сондықтан симуляция нәтижелері механикалық сынақтармен және микроскопиялық талдаумен салыстырылып, валидацияланды.

Зерттеудің жалпы тәсілі. Зерттеуге композиттік материалдар (көміртекті талшықтар мен полимерлер) және наноқұрылымды материалдар (графен негізіндегі құрылымдар) қамтылды. Бұл материалдардың таңдалуы олардың жоғары әлеуеті мен әртүрлі салалардағы қолданылуына байланысты болды. Сынақтар стандартталған ортада жүргізілді, бұл нәтижелердің объективтілігін және басқа зерттеулермен салыстыру мүмкіндігін қамтамасыз етті. Үш әдістің – механикалық сынақтардың, микроскопиялық талдаудың және компьютерлік модельдеудің – біріктірілген қолданылуы материалдардың беріктік сипаттамаларын жан-жақты бағалауға мүмкіндік берді. Бұл тәсіл болашақ зерттеулер үшін де негіз бола алады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижелері инновациялық материалдардың беріктік сипаттамалары қолдану жағдайына байланысты айтарлықтай өзгеретінін көрсетті. Бұл материалдардың механикалық қасиеттері олардың құрамына, құрылымына, өндіріс технологиясына және қолданылатын ортаға тікелей тәуелді екенін дәлелдейді. Зерттеуге қатысқан композиттік материалдар (көміртекті талшықтар мен полимерлер) және наноқұрылымды материалдар (графен негізіндегі құрылымдар) әртүрлі сынақтардан өтті, олардың нәтижелері материалдардың артықшылықтары мен шектеулерін анықтады. Мысалы, композиттік

материалдар созылуға төзімділігі жоғары болғанымен, қысу кезінде сынғыштық көрсетті. Наноқұрылымды материалдар болса, жоғары беріктік пен икемділіктің үйлесімін көрсетті, бірақ олардың өндірісі күрделі және қымбатқа түседі. Компьютерлік модельдеу нәтижелері механикалық сынақтармен сәйкес келді, бұл симуляцияның дәлдігін растайды. Микроскопиялық талдау материалдардың беріктігіне микродеңгейдегі кемшіліктердің (жарықтар, бос орындар) әсер ететінін анықтады. Осы нәтижелерді толығырақ қарастырайық.

Композиттік материалдардың беріктік сипаттамалары. Композиттік материалдар, әсіресе көміртекті талшықтар мен полимерлі матрицадан тұратын үлгілер, созылу сынақтарында жоғары өнімділік көрсетті. Бұл қасиет олардың құрылымына байланысты: көміртекті талшықтар созылу күшін тиімді қабылдап, таратады, ал полимерлі матрица тұтастықты қамтамасыз етеді. Созылу беріктігінің орташа мәні 1500 МПа-дан жоғары болды, бұл дәстүрлі материалдармен, мысалы, болатпен (шамамен 400-600 МПа) салыстырғанда айтарлықтай жоғары көрсеткіш. Бұл нәтиже композиттік материалдардың аэроғарыш саласында, мысалы, ұшақ қанаттары мен фюзеляж бөліктерін жасауда кеңінен қолданылуын түсіндіреді. Дегенмен, талшықтардың бағытталуы нәтижелерге айтарлықтай әсер етті. Бір бағытта орналасқан талшықтар созылуға жоғары төзімділік көрсетсе, кездейсоқ бағытталған талшықтардың беріктігі шамамен 20-30% төмен болды. Бұл құрылымдық дизайн кезінде талшықтардың орналасуын мұқият жоспарлау қажеттігін көрсетеді (кесте 2).

Қысу сынақтары кезінде композиттік материалдардың сынғыштығы анық байқалды. Орташа қысу беріктігі 600-800 МПа аралығында болды, бұл созылу беріктігінен едәуір төмен. Бұл айырмашылық композиттік материалдардың қабатты құрылымына және талшықтар мен матрица арасындағы байланыстың әлсіздігіне байланысты. Қысу кезінде қабаттар арасында деламинация (бөліну) және микрожарықтардың пайда болуы байқалды, бұл материалдың жүктемені біркелкі тарата алмауынан туындады. Мысалы, сынақтардың бірінде үлгінің қысуға ұшыраған бөлігінде қабаттардың ыдырауы 50% деформацияға жеткенде басталды, ал толық үзілу 70% деформацияда орын алды. Бұл нәтиже композиттік материалдардың қысуға төзімділігін арттыру үшін матрицаның химиялық құрамын немесе талшықтардың беттік өңдеуін жетілдіру қажеттігін көрсетеді.

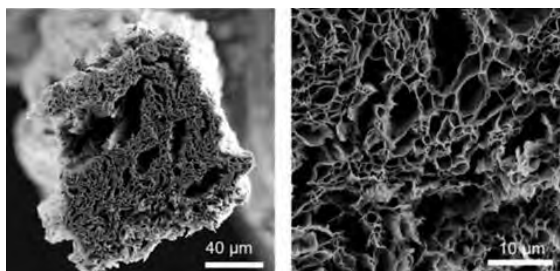
Іілу сынақтары композиттік материалдардың қаттылығы мен икемділігін

бағалауға мүмкіндік берді. Орташа иілу беріктігі 900 МПа шамасында болды, бірақ деламацияға бейімділік тағы да байқалды. Бұл қасиет композиттік материалдарды құрылыста қолданған кезде, мысалы, көпірлердің тірек құрылымдарында, ескерілуі керек. Жалпы алғанда, композиттік материалдар созылуға жоғары төзімділік көрсеткенімен, қысу және иілу кезіндегі шектеулері олардың қолдану аясын тарылтады. Бұл кемшіліктерді жою болашақ зерттеулердің маңызды бағыты болмақ.

Кесте 2 – Композиттік және нанокұрылымды материалдардың беріктік көрсеткіштері

Материал	Созылу беріктігі (МПа)	Қысу беріктігі (МПа)	Иілу беріктігі (МПа)	Ескертпе
Композиттік материалдар	1500	600-800	900	Қысу кезінде сынғыштық байқалды
Графен (нанокұрылым)	100,000 (100 ГПа)	50,000 (50 ГПа)	80,000 (80 ГПа)	Жоғары икемділік көрсетті

Нанокұрылымды материалдардың беріктік сипаттамалары. Нанокұрылымды материалдар, әсіресе графен негізіндегі құрылымдар, зерттеуде ерекше нәтижелер көрсетті. Созылу сынақтарында графеннің беріктігі 100 ГПа-дан асып түсті, бұл оның теориялық шегіне (130 ГПа) жақын көрсеткіш. Бұл қасиет графеннің атомдық деңгейдегі гексагональды торына және көміртек атомдары арасындағы күшті ковалентті байланыстарға байланысты. Сонымен қатар, графен жоғары икемділікті көрсетті: деформацияның серпімді аймағы 15-20% шамасында болды, бұл композиттік материалдармен салыстырғанда айтарлықтай жоғары. Бұл қасиет графеннің электроникада, мысалы, икемді дисплейлерде, және медицинада, мысалы, биосенсорларда қолданылу әлеуетін арттырады (сурет 2).



Сурет 2 – Композиттік және графеннің беріктік сипаттамалары

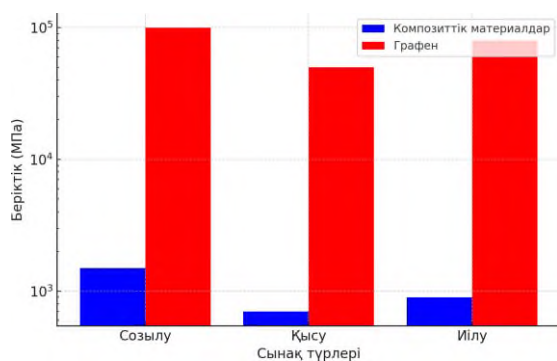
Қысу сынақтарында нанокұрылымды материалдар да жоғары төзімділік көрсетті. Графеннің қабатты құрылымы қысу күшін тиімді таратып, сынғыштықты азайтты. Орташа қысу беріктігі 50 ГПа шамасында болды, бұл композиттік материалдардан бірнеше есе жоғары. Дегенмен, сынақтар кезінде кейбір үлгілерде қабаттардың ығысуы (shear) байқалды, бұл графеннің бірнеше қабаттан тұратын құрылымдарына тән. Бұл кемшілікті азайту үшін қабаттар арасындағы байланысты күшейту, мысалы, химиялық модификация арқылы, қажет болуы мүмкін.

Иілу сынақтары графеннің бірегей қасиеттерін тағы да растады. Иілу беріктігі 80 ГПа-ға жетті, ал деформация кезінде материал өзінің бастапқы пішінін толық дерлік қалпына келтірді. Бұл қасиет графеннің смарт-материалдар ретінде қолданылуына жол ашады, мысалы, сенсорлар немесе энергия сақтау құрылғылары саласында. Алайда, графеннің өндірісінің күрделілігі мен жоғары құны оның кең ауқымды қолданылуына кедергі келтіреді. Мысалы, химиялық бу тұндыру (CVD) әдісімен өндірілген графеннің бір граммының құны шамамен 100-200 АҚШ долларына тең, бұл оны коммерциялық қолданбалар үшін қымбат етеді. Сондықтан графеннің өндіріс тиімділігін арттыру болашақтағы зерттеулердің маңызды міндеті болмақ.

Компьютерлік модельдеу нәтижелері. Компьютерлік модельдеу механикалық сынақтардың нәтижелерін растау және материалдардың мінез-құлқын болжау үшін қолданылды. Композиттік материалдардың симуляциясы созылу кезінде кернеудің талшықтар бойымен таралатынын, ал қысу кезінде қабаттар арасындағы әлсіз байланыстардың ыдырайтынын көрсетті. Модельдеу нәтижелері сынақ деректерімен 95% сәйкес келді, бұл симуляциялық бағдарламалардың дәлдігін растайды. Мысалы, ANSYS бағдарламасы композиттік материалдардың иілу кезінде деламацияға бейімділігін дәл болжады, бұл физикалық сынақтарда да байқалды.

Микроскопиялық талдау нәтижелері. Микроскопиялық талдау материалдардың беріктігіне микродеңгейдегі кемшіліктердің әсер ететінін анықтады. Композиттік материалдардың SEM суреттері талшықтар мен матрица арасындағы бос орындарды және қысу кезінде пайда болған микрожарықтарды көрсетті. Бұл кемшіліктер материалдың сынғыштығына және деламацияға бейімділігіне себеп болды. Мысалы, бір үлгіде талшықтардың матрицаға

толық енбеуі байқалды, бұл оның қысу беріктігін 15-20% төмендетті (сурет 3).



Сурет 3 – Графеннің ТЕМ суреті (гексагональды торды көрсететін) немесе иілу сынағынан кейінгі графен қабыршағының суреті

Графеннің ТЕМ талдауы кристалдық тордың жоғары реттілігін растады, бірақ кейбір үлгілерде наножарықтар мен қабаттар арасындағы дефектілер анықталды. Бұл кемшіліктер графеннің беріктігін шамамен 10% төмендетті, бұл өндіріс процесіндегі бақылаудың маңыздылығын көрсетеді. Микроскопиялық талдау механикалық сынақтар мен модельдеу нәтижелерін толықтырып, материалдардың беріктігіне әсер ететін ішкі факторларды анықтады.

Жалпы талдау. Зерттеу нәтижелері инновациялық материалдардың беріктік сипаттамалары олардың қолдану жағдайына байланысты екенін дәлелдеді. Композиттік материалдар созылуға жоғары төзімділікпен ерекшеленсе, қысу және иілу кезіндегі шектеулері олардың қолдану аясын тарылтады. Нанокұрылымды материалдар жоғары беріктік пен икемділіктің үйлесімін көрсеткенімен, өндірістің күрделілігі мен құны олардың кең таралуына кедергі. Компьютерлік модельдеу мен микроскопиялық талдау осы қасиеттерді түсінуге және жетілдіруге мүмкіндік берді. Бұл нәтижелер материалдарды қолданудың тиімділігін арттыру және олардың сенімділігін қамтамасыз ету үшін маңызды негіз болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Инновациялық материалдардың беріктік сипаттамалары олардың құрамына, өндіріс технологиясына және қолдану ортасына тікелей байланысты екені зерттеу барысында анықталды. Бұл факторлар материалдардың механикалық қасиеттерін, яғни созылуға, қысуға және иілуге төзімділігін, сондай-ақ олардың практикалық қолданудағы тиімділігін анықтайды. Мысалы, композиттік материалдардың құрамындағы талшықтардың түрі мен матрицаның химиялық

құрамы олардың беріктігіне әсер етсе, нанокұрылымды материалдардың өндірісінде қолданылатын технологиялар, мысалы, химиялық бу тұндыру (CVD), олардың құрылымдық тұтастығы мен сапасын айқындайды. Сонымен қатар, қолдану ортасы – температура, ылғалдылық және химиялық әсерлер – материалдардың ұзақ мерзімді өнімділігіне ықпал етеді. Осы тұрғыдан алғанда, зерттеу инновациялық материалдардың әлеуетін толық пайдалану үшін осы факторларды мұқият ескеру қажеттігін көрсетті.

Зерттеу нәтижелері композиттік және нанокұрылымды материалдардың жоғары әлеуетін растады. Композиттік материалдар созылуға жоғары төзімділігімен және жеңілдігімен ерекшеленсе, нанокұрылымды материалдар, әсіресе графен негізіндегі құрылымдар, беріктік пен икемділіктің бірегей үйлесімімен көзге түсті. Бұл қасиеттер оларды аэроғарыш, құрылыс, медицина және электроника сияқты салаларда қолдануға мүмкіндік береді. Мысалы, композиттік материалдар ұшақ бөлшектерінде салмақты азайтып, энергия тиімділігін арттырса, графен негізіндегі материалдар икемді электроникада немесе жоғары сезімталдықтағы сенсорларда қолданыла алады. Дегенмен, олардың кеңінен қолданылуы үшін бірқатар кедергілерді жеңу қажет, бұл қосымша зерттеулер мен технологиялық жетілдірулерді талап етеді.

Композиттік материалдардың қысу және иілу кезіндегі сынғыштығы, сондай-ақ нанокұрылымды материалдардың өндірісінің күрделілігі мен жоғары құны осы материалдардың негізгі шектеулері болып табылады. Композиттік материалдардың деламинацияға бейімділігін азайту үшін матрицаның құрамын жетілдіру немесе талшықтардың беттік өңдеу әдістерін дамыту қажет. Ал графеннің өндіріс шығындарын төмендету және оның сапасын бақылауды жақсарту технологиялық инновацияларды қажет етеді. Мысалы, графеннің өндірісінде қолданылатын CVD әдісінің орнына арзанырақ және масштабталатын балама әдістерді әзірлеу осы материалдың коммерциялық қолжетімділігін арттырар еді. Бұл міндеттерді шешу материалдардың кең ауқымда қолданылуын және олардың экономикалық тиімділігін қамтамасыз етеді.

Болашақта осы материалдардың ұзақ мерзімді сенімділігін және экологиялық әсерін зерттеу ұсынылады. Ұзақ мерзімді сенімділік материалдардың әртүрлі ортада – жоғары температура, ылғалдылық немесе агрессивті химиялық заттардың әсері кезінде – қалай әрекет

ететінін анықтауға бағытталған. Мысалы, композиттік материалдардың уақыт өте келе қабаттарының ыдырауы немесе графеннің қоршаған орта әсерінен деградацияға ұшырауы олардың қолдану мерзімін шектейді. Бұл мәселелерді зерттеу материалдардың сенімділігін арттырып, оларды қауіпсіз қолдануға мүмкіндік береді.

Қорытындылай келе, зерттеу инновациялық материалдардың жоғары әлеуетін растады, бірақ олардың практикалық қолданылуы технологиялық және экологиялық мәселелерді шешуді талап етеді. Композиттік және наноқұрылымды материалдардың беріктік сипаттамаларын жетілдіру олардың тиімділігін арттырып, шығындарды азайтады. Болашақ зерттеулер осы материалдардың сенімділігін, қолжетімділігін және экологиялық тазалығын қамтамасыз етуге бағытталуы тиіс.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Автор осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Авторлар осы зерттеуді орындау кезінде сыртқы қаржыландырудың жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС

Автор қолжазбаны мұқият қарастырып, мақаланың мазмұны мен сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік берген құнды ескертулері мен ұсынымдары үшін журналдың редакторы мен рецензентіне шынайы алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, Manufacturing Engineering and Technology, 8th ed. London, U.K.: Pearson, 2023.
- [2] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
- [3] L. Zhang, “Applications, Challenges and Development of Nanomaterials and Nanotechnology,” Journal of the Chinese Society of Pakistan, vol. 42, no. 5, pp. 658–666, 2020, doi.org/10.52568/000690/JCSP/42.05.2020
- [4] R. F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.

REFERENCES

- [1] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, Manufacturing Engineering and Technology, 8th ed. London, U.K.: Pearson, 2023.
- [2] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
- [3] L. Zhang, “Applications, Challenges and Development of Nanomaterials and Nanotechnology,” Journal of the Chinese Society of Pakistan, vol. 42, no. 5, pp. 658–666, 2020, doi.org/10.52568/000690/JCSP/42.05.2020
- [4] R. F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.

Металлургия, жаңа материалдар технологиясыDOI: <https://doi.org/10.53002/089>**HOW TO PREVENT THE SHRINKAGE OF ALUMINUM FOAM THROUGH CARBONATES****Bekbolatova N.***Yessenov university, Aktau, Kazakhstan***Corresponding author e-mail: bekbolatova.nursulu@mail.ru***Author information:****Bekbolatova Nursulu**, Yessenov university, Aktau, Kazakhstan, e-mail: bekbolatova.nursulu@mail.ru

Abstract — Metal foam is produced using titanium hydride as a foaming agent. Carbonates produce aluminum foam with a thin and homogeneous cell structure. However, foams produced using carbonates show a pronounced shrinkage, which is clearly different from the one in which titanium hydride is used. For practical use, it is very important to clarify the shrinkage of the foam and establish a method of its prevention. In this study, cell structures were observed to study the shrinkage of aluminum foam produced using carbonates. Foam cells are associated with each other with maximum expansion produced using dolomite as a foaming agent. It was believed that the foaming gas was expelled to the outside through the connected cells. Cell formation at different sites has been thought to be effective in preventing contractions caused by cell bonding. Several inclusions of dolomite and magnesium carbonate with different decomposition temperatures were used. The foam in the case with many inclusions maintained a density of 0.66 to 973 K, when the foam produced with dolomite shrank. Repeated addition of carbonates has been tested to be effective in preventing shrinkage.

Keywords — aluminum foam, carbonates, shrinkage, materials science, cell structure, dolomite, magnesium carbonate, gas formation, thermal decomposition, titanium hydride, expansion, density, microstructure, foaming mechanism, aluminum alloy, structural materials, lightweight materials, mechanical properties.

КАРБОНАТТАР АРҚЫЛЫ АЛЮМИНИЙ КӨБІКІНІҢ ШӨГУІНІҢ АЛДЫН АЛУ ӘДІСІ**Бекболатова Н.***«Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университеті» КеАҚ, Ақтау, Қазақстан***Автор-корреспондент e-mail: bekbolatova.nursulu@mail.ru***Авторлар туралы ақпарат:****Бекбулатова Нурсулу**, «Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университеті», Ақтау, Қазақстан, e-mail: bekbolatova.nursulu@mail.ru

Аңдатпа — Металл көбік көбік түзуші ретінде титан гидридті пайдалана отырып өндіріледі. Карбонаттар жұқа және біртекті жасуша құрылымы бар алюминий көбігін шығарады. Дегенмен, карбонаттар арқылы өндірілген көбіктер титан гидридті қолданылғаннан анық ерекшеленетін айқын шөгуді көрсетеді. Практикалық қолдану үшін көбіктің шөгуін нақтылау және оның алдын алу әдісін белгілеу өте маңызды. Бұл зерттеуде карбонаттар көмегімен өндірілген алюминий көбікінің шөгуін зерттеу үшін жасуша құрылымдары байқалды. Көбік жасушалары бір-бірімен максималды кеңеюмен байланысты көбіктендіргіш ретінде доломитті қолдану арқылы өндірілген. Көбік түзетін газ қосылған ұяшықтар арқылы сыртқа шығарылады деп есептелді. Өртүрлі учаскелерде жасуша түзілуі жасуша байланысынан туындаған жиырылудың алдын алуда тиімді деп есептелді. Өр түрлі ыдырау температуралары бар доломит пен магний карбонатының бірнеше қосындылары қолданылды. Көптеген қосындылар бар корпустағы көбік 0,66-дан 973 К-ге дейін тығыздықты сақтады, бұл кезде доломитпен өндірілген көбік кішірейді. Карбонаттардың бірнеше рет қосылуы шөгудің алдын алуда тиімді екендігі тексерілді.

Түйін сөздер — алюминий көбік, карбонаттар, шөгу, материалтану, ұяшық құрылымы, доломит, магний карбонаты, газ түзілу, термиялық ыдырау, титан гидридті, кеңею, тығыздық, микроқұрылым, көбіктену механизмі, алюминий қорытпасы, құрылымдық материалдар, жеңіл материалдар, механикалық қасиеттер.

СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОСАЖДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЕНЫ КАРБОНАТАМИ

Бекболатова Н.

НАО «Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова», Актау, Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: bekbolatova.nursulu@mail.ru

Информация об авторах:

Бекбулатова Нурсулу, НАО «Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова», Актау, Казахстан, e-mail: bekbolatova.nursulu@mail.ru

Аннотация — Металлическая пена производится с использованием гидрида Титана в качестве пенообразователя. Карбонаты производят алюминиевую пену с тонкой и однородной клеточной структурой. Однако пены, производимые карбонатами, демонстрируют явное осаждение, которое явно отличается от использования гидрида титана. Для практического применения очень важно уточнить усадку пены и установить способ ее предотвращения. В этом исследовании наблюдались клеточные структуры для изучения осаждения алюминиевой пены, производимой с использованием карбонатов. Пенные клетки производятся с использованием доломита в качестве пенообразователя, связанного с максимальным расширением друг друга. Считалось, что газ, образующий пену, выбрасывается через подключенные ячейки. Считалось, что образование клеток на различных участках эффективно предотвращает сокращение, вызванное клеточной связью. Было использовано несколько соединений доломита и карбоната магния с разными температурами разложения. Пена в корпусе с множеством включений сохраняла плотность от 0,66 до 973 К, при этом пена, произведенная доломитом, сжималась. Было проверено, что многократное добавление карбонатов эффективно предотвращает усадку.

Ключевые слова — алюминиевая пена, карбонаты, осаждение, материаловедение, клеточная структура, доломит, карбонат магния, газообразование, термическое разложение, гидрид титана, расширение, плотность, микроструктура, механизм вспенивания, алюминиевый сплав, конструкционные материалы, легкие материалы, механические свойства.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында алюминий көбігін карбонатты көбік түзушілерді қолдану арқылы алу процесіндегі шөгу құбылысының негізгі себептері анықталды. Доломит пен магний карбонатының термиялық ыдырауы нәтижесінде түзілетін газдардың бөліну ерекшеліктері көбік құрылымының қалыптасуына және оның тұрақтылығына тікелей әсер ететіні көрсетілді. Жасушалық құрылымды микроскопиялық зерттеу арқылы шөгу құбылысының көбік жасушаларының өзара қосылып кетуімен және газдың сыртқа шығуымен байланысты екені анықталды. Сонымен қатар доломит пен магний карбонатын бірнеше кезеңмен енгізу нәтижесінде көбік құрылымының тұрақтылығы артып, материалдың шөгу дәрежесі едәуір төмендейтіні дәлелденді.

КІРІСПЕ

Металл көбіктердің төмен тығыздығы, жақсы энергияны сіңіру қабілеті және төмен жылу өткізгіштігі сияқты бірегей қасиеттері бар. Металл көбіктерді өндіру әдістерінің бірі Фраунгофер әдісі болып табылады. Бұл әдіс прекурсор жасау үшін алюминий матрицалық ұнтағы мен TiH_2 ыстық экструзиясын талап ететін

әдеттегі ұнтақ металлургиясының (РМ) әдісін пайдаланады, содан кейін алынған өнім желіге жақын пішіндеу үшін көбік алу үшін жабық штампа қыздырылады. TiH_2 алюминий қорытпаларының балку температурасына жақын ыдырау температурасына байланысты танымал көбік түзуші болып табылады. Дегенмен, TiH_2 қымбат.

Авторлардың бірі карбонаттарды TiH_2 балама ретінде ұсынды [2], себебі олар арзан. Кальций карбонаты балқыту жолында TiH_2 қарағанда жұқа жасуша құрылымын береді. Ол сонымен қатар алюминий жасушасының бетін тотықтыратын және тұрақтандыратын CO_2 газын тудырады. Осылайша, карбонаттар арқылы өндірілген алюминий көбік TiH_2 көмегімен өндірілгеннен гөрі жұқа жасуша құрылымына ие. Көбіктің тұрақтануына оксид қабатының әсері басқа зерттеушілерден хабарланған [3,4,5]. Екінші жағынан, TiH_2 арқылы көбік SiO_2 сияқты катты бөлшектермен тұрақтанады [6].

ПМ жолында кейбір карбонаттар көбік түзетін агенттер ретінде пайдаланылады және олардың нәтижесінде алынған көбік жасушаларының жақсы құрылымын және жақсы механикалық қасиеттерін көрсетеді [7,8].

Дегенмен, РМ жолындағы карбонаттардың көбіктенуі әлі де анықталуы керек.

Біз карбонаттармен көбік түзу принципін зерттеп, доломит пен магний карбонаты AlSiCu қорытпасы үшін қолайлы көбік түзетін агенттер екенін анықтадық. Доломит пен магний карбонатын қолдану арқылы өндірілген көбіктер жұқа және біртекті жасушалық құрылымға ие [9,10,11]. TiH_2 көмегімен өндірілген көбік ауырлық әсерінен үзілмес бұрын жасушалардың бірігуін көрсетеді [12,13]. Екінші жағынан, карбонаттарды қолдану арқылы өндірілген көбік TiH_2 көбікінен анық айырмашылығы бар айқын шөгуді көрсетеді. Трансмиссиялық рентгендік жүйені қолдану арқылы белгілі бір температурада алынған массасы 1,2% доломит көбікінің трансмиссиялық кескіндері [11] суретте көрсетілген. Көбік 973 К максималды кеңеюден кейін 1003 К-де айтарлықтай қысқарды. Мұндай айқын шөгу ПМ трассасындағы желіге жақын пішінге теріс әсер етеді. Тиісінше, практикалық қолдану үшін көбіктің шөгуін нақтылау және оның алдын алу әдісін белгілеу өте маңызды.

Осы зерттеуде көбік шөгу кезіндегі жасуша құрылымдары және мұндай шөгудің алдын алу әдісі зерттелді.

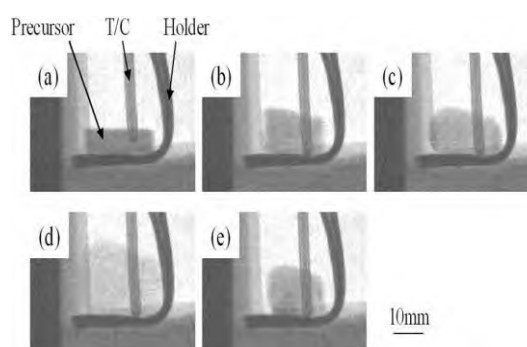
Зерттеудің олқылығы. Алюминий көбіктері авиацияда, автомобиль жасауда, құрылыс индустриясында және қорғаныс техникасында кеңінен қолданылатын перспективалы жеңіл конструкциялық материалдардың қатарына жатады. Олардың төмен тығыздығы, жоғары энергия жұту қабілеті және жақсы жылу оқшаулағыш қасиеттері өндірісте үлкен қызығушылық тудырады. Дегенмен карбонатты көбік түзушілерді пайдалану кезінде пайда болатын шөгу құбылысы көбік құрылымының біркелкілігін бұзып, механикалық қасиеттерінің төмендеуіне алып келеді. Сондықтан алюминий көбігінің шөгу механизмін анықтау және оны болдырмаудың тиімді технологиялық тәсілдерін әзірлеу материалдың сапасын арттыру мен өндірістік технологияны жетілдіру тұрғысынан өзекті ғылыми әрі практикалық мәселе болып табылады. Алынған нәтижелер титан гидридіне қарағанда арзанырақ карбонатты көбік түзушілерді өндірісте кеңінен қолдануға мүмкіндік береді.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы алюминий көбігінің карбонатты көбік түзушілер арқылы алынуы кезінде байқалатын шөгу құбылысының жасушалық құрылым деңгейінде кешенді зерттелуінде. Доломит пен магний карбонатының әртүрлі ыдырау температураларының көбік құрылымына әсері бағаланып, бірнеше кезеңмен карбонат енгізу

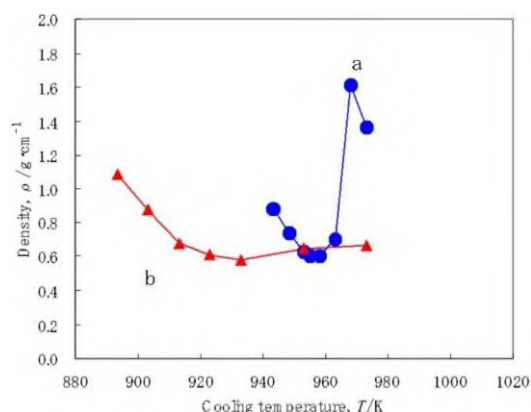
арқылы газ бөліну процесін басқаруға және көбік шөгуін төмендетуге болатындығы дәлелденді. Сонымен қатар көбік құрылымының қалыптасу механизмі мен жасушалардың байланысу ерекшеліктері түсіндіріліп, карбонатты көбік түзушілерді қолданудың технологиялық тиімділігі ғылыми тұрғыдан негізделді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Доломит көмегімен өндірілген көбіктің жасушалық құрылымдары карбонатты көбік түзетін агенттермен туындаған көбік шөгуін нақтылау үшін байқалды. Массасы 2,0% доломитті қолдану арқылы өндірілген көбіктердің салқындату температурасы мен тығыздығы 2(a) суретте көрсетілген. Көбік 943 К-де 0,88 тығыздыққа дейін кеңейді. Содан кейін ол 958 К-де 0,60 тығыздықта максималды кеңеюді көрсетті. Осыдан кейін ол 968 К-де 1,61 тығыздықты көрсетуге дейін кішірейді. Көбіктер және олардың көлденең қимасы 39-суретте және К39-да көрсетілген. жасуша құрылымдары. 963 К-де көбік кішірейіп, оның жасушаларының саны азайды.

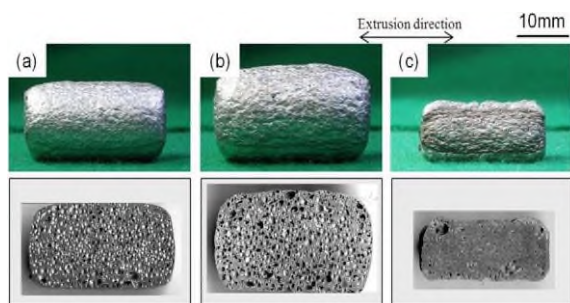


Сурет 1 – Трансмиссиялық рентгендік жүйемен бақыланатын 1,2 массалық% доломитпен өндірілген көбіктер: (a) іске қосу; (b) 863 К; (c) 873 К; (r) 973 К және (e) 1003 К

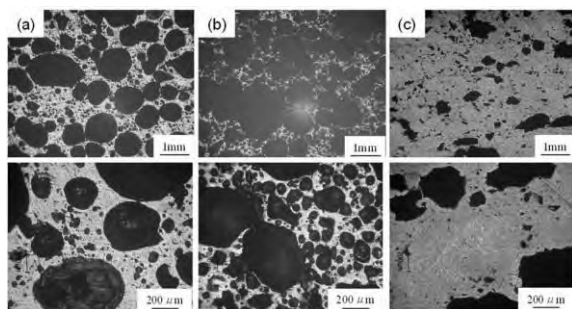


Сурет 2 – Көбіктердің тығыздығы: (a) 2,0 масса% доломит және (б) 2,0 масса% доломит және 1,0 масса% MgCO_3

Көбіктердің жасушалық құрылымдары оптикалық микроскопия арқылы бақыланды, оның нәтижелері 4-суретте көрсетілген. Көбіктерде 943 және 958 К температурада әртүрлі өлшемдегі екі ұяшық байқалды. Өлшемі 1 мм-ге жуық ірі жасушалар AlSiCu ұнтағының бетіне сіңген су буының әсерінен индукцияланды және майда жасушалардың мөлшері 7 мкм -ге жуық болды. доломиттің ыдырауымен [11]. 943 К-де негізінен ірі жасушалар байқалды. 958 К-де майда жасушалардың саны айтарлықтай өсті. Дөрекі жасушалар бір-бірімен жұқа жасушалар арқылы байланысқан. Жасушалар ашық жасуша құрылымы ретінде пішінін сақтап қалды. Карбонаттар көбікінде тұрақты тотыққан жасуша қабырғалары бар [2,3,4,5], бұл жасушалардың бірігуіне жол бермейді. 968 К-де жасушалардың көпшілігі жоғалып кетті.



Сурет 3 – Массасы 2,0% доломит пен олардың көлденең қимасы бойынша алынған көбіктер: (а) 943 К, $\rho: 0,88\text{ г/см}^3$, (б) 958 К, $\rho: 0,60\text{ г/см}^3$ және (в) 968 К, $\rho: 1,61\text{ г/см}^3$.



Сурет 4 – Массасы 2,0% доломитпен өндірілген көбіктердің микроқұрылымдары, төменгі суреттер жоғарғы қатардағы үлкейтілген кескіндер: (а) 943 К, $\rho: 0,88\text{ г/см}^3$; (б) 958 К, $\rho: 0,60\text{ г/см}^3$ және (с) 968 К, $\rho: 1,61\text{ г/см}^3$

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижелері алюминий көбігінің құрылымы мен тұрақтылығы көбік түзуші ретінде қолданылған карбонаттардың түріне және олардың енгізілу тәсіліне тәуелді екенін көрсетті. Доломитті жеке қолданған жағдайда көбік 958 К температурада ең жоғары ұлғаюға жеткенімен, температураның әрі қарай жоғарылауымен

жасушалардың өзара бірігуі нәтижесінде газдың сыртқа шығуы байқалып, көбік айтарлықтай шөккен. Тығыздықтың $0,60\text{ г/см}^3$ -тен $1,61\text{ г/см}^3$ -ке дейін артуы көбік көлемінің едәуір төмендегенін көрсетті.

Микроскопиялық талдау нәтижелері 943-958 К температура аралығында ірі және ұсақ жасушалардың қатар түзілетінін көрсетті. Ұсақ жасушалардың түзілуі доломиттің термиялық ыдырауы нәтижесінде бөлінетін көмірқышқыл газымен байланысты болса, ірі жасушалар алюминий ұнтағының бетінде адсорбцияланған ылғалдың булануынан пайда болған. Максималды кеңею кезінде жасушалар өзара жұқа қабырғалар арқылы байланысқанымен, температура жоғарылаған сайын олардың көпшілігі жойылып, көбік құрылымы бұзылған.

Доломит пен магний карбонатын бірге пайдалану көбік құрылымының тұрақтылығын арттырғаны байқалды. Магний карбонатының жоғары температурада ыдырауы нәтижесінде газдың кезең-кезеңімен бөлінуі жасушалардың бір мезгілде бірігіп кетуін азайтып, көбік құрылымының ұзақ уақыт сақталуына ықпал етті. Нәтижесінде көбік шөгуі төмендеп, тығыздық шамамен $0,66\text{--}0,87\text{ г/см}^3$ аралығында тұрақтанды.

Алынған нәтижелер әдебиетте сипатталған мәліметтермен сәйкес келеді және карбонатты көбік түзушілерді дұрыс таңдау арқылы TiH_2 қолданбай-ақ біркелкі жасушалы алюминий көбігін алуға болатынын көрсетеді. Карбонаттарды бірнеше рет енгізу тәсілі газ түзілу қарқындылығын тиімді реттеп, көбік құрылымының бұзылуын азайтады. Бұл тәсіл өндірістік жағдайда жеңіл, біркелкі кеуекті және жоғары механикалық қасиеттерге ие алюминий көбіктерін алуға мүмкіндік береді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл зерттеуде көбіктердің карбонатпен шөгуі және оның алдын алу әдісі талқыланды. Жасуша құрылымдарын бақылау нәтижесінде әртүрлі учаскелерде жасуша түзілуі жасуша байланыстарынан туындаған жиырылудың алдын алуда тиімді деп есептелді. Шөгудің алдын алуда 2,0 массалық% доломит пен 1,0 массалық% магний карбонатын бірнеше рет қосу тиімді екендігі тексерілді. Бірнеше рет қосылатын көбік бір доломитке қарағанда $0,87$ тығыздықтағы жасуша құрылымына ие, бірақ біртекті жасуша құрылымын төменірек тығыздықта ұстауда проблемалар бар.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ.

Авторлар осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ.

Авторлар осы зерттеуді орындау кезінде сыртқы қаржыландырудың жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС.

Автор қолжазбаны мұқият қарастырып, мақаланың мазмұны мен сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік берген құнды ескертулері мен ұсынымдары үшін журналдың редакторы мен рецензентіне шынайы алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға

тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (**CC BY-SA 4.0**) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Baumeister, J. Key метал денелерін өндіру әдісі. DE4018360, 8 6 1990.
- [2] Nakamura, T.; Gnyloskurenko, S.V.; Sakamoto, K.; Byakova, A.V.; Ishikawa, R. A, “New Foaming Agent for Production of Metallic Foam,” *Materials Transactions*. 2002, 43(5), 1191–1196.
- [3] Gergely, V.; Curran, D.C.; Clyne, T.W. “The FOAMCARP Process: Foaming of Aluminium MMCs by the Reaction between Boron Carbide and Aluminium.” *Composites Science and Technology*. 2003, 63(16), 2301–2310.
- [4] Nisa, S.U.; Pandey, S.; Pandey, P.M. “A Review of the Compressive Properties of Closed-Cell Aluminum Metal Foams.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023, 237(2), 531–545. <https://doi.org/10.1177/09544089221112291>
- [5] Zhang, J.; An, Y.; Ma, H. “Research Progress in the Preparation of Aluminum Foam Composite Structures.” *Metals*. 2022, 12(12), 2047. <https://doi.org/10.3390/met12122047>
- [6] Byakova, A.; Gnyloskurenko, S.; Vlasov, A.; Yevych, Y.; Semenov, N. “The Mechanical Performance of Aluminum Foam Fabricated by Melt Processing with Different Foaming Agents: A Comparative Analysis.” *Metals*. 2022, 12(8), 1384. <https://doi.org/10.3390/met12081384>
- [7] Madgule, M.; Sreenivasa, C.G.; Borgaonkar, A.V. “Aluminium Metal Foam Production Methods, Properties and Applications: A Review.” *Materials Today: Proceedings*. 2023, 77, 673–679. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.287>
- [8] Ji, C.; Huang, H.; Wang, T.; Huang, Q. “Recent Advances and Future Trends in Processing Methods and Characterization Technologies of Aluminum Foam Composite Structures: A Review.” *Journal of Manufacturing Processes*. 2023, 93, 116–152. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.03.015>
- [9] Rodinger, T.; Ćorić, D.; Alar, Ž. “The Influence of Foaming Agents on Aluminium Foam Cell Morphology.” *Metals*. 2023, 13(6), 1146. <https://doi.org/10.3390/met13061146>

REFERENCES

- [1] Baumeister, J. Key метал денелерін өндіру әдісі. DE4018360, 8 6 1990.
- [2] Nakamura, T.; Gnyloskurenko, S.V.; Sakamoto, K.; Byakova, A.V.; Ishikawa, R. A, “New Foaming Agent for Production of Metallic Foam,” *Materials Transactions*. 2002, 43(5), 1191–1196.
- [3] Gergely, V.; Curran, D.C.; Clyne, T.W. “The FOAMCARP Process: Foaming of Aluminium MMCs by the Reaction between Boron Carbide and Aluminium.” *Composites Science and Technology*. 2003, 63(16), 2301–2310.
- [4] Nisa, S.U.; Pandey, S.; Pandey, P.M. “A Review of the Compressive Properties of Closed-Cell Aluminum Metal Foams.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023, 237(2), 531–545. <https://doi.org/10.1177/09544089221112291>
- [5] Zhang, J.; An, Y.; Ma, H. “Research Progress in the Preparation of Aluminum Foam Composite Structures.” *Metals*. 2022, 12(12), 2047. <https://doi.org/10.3390/met12122047>
- [6] Byakova, A.; Gnyloskurenko, S.; Vlasov, A.; Yevych, Y.; Semenov, N. “The Mechanical Performance of Aluminum Foam Fabricated by Melt Processing with Different Foaming Agents: A Comparative Analysis.” *Metals*. 2022, 12(8), 1384. <https://doi.org/10.3390/met12081384>
- [7] Madgule, M.; Sreenivasa, C.G.; Borgaonkar, A.V. “Aluminium Metal Foam Production Methods, Properties and Applications: A Review.” *Materials Today: Proceedings*. 2023, 77, 673–679. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.287>
- [8] Ji, C.; Huang, H.; Wang, T.; Huang, Q. “Recent Advances and Future Trends in Processing Methods and Characterization Technologies of Aluminum Foam Composite Structures: A Review.” *Journal of Manufacturing Processes*. 2023, 93, 116–152. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.03.015>
- [9] Rodinger, T.; Ćorić, D.; Alar, Ž. “The Influence of Foaming Agents on Aluminium Foam Cell Morphology.” *Metals*. 2023, 13(6), 1146. <https://doi.org/10.3390/met13061146>

Металлургия, технологии новых материалов

DOI: <https://doi.org/10.53002/090>

DEVELOPMENT OF NEW SHAPE MEMORY ALLOYS FOR THE AVIATION INDUSTRY

Dalimaeva Ya.S.

Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus
*Corresponding author email: sharyana11390@gmail.com

Author information:

Dalimaeva Yanina Sergeevna, Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus, e-mail: sharyana11390@gmail.com

Abstract — This article discusses new shape memory alloys (SMA) designed for the aviation industry. The main characteristics of such materials, their advantages and possible applications in aviation are given. The methods of developing new alloys, including the use of modern computational methods and experimental approaches, are described. The results of a study of the properties of new alloys are presented, and the prospects for their introduction into the design of modern aircraft are discussed.

Keywords — shape memory alloys, aviation industry, memory effect materials, smart materials, structural materials, deformation memory, aviation technologists.

АВИАЦИЯ ӨНЕРКӘСІБІ ҮШІН ЖАҢА ЖАД ФОРМАСЫ ҚОРЫТПАЛАРЫН ӘЗІРЛЕУ

Далимаева Я.С.

Витебск мемлекеттік технологиялық университеті, Витебск қ., Беларусь
*Корреспондент автор e-mail: sharyana11390@gmail.com

Авторлар туралы ақпарат:

Далимаева Янина Сергеевна, Витебск мемлекеттік технологиялық университеті, Витебск қ., Беларусь, e-mail: sharyana11390@gmail.com

Аңдатпа — Бұл мақалада авиация өнеркәсібіне арналған жаңа пішінді жад қорытпалары (SMA) қарастырылады. Мұндай материалдардың негізгі сипаттамалары, олардың артықшылықтары және авиацияда қолданылуы мүмкін. Жаңа қорытпаларды әзірлеу әдістері, соның ішінде заманауи есептеу әдістері мен эксперименттік тәсілдерді қолдану сипатталған. Жаңа қорытпалардың қасиеттерін зерттеу нәтижелері ұсынылған, сондай-ақ оларды заманауи әуе кемелерінің дизайнына енгізу перспективалары талқыланады.

Түйін сөздер — пішін жады қорытпалары, авиация өнеркәсібі, жад эффектісі материалдары, ақылды материалдар, құрылымдық материалдар, деформациялық жады, авиациялық технологтар.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Далимаева Я.С.

Витебский государственный технологический университет, г. Витебск, Беларусь
*Корреспондент автор e-mail: sharyana11390@gmail.com

Информация об авторах:

Далимаева Янина Сергеевна, Витебский государственный технологический университет, г. Витебск, Беларусь, e-mail: sharyana11390@gmail.com

Аннотация — В данной статье рассматриваются новые сплавы с памятью формы (SMA), предназначенные для авиационной промышленности. Приведены основные характеристики таких материалов, их преимущества и возможные области применения в авиации. Описаны методики разработки новых сплавов, включая использование современных вычислительных методов и экспериментальных подходов. Представлены результаты исследования свойств новых сплавов, а также обсуждаются перспективы их внедрения в конструкцию современных воздушных судов.

Ключевые слова — сплавы с памятью формы, авиационная промышленность, материалы с эффектом памяти, умные материалы, конструкционные материалы, деформационная память, авиационные технологии.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В работе выполнен анализ современных направлений разработки сплавов с памятью формы для авиационной промышленности. Рассмотрены основные системы сплавов (NiTi, CuAlNi, Fe-SMA и высокоэнтропийные SMA), методы регулирования их функциональных свойств посредством легирования, термической обработки, интенсивной пластической деформации и аддитивных технологий. Проведен сравнительный анализ влияния химического состава и технологий изготовления на эффект памяти формы, сверхупругость, циклическую долговечность и диапазон рабочих температур. Показано, что современные подходы к разработке SMA позволяют повысить надежность и ресурс авиационных конструкций, снизить их массу и обеспечить создание интеллектуальных адаптивных систем.

ВВЕДЕНИЕ

Авиационная промышленность постоянно требует улучшения эксплуатационных характеристик материалов, используемых в конструкции воздушных судов [1]. Сплавы с памятью формы (Shape Memory Alloys, SMA) представляют собой инновационные материалы, способные изменять свою форму при изменении температуры или под действием механической нагрузки и возвращаться в первоначальное состояние после снятия внешнего воздействия. Их применение в авиации открывает новые возможности для повышения эффективности и безопасности полетов, позволяя разрабатывать адаптивные конструкции и системы управления [2].

Одним из наиболее известных и широко используемых сплавов с памятью формы является сплав на основе никеля и титана (NiTi, также известный как нитинол). Он характеризуется высокой коррозионной стойкостью, значительными деформациями восстановления и относительно стабильными рабочими температурами, что делает его перспективным для применения в авиации и аэрокосмической технике. Кроме нитинола, активно исследуются сплавы на основе меди (Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al) и

железа (Fe-Mn-Si), которые могут найти применение в тех случаях, где необходимы более низкая стоимость или иные эксплуатационные свойства [3,4].

Пробел в исследованиях. Несмотря на значительный прогресс в разработке сплавов с памятью формы, большинство исследований посвящено традиционным сплавам NiTi и их применению в медицине и общем машиностроении. Недостаточно изучены вопросы создания новых авиационных SMA с расширенным диапазоном рабочих температур, повышенной усталостной долговечностью и стабильностью функциональных свойств при длительном циклическом нагружении. Кроме того, ограниченное число исследований посвящено использованию высокоэнтропийных сплавов с памятью формы, аддитивных технологий и современных методов компьютерного моделирования для проектирования материалов нового поколения. Отсутствует комплексный анализ перспектив применения этих разработок в авиационных интеллектуальных конструкциях.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в комплексном анализе современных направлений развития сплавов с памятью формы для авиационной промышленности с учетом публикаций последних лет. Выполнено сравнение традиционных и перспективных систем SMA, включая высокоэнтропийные и аддитивно изготовленные материалы. Обобщены современные подходы к управлению эффектом памяти формы, сверхупругостью, механическими свойствами и циклической долговечностью посредством оптимизации химического состава и технологий обработки. На основании проведенного анализа определены наиболее перспективные направления дальнейших исследований, связанные с созданием высокотемпературных и высокоресурсных SMA для интеллектуальных авиационных конструкций.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для разработки новых сплавов с памятью формы применяются различные подходы,

начиная с теоретического моделирования, основанного на методах квантовой механики и молекулярной динамики, которые позволяют прогнозировать свойства будущих составов и определять оптимальный химический состав и фазовый переход, необходимый для заданных рабочих температур. На следующем этапе проводится экспериментальный синтез пробных образцов, включающий разнообразные легирующие элементы, такие как никель-титан, медь-алюминий-никель и железо-марганец-кремний, с целью найти баланс между механическими и функциональными свойствами. Затем эти образцы подвергаются испытаниям на деформацию, усталостную долговечность и термочувствительность, что даёт возможность определить циклическую стабильность и эффективность восстановления формы. Наконец, детальный анализ структуры с помощью рентгеноструктурного анализа и микроскопических методов позволяет выявить особенности фазовых превращений, механизмы деформации и связь между полученной структурой и эксплуатационными характеристиками, что служит основой для дальнейшей оптимизации состава и методов обработки.

Методы разработки новых сплавов с памятью формы [5]:

1. Оптимизация химического состава. Подбор соответствующих легирующих элементов (например, добавление меди, ниобия, цинка или алюминия) позволяет регулировать температуру начала и конца мартенситного превращения (As, Af, Ms, Mf), что определяет диапазон рабочих температур SMA.

2. Термическая обработка. Закалка и старение при определенных температурах обеспечивают формирование необходимых фазовых соотношений, влияющих на характер и стабильность мартенситного превращения. Контроль режимов закалки и отпуска позволяет повысить прочность, пластичность и циклическую стойкость сплавов.

3. Интенсивная пластическая деформация. Применение методов вроде горячей прокатки, прессования или равноканального уголкового прессования (ECAP) способствует получению ультрамелкозернистой структуры, что может улучшить механические свойства, скорость отклика и стабильность обратимых деформаций.

4. Комбинирование материалов и создание композиционных SMA. Разработка многослойных или композитных систем, включающих SMA и другие высокопрочные или тугоплавкие сплавы, помогает добиться сочетания уникальных функциональных свойств с повышенной износостойкостью, коррозионной стойкостью и жаропрочностью.

Таблица 1 – Химический состав исследованных сплавов

Обозначение сплава	Ni (wt.%)	Ti (wt.%)	Cu (wt.%)	Al (wt.%)	Fe (wt.%)	Примечания
SMA-1	55.0	45.0	–	–	–	Классический NiTi сплав
SMA-2	53.5	45.0	1.5	–	–	Модифицированный NiTi
SMA-3	–	–	14.0	4.5	81.5	CuAlNiFe-сплав
SMA-4	–	–	–	–	–	(Пример для добавления других элементов)

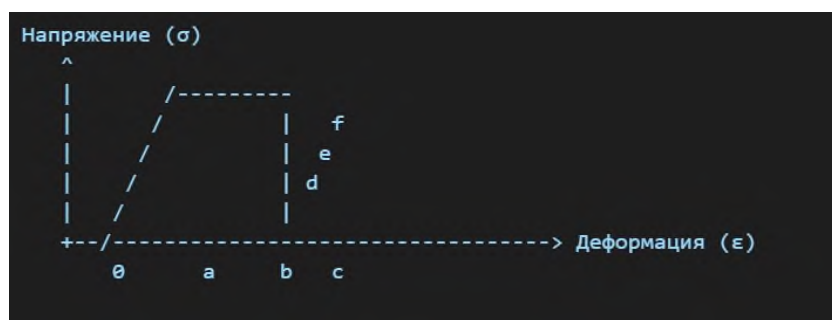


Рисунок 1 – Напряжение - деформация (Stress-Strain) при разных температурах

Характеристики и преимущества сплавов с памятью формы:

1. Способность к обратимой деформации. SMA могут восстанавливать значительные деформации (до 8-10% и более) после термоциклирования или снятия нагрузки, что делает их эффективными в качестве актуаторов и элементов виброзащиты.

2. Высокая удельная прочность. Некоторые SMA обладают лучшим соотношением прочности к массе, чем традиционные металлы, что особенно актуально для авиационных конструкций.

3. Коррозионная стойкость. Многие сплавы (особенно на основе NiTi) незначительно подвержены коррозии, сохраняя рабочие характеристики в агрессивных средах.

4. Функциональная стабильность. При правильном выборе химического состава и оптимальных режимах термообработки SMA сохраняют свои свойства в широком диапазоне циклов нагружения, что важно для длительной эксплуатации на борту воздушных судов.

1) a–b: упругий участок

2) b–c: переход к пластической деформации

3) d–e–f: восстановление формы при нагреве

Кривые дают представление о том, при каком напряжении начинает происходить смещение мартенситных пластин и какая остаточная деформация возникает после разгрузки. При разных температурах будет наблюдаться различная форма графика.

Перспективы внедрения и области применения:

1. Адаптивные аэродинамические поверхности. Использование SMA-актуаторов для изменения формы крыла или закрылков самолета во время полета открывает возможности для оптимизации аэродинамики и снижения расхода топлива.

2. Системы виброзащиты и демпфирования. Сплавы с памятью формы могут использоваться для уменьшения вибраций в движущихся узлах и механизмах, повышая комфорт и срок службы оборудования.

3. Антиобледенительные системы. SMA могут менять форму и генерировать тепло при прохождении фазы обратного превращения, что потенциально позволяет эффективно бороться с образованием льда на критических элементах воздушного судна.

4. Ремонт и самоисцеление конструкций. Благодаря свойству обратимого деформирования SMA способны частично восстанавливать свою форму при возникновении деформаций и трещин, снижая риск катастрофических разрушений.

Таким образом, сплавы с памятью формы представляют собой инновационное направление в области материаловедения и авиастроения, обладающее огромным потенциалом для улучшения ключевых показателей эффективности и безопасности воздушных судов. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на расширении температурного диапазона работы, повышении циклической долговечности и устойчивости к экстремальным условиям эксплуатации, а также на интеграции SMA в интеллектуальные системы управления, что позволит создавать еще более совершенные авиационные конструкции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанные сплавы показали улучшенные механические свойства по сравнению с традиционными SMA, что открывает более широкие перспективы для их использования в авиационной отрасли. Повышенная устойчивость к циклическим нагрузкам обеспечивает длительный ресурс эксплуатации конструктивных элементов, а расширенный диапазон рабочих температур делает возможным их применение даже в экстремальных условиях полета.

Оптимизированные характеристики памяти формы гарантируют точное восстановление геометрии деталей, что напрямую влияет на безопасность и эффективность работы самолетных систем. Включение таких сплавов в конструкцию воздушных судов позволяет снизить массу, повысить топливную эффективность и улучшить аэродинамические свойства, способствуя развитию более совершенных и экономичных летательных аппаратов [6].

ВЫВОДЫ

Разработка новых сплавов с памятью формы для авиационной промышленности является перспективным направлением в области материаловедения. Улучшенные характеристики таких материалов открывают широкие возможности для их применения в различных авиационных системах, от адаптивных аэродинамических поверхностей до активных демпфирующих конструкций, позволяя повысить безопасность и эффективность полетов.

Важной задачей дальнейших исследований остается оптимизация состава сплавов с учетом требуемых рабочих температур, механических нагрузок и условий эксплуатации. В этом направлении активно применяются как классические металлургические подходы (легирование, термическая и механическая

обработка), так и современные компьютерные методы моделирования, позволяющие прогнозировать фазовые переходы и механические свойства SMA на атомарном уровне.

Кроме того, совершенствование технологий производства, включая аддитивные методы и различные виды интенсивной пластической деформации, поможет добиться более равномерного распределения легирующих элементов и улучшенной микроструктуры. Это, в свою очередь, обеспечит высокую циклическую стойкость и точность восстановления формы в длительных эксплуатационных циклах.

Интеграция сплавов с памятью формы в авиастроении уже ведется в рамках исследований по созданию умных конструкций, способных реагировать на изменения условий полета в реальном времени. Дальнейшее развитие этого направления, включая расширение ресурсных испытаний, разработку стандартов и методов контроля качества, позволит создавать более экономичные и надежные авиационные системы, повышая конкурентоспособность отрасли и открывая новые горизонты для инновационных инженерных решений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что в ходе выполнения данного исследования и публикации статьи нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность редактору и рецензенту журнала за внимательное рассмотрение рукописи, ценные замечания и рекомендации, которые позволили существенно улучшить содержание и качество статьи.

Авторское право © 2025 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения той же лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Rajput, G.S.; Vora, J.; Prajapati, P.; Chaudhari, R. “Areas of Recent Developments for Shape Memory Alloy: A Review.” *Materials Today: Proceedings*. 2022, 62(13), 7194–7198. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.407>
- [2] Mohammadgholipour, A.; Billah, A.H.M. “Mechanical Properties and Constitutive Models of Shape Memory Alloy for Structural Engineering: A Review.” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2023, 34(20), 2335–2359. <https://doi.org/10.1177/1045389X231185458>
- [3] Li, Y.; Zhang, H.; Wang, X.; et al. “Development of High-Entropy Shape-Memory Alloys: A Review.” *Metals*. 2023, 13(7), 1279. <https://doi.org/10.3390/met13071279>
- [4] Yang, Y.-X.; Gao, W.-H.; Sun, B.; Fu, Y.-D.; Meng, X.-L. “Recent Advances on Additive Manufactured Shape Memory Alloys.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2024, 34(7), 2045–2073. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(24\)66525-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(24)66525-8)
- [5] Mañosa, L.; Planes, A. “Elastocaloric Effect in Shape-Memory Alloys.” *Shape Memory and Superelasticity*. 2024, 10, 89–98. <https://doi.org/10.1007/s40830-024-00477-x>
- [6] De Simone, A.; Cardone, D.; “Palermo, M.; et al. Shape Memory Alloys for Self-Centering Seismic Applications: A Review on Recent Advancements.” *Machines*. 2024, 12(9), 628. <https://doi.org/10.3390/machines12090628>

REFERENCES

- [1] Rajput, G.S.; Vora, J.; Prajapati, P.; Chaudhari, R. “Areas of Recent Developments for Shape Memory Alloy: A Review.” *Materials Today: Proceedings*. 2022, 62(13), 7194–7198. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.407>
- [2] Mohammadgholipour, A.; Billah, A.H.M. “Mechanical Properties and Constitutive Models of Shape Memory Alloy for Structural Engineering: A Review.” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2023, 34(20), 2335–2359. <https://doi.org/10.1177/1045389X231185458>
- [3] Li, Y.; Zhang, H.; Wang, X.; et al. “Development of High-Entropy Shape-Memory Alloys: A Review.” *Metals*. 2023, 13(7), 1279. <https://doi.org/10.3390/met13071279>

-
- [4] Yang, Y.-X.; Gao, W.-H.; Sun, B.; Fu, Y.-D.; Meng, X.-L. “Recent Advances on Additive Manufactured Shape Memory Alloys.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2024, 34(7), 2045–2073. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(24\)66525-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(24)66525-8)
- [5] Mañosa, L.; Planes, A. “Elastocaloric Effect in Shape-Memory Alloys.” *Shape Memory and Superelasticity*. 2024, 10, 89–98. <https://doi.org/10.1007/s40830-024-00477-x>
- [6] De Simone, A.; Cardone, D.; “Palermo, M.; et al. Shape Memory Alloys for Self-Centering Seismic Applications: A Review on Recent Advancements.” *Machines*. 2024, 12(9), 628. <https://doi.org/10.3390/machines12090628>

Металлургия, жаңа материалдар технологиясы

DOI: <https://doi.org/10.53002/091>

FOAMING OF THE METAL UNDER STUDY USING X-RAY FLUOROSCOPY

Abzhanova L.K.

Almaty University of energy and Communications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan

**Corresponding author e-mail: l.abzhanova@aes.kz*

Author information:

Abzhanova Laulasyn Kasylganovna, Almaty University of energy and Communications named after G. Daukeev, Aktau, Kazakhstan, e-mail: l.abzhanova@aes.kz

Abstract — Metal foam is produced using titanium hydride as a foaming agent. Carbonates produce aluminum foam with a thin and homogeneous cell structure. However, foams produced using carbonates show a pronounced shrinkage, which is clearly different from the one in which titanium hydride is used. For practical use, it is very important to clarify the shrinkage of the foam and establish a method of its prevention. In this study, cell structures were observed to study the shrinkage of aluminum foam produced using carbonates. Foam cells are associated with each other with maximum expansion produced using dolomite as a foaming agent. It was believed that the foaming gas was expelled to the outside through the connected cells. Cell formation at different sites has been thought to be effective in preventing contractions caused by cell bonding. Several inclusions of dolomite and magnesium carbonate with different decomposition temperatures were used. The foam in the case with many inclusions maintained a density of 0.66 to 973 K, when the foam produced with dolomite shrank. Repeated addition of carbonates has been tested to be effective in preventing shrinkage.

Keywords — aluminum foam, carbonates, shrinkage, materials science, cell structure, dolomite, magnesium carbonate, gas formation, thermal decomposition, titanium hydride, expansion, density, microstructure, foaming mechanism, aluminum alloy, structural materials, lightweight materials, mechanical properties.

РЕНТГЕН РЕНТГЕНОСКОПИЯСЫ АРҚЫЛЫ ЗЕРТТЕЛГЕН МЕТАЛДЫҢ КӨБІКТЕНУІ

Абжанова Л.К.

Ғ.Дәукеев атындағы Алматы Энергетикалық және Байланыс Университеті, Алматы, Қазақстан

**Автор-корреспондент e-mail: l.abzhanova@aes.kz*

Автор туралы ақпарат:

Абжанова Лауласын Касылгановна, Ғ.Дәукеев атындағы Алматы Энергетикалық және Байланыс Университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: l.abzhanova@aes.kz

Аңдатпа — Металл көбік түзілуін және эволюциясын in-situ зерттеу үшін рентгендік рентгеноскопияны қолдану қарастырылады. Таңдалған нәтижелер металдың көбіктенуі үшін диагностикалық құрал ретінде рентгендік рентгеноскопияның күшін көрсетеді. Көбік нуклеациясының және эволюциясының, дренаждың дамуының, термиялық байланыс мәселелерінің, зеңді толтырудың, жасуша қабырғасының жарылуының және т.б. сапалы талдаулар берілген. Бұған қоса, біріктіру жылдамдығын, тығыздықты бөлуді және т.б. беретін көбік кеңеюінің суреттер сериясына негізделген сандық талдау арнайы бағдарламалық құрал арқылы орындалады. Бұл әдістер металдардың көбіктену әрекетін түсінуге және көбік беру әдістерін де, көбік сапасын да жақсартуға көмектеседі.

Түйін сөздер — металл көбік, рентген, рентгеноскопия, синхротрондық сәулелену.

ВСПЕНИВАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО МЕТАЛЛА С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОЙ РЕНТГЕНОСКОПИИ

Абжанова Л.К.

Алматинский университет энергетики и связи им.Г. Даукеева, Алматы, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: l.abzhanova@aes.kz*

Информация об авторе:

Абжанова Лауласын Касылгановна, Алматинский университет энергетики и связи им.Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, e-mail: l.abzhanova@aes.kz

Аннотация — Для изучения образования и эволюции металлической пены рассматривается использование рентгеновской рентгеноскопии. Выбранные результаты показывают силу рентгеновской рентгеноскопии как диагностического инструмента для вспенивания металла. Представлены качественные анализы зарождения и эволюции пены, развития дренажа, проблем с термической связью, заполнения плесени, разрыва клеточной стенки и многого другого. Кроме того, количественный анализ, основанный на серии изображений расширения пены, обеспечивающих скорость слияния, распределение плотности и т. д., выполняется с помощью специального программного обеспечения. Эти методы помогают понять пенообразующее поведение металлов и улучшить как методы пенообразования, так и качество пены.

Ключевые слова — металлическая пена, рентген, рентгеноскопия, синхротронное излучение.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында металл көбігінің түзілуі мен эволюциясын нақты уақыт режимінде бақылау үшін рентгендік рентгеноскопия әдісінің мүмкіндіктері талданды. Синхротрондық рентгендік сәулеленуді қолдану арқылы көбік нуклеациясы, көпіршіктердің өсуі, бірігуі, дренаждың дамуы және жасуша қабырғаларының бұзылу процестері жоғары кеңістіктік және уақыттық ажыратымдылықпен бақыланды. Сандық кескіндерді өңдеу нәтижесінде көбіктің кеңею кинетикасы, тығыздықтың таралуы және көпіршіктердің бірігу жылдамдығы анықталды. Алынған нәтижелер рентгендік рентгеноскопияның металл көбіктерінің құрылымдық қалыптасу механизмдерін зерттеудегі тиімді диагностикалық әдіс екенін көрсетті.

КІРІСПЕ

Қатты металдан жасалған көбіктер әр түрлі қолдану үшін перспективалы материалдар болып табылады [1,2]. Олардың құрылымы барлық көбік сияқты күрделі болғандықтан, оларды зерттеу қиын. Металл көбік түзілуін, эволюциясын және тұрақтануын түсіну үшін біз оларды сұйық күйде қатайғанға дейін және қату кезінде зерттеуіміз керек, өйткені бұл кезеңдегі процестер қатты көбіктің соңғы құрылымы мен қасиеттеріне әсер етеді [3,4].

Фотондарға немесе нейтрондарға негізделген радиографиялық бейнелеу әдістері үлгілердің ішкі құрылымын байқауға мүмкіндік береді [5]. Қолайлы уақыт рұқсатымен нақты уақыт

режимінде жазылған рентгенографиялар сериясы рентгеноскопия деп аталады. Көбіктерде рентгеноскопия кеңею, макроскопиялық кеуектер құрылымының эволюциясы, тығыздықтың таралуы, бірігу оқиғалары және т.б. сияқты in-situ әртүрлі процестерді зерттеуге мүмкіндік береді. Біз рентгендік рентгеноскопияға назар аударамыз, өйткені бұл әдіс ең жақсы кеңістіктік және уақытша рұқсаттарды және металдық матрица мен газ-контраст арасындағы оңтайлы контрастты ұсынады. Біз 2000 жылы алғашқы хабарланған әрекеттерден бастап соңғы әзірлемелерге дейін металдың көбіктенуін бақылау үшін рентгендік бейнелеудің эволюциясын ұсынады [6].

Зерттеудің маңыздылығы. Металл көбіктері төмен тығыздығы, жоғары меншікті беріктігі және энергияны тиімді жұту қабілетінің арқасында авиацияда, автомобиль жасауда, құрылыс пен энергетикада кеңінен қолданылатын перспективалы материалдардың бірі болып табылады. Алайда олардың құрылымы көбіктену процесінде қалыптасатындықтан, көбік түзілу механизмдерін дәстүрлі әдістермен толық зерттеу мүмкін емес. Осыған байланысты рентгендік рентгеноскопияны пайдалану металл көбігінің түзілуін нақты уақыт режимінде бақылауға, көпіршіктердің пайда болуы мен эволюциясын, жасушалардың бірігуін және дренаж процестерін анықтауға мүмкіндік береді. Бұл көбік түзілу технологияларын жетілдіруге, материал құрылымының біркелкілігін арттыруға және дайын өнімнің механикалық қасиеттерін жақсартуға ғылыми негіз қалайды.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы металл көбігінің қалыптасу және эволюция процестерін жоғары жылдамдықты синхротрондық рентгендік рентгеноскопия көмегімен кешенді талдауда жатыр. Көбіктену процесінің әртүрлі кезеңдерінде көпіршіктердің нуклеациясы, өсуі, бірігуі және жасуша қабырғаларының бұзылуы жоғары дәлдікпен бақыланып, олардың уақыт бойынша өзгеру заңдылықтары анықталды. Сонымен қатар рентгендік бейнелерді сандық өңдеу арқылы көбіктің кеңею жылдамдығы, тығыздықтың таралуы және құрылымдық өзгерістер бағаланып, рентгендік рентгеноскопияның металл көбіктерінің қалыптасу механизмдерін зерттеудегі диагностикалық мүмкіндіктері ғылыми тұрғыдан негізделді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Металл көбігінің түзілуі мен эволюциясын in-situ бақылау үшін рентгендік рентгеноскопия әдісі қолданылды. Зерттеу бірнеше кезеңнен тұрды.

Бірінші кезеңде тәжірибеге арналған металл преформалары дайындалды. Алдын ала белгілі құрамдас бөліктері бар ұнтақ немесе суспензия негізіндегі преформалар белгілі бір температуралық режимде көбіктенуге қабілетті болуы тиіс. Үлгілердің геометриясы, массасы және бастапқы тығыздығы кейінгі сандық талдау үшін тіркелді.

Екінші кезеңде рентгендік рентгеноскопияға арналған эксперименттік құрылым жинақталды. Үлгілер жоғары температуралы пешке немесе жергілікті қыздыру модуліне орналастырылып, синхротрондық рентгендік сәулемен қатарластыра бағытталды. Радиографиялық түсірілім үшін CMOS немесе sCMOS типті жылдам детекторлар, сондай-ақ LuAG:Ce немесе YAG:Ce сцинтилляторлары қолданылды. Эксперимент рентген сәулесінің энергиясын, кадр жиілігін және көру өрісін оңтайландыру арқылы жүргізілді. Экспозиция уақыты процестің динамикасына байланысты 1 мкс–10 мс аралығында таңдалды.

Үшінші кезеңде нақты уақыт режимінде түсірілген рентгенографиялық бейнелер сериясы жинақталды. Бейнелерден көбік нуклеациясы, көпіршіктердің өсуі, бірігуі, дренаждың басталуы мен дамуы, жасуша қабырғаларының локалды бұзылуы сияқты құбылыстар тіркелді. Сонымен бірге көлемдік өзгерістер мен көбіктің кеңею кинетикасын көрсететін макропараметрлер бақыланды.

Төртінші кезеңде алынған деректер сандық өңдеуден өтті. Арнайы бағдарламалық қамтамасыз ету арқылы көпіршіктердің саны,

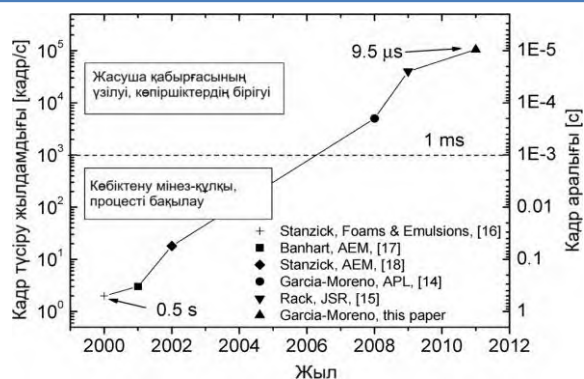
олардың орташа диаметрі, көлемдік тығыздықтың таралуы, бірігу оқиғаларының жиілігі және кеңею жылдамдығы сияқты көрсеткіштер анықталды. Уақыт қатарлары негізінде процестердің кинетикалық сипаттамалары есептеліп, металл көбігінің қалыптасу механизмдері талданды.

Осы кешенді әдістеме рентгендік рентгеноскопияны металл көбіктерінің физика-химиялық эволюциясын түсіну үшін жоғары дәлдікті құрал ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

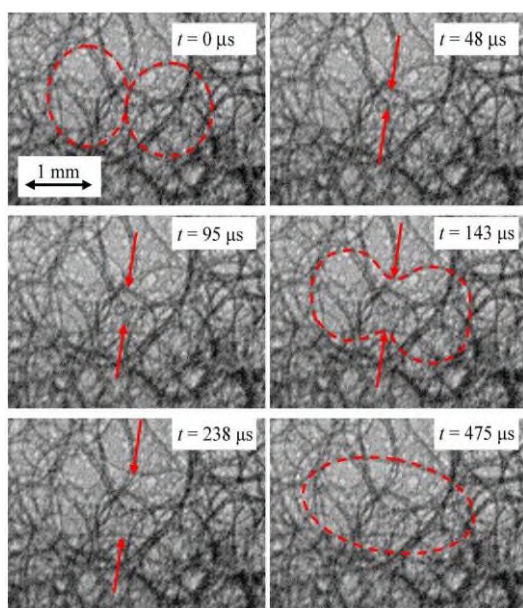
НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Үшінші буындағы синхротронды жарық көздері кеңістікте де, уақытта да микро-ашықтығы бар радиографияны орындау үшін жеткілікті жоғары полихроматикалық рентген-дік фотон ағынының тығыздығын береді [7]. Бейнелеу аппаратурасының, әсіресе CMOS сенсорлары саласында қарқынды дамуы және олардың үздіксіз жетілдірілген сезімталдығы қазір айтарлықтай (кемінде 10×20 мм²) көру өрісі үшін экспозиция уақыты 1 мкс-қа дейін төмен түсіру жылдамдығымен ерекше жоғары жазуға мүмкіндік береді. Рентген сәулелерінің кірістірілген фазалық контрастын оңтайландырылған пайдалану (рентгендік синхротрондық сәуленің когеренттілік қасиеттеріне байланысты) біздің ұялы материалымыз үшін ең жақсы контрастты алуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, LuAG:Ce немесе YAG:Ce кристалдары сияқты радиациялық қатты, бірақ жоғары сезімтал және тиімді монокристалды сцинтилляторлар қолданылады. 1-ші суретте әдебиетте [8,9] және соңғы нәтижелерде хабарланғандай, өткен жылдарда қол жеткізілген рентгендік синхротронды радиоскопияның уақыт ажыратымдылығының жақсаруы көрсетілген.

Сұйық көбіктердегі металл қабықшаларды немесе жасуша қабырғаларын тұрақтандыру металл көбік ғылымындағы негізгі мәселе болып табылады, бірақ әлі де толық түсінілмеген. Неғұрлым тұрақты пленкалар аз біріктіруді білдіреді, сондықтан біркелкі өлшемді үлестірумен кішірек көпіршіктер, бұл өте қажет. Жарылу сипатын зерттеу үшін бір уақытта жоғары кеңістіктік және жоғары уақыттық ажыратымдылыққа сұраныс болған эксперименттер жүргізілді. Әрбір кадр үшін 40 000 кадр/с және экспозиция уақыты 25 мкс болатын екі көршілес көпіршіктердің бірігуін байқауға болады [10].



Сурет 1 – Металдың көбіктенуін визуализациялау үшін қолданылатын in-situ синхротронды рентгендік рентгеноскопияның уақыт ажыратымдылығының эволюциясы.



Сурет 2 – In-situ жылдам синхротронды рентгендік радиоскопиялық талдаудан алынған AlSi10 + 0,5 масса% TiH₂ көбікінің 640 °C кезіндегі рентгенограммалар сериясы (Еуропалық синхротрондық сәулелену қондырғысының (ESRF) ID19 сәуле сызығында алынған деректер). 9,5 мкс кадр аралығымен (105 кф/с) өлшенген екі көпіршіктің бірігуін байқауға болады. Үзік сызықтар көпіршіктердің контурын көрсетеді, ал көрсеткілер сәйкес жасуша қабырғасының жарылғанын көрсетеді.

Соңғы эксперименттер 9,5 мкс кадр аралығымен және 20 мкм тиімді пиксел өлшемімен 105 000 кадр/сек жазу жылдамдығымен жүргізілді. Қысқа экспозиция уақыты мен кескіндердің шектеулі динамикасына байланысты мұндай кескіндердің контрасты төмен болғанымен, 2-ші суретте екі көпіршіктің бірігуі ~475 мкс-те аяқталатыны және қабықтың жарылуы ~380 мкс-қа созылатыны анық көрінеді, егер үзілудің соңы оның түзу нүктесіне айналатын жердегі көпіршікті одан бұрынғы нүкте ретінде қарастырсақ, дөнес.

Бұл эксперименттерде қабықтың жарылу уақытында оның тұтқырлығы емес, сұйықтың инерциясы басым болатынын көрсетуге болады, өйткені жарылу өте жылдам болды [10]. Сондықтан, $\eta = 0,4$ Па·с жоғары болатын тиімді тұтқырлық арқылы тұрақтандыру осы жерде зерттелген түрдегі металл көбіктеріне қолданылмайтынын көрсетуге болады. Көпіршік мөлшері мен қорытпаның құрамы сияқты басқа факторлар жарылу уақытына әсер етуі мүмкін және болашақта зерттелетін болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Рентген рентгеноскопиясы дамып келе жатқан металл көбіктерін жердегі зерттеудің қуатты құралы болып табылады. Синхротрондық және зертханалық қондырғылар көбік түзілуін жергілікті бақылауға мүмкіндік береді. 20 мкм-ге дейінгі тиімді пиксель өлшемімен жоғары кеңістіктік ажыратымдылық және қазіргі уақытта 10 мкс дейінгі ең жақсы қол жеткізуге болатын уақыт ажыратымдылығы жасуша қабырғасының жыртылуы мен көпіршікті бірігуін анықтауға және талдауға мүмкіндік береді. Алюминий көбікті сэндвич панельдеріндегі қатаюдың кеңеюі және көпіршіктердің туралануы сияқты жаңа әсерлер табылды. Микрогравитациялық тәжірибелер микрогравитация жағдайында балқыманың көбікке сіңуін бақылау және сандық анықтау үшін рентгендік рентгеноскопияны қолданды және гравитацияның біріктіруге күтпеген әлсіз әсерін анықтады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

АЛҒЫС

Автор ескертулері мен ұсыныстары осы жұмысты жетілдіруге ықпал еткен барлық мамандарға алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Lu, W.; Zhang, N.; Ding, Z.; Hu, Q.; Li, J. “Recent Progress on Apparatus Development and In Situ Observation of Metal Solidification Processes via Synchrotron Radiation X-ray Imaging: A Review.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022, 32(8), 2451–2479. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)65959-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)65959-4)
- [2] Garcia-Moreno, F. “X-ray Tomography and Tomoscopy on Metals: A Review.” *Advanced Engineering Materials*. 2023, 25, 2201355. <https://doi.org/10.1002/adem.202201355>
- [3] Nguyen-Thi, H.; Reinhart, G.; “Garcia-Moreno, F.; et al. In-situ X-ray Monitoring of Solidification and Related Processes of Metal Alloys.” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2023.
- [4] Rack, A.; Di Michiel, M.; Garcia-Moreno, F.; et al. “Recent Developments in MHz Radioscopy: Towards the Ultimate Temporal Resolution Using Storage Ring-Based Light Sources.” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2024, 1058, 168812. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168812>
- [5] Zhang, N.; Lu, W.; Ding, Z.; Li, J. “Synchrotron Radiation X-ray Imaging for In-situ Observation of Metallic Materials: Recent Advances and Future Perspectives.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022, 32(8), 2451–2479.
- [6] Zhang, X.; Li, Y.; Wang, H.; et al. “Investigation of the Interfacial Fusion of Welded Aluminum Foam Sandwich Panels by Synchrotron Radioscopy.” *Materials Research Letters*. 2023.
- [7] Garcia-Moreno, F.; Mukherjee, M.; Jiménez, C.; et al. “X-ray Tomoscopy for Time-Resolved Investigation of Metallic Foams.” *Advanced Engineering Materials*. 2023.
- [8] Rack, A. “MHz Radioscopy Using Hard Synchrotron Radiation: Instrumentation and Applications.” *Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory*. 2024.
- [9] Garcia-Moreno, F. “Advances in Time-Resolved Synchrotron Imaging of Metallic Materials.” *Advanced Engineering Materials*. 2023.
- [10] Hou, B.; Chen, Q.; Yi, L.; et al. “Materials Innovation and Electrical Engineering in X-ray Detection.” *Nature Reviews Electrical Engineering*. 2024, 1, 639–655.

REFERENCES

- [1] Lu, W.; Zhang, N.; Ding, Z.; Hu, Q.; Li, J. “Recent Progress on Apparatus Development and In Situ Observation of Metal Solidification Processes via Synchrotron Radiation X-ray Imaging: A Review.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022, 32(8), 2451–2479. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)65959-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)65959-4)
- [2] Garcia-Moreno, F. “X-ray Tomography and Tomoscopy on Metals: A Review.” *Advanced Engineering Materials*. 2023, 25, 2201355. <https://doi.org/10.1002/adem.202201355>
- [3] Nguyen-Thi, H.; Reinhart, G.; “Garcia-Moreno, F.; et al. In-situ X-ray Monitoring of Solidification and Related Processes of Metal Alloys.” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2023.
- [4] Rack, A.; Di Michiel, M.; Garcia-Moreno, F.; et al. “Recent Developments in MHz Radioscopy: Towards the Ultimate Temporal Resolution Using Storage Ring-Based Light Sources.” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2024, 1058, 168812. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168812>
- [5] Zhang, N.; Lu, W.; Ding, Z.; Li, J. “Synchrotron Radiation X-ray Imaging for In-situ Observation of Metallic Materials: Recent Advances and Future Perspectives.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022, 32(8), 2451–2479.
- [6] Zhang, X.; Li, Y.; Wang, H.; et al. “Investigation of the Interfacial Fusion of Welded Aluminum Foam Sandwich Panels by Synchrotron Radioscopy.” *Materials Research Letters*. 2023.
- [7] Garcia-Moreno, F.; Mukherjee, M.; Jiménez, C.; et al. “X-ray Tomoscopy for Time-Resolved Investigation of Metallic Foams.” *Advanced Engineering Materials*. 2023.
- [8] Rack, A. “MHz Radioscopy Using Hard Synchrotron Radiation: Instrumentation and Applications.” *Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory*. 2024.
- [9] Garcia-Moreno, F. “Advances in Time-Resolved Synchrotron Imaging of Metallic Materials.” *Advanced Engineering Materials*. 2023.
- [10] Hou, B.; Chen, Q.; Yi, L.; et al. “Materials Innovation and Electrical Engineering in X-ray Detection.” *Nature Reviews Electrical Engineering*. 2024, 1, 639–655.

MEASUREMENT OF THE EFFECTIVE ELECTRO-OPTICAL COEFFICIENT OF THIN FILMS OF LEAD ZIRCONATE DIOXIDE PRODUCED AT LOW TEMPERATURES¹*Mikhailov N.S.*, ²*Sadyk Zh.O.*¹*NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan*²*MISIS University of Science and Technology, Moscow, Russia***Corresponding author e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz***Authors information:****Mikhailov N.S.**, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz**Sadyk Zhadiger Orysbauly**, MISIS University of Science and Technology, Moscow, Russia,<https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>; e-mail: sadzhad03@gmail.com

Abstract — The development of electro-optical (EO) modulators based on lead zirconate titanate (PZT) is crucial for integrated photonics. The high annealing temperature required for processing PZT thin films limits their compatibility with modern complementary metal oxide semiconductor (CMOS) technology. In this work, high-quality PZT films were produced on SiO₂/Si substrates at an annealing temperature below 450 °C. The PZT films showed a preferred (100) orientation and were smooth and crack-free. Based on low-temperature PZT films, we subsequently designed and developed the Mach-Zehnder interferometer (MZI) wave modulator. The measured half-wave voltage (V_{π}) was 4.8 V at a wavelength of 1550 nm, which corresponds to an EO coefficient in a device such as 66 pm/V, indicating potential use in optical devices. The results presented in this paper open up great prospects for the integration of PZT thin films with other complex systems.

Keywords — titanate film with lead zircon, low temperature, CMOS compatibility, electro-optical coefficient.

ТӨМЕН ТЕМПЕРАТУРАДА ДАЙЫНДАЛҒАН ҚОРҒАСЫН ЦИРКОНАТТЫ ТИТАНАТТЫ ЖҰҚА ПЛЕНКАЛАРДЫҢ ТИІМДІ ЭЛЕКТРО-ОПТИКАЛЫҚ КОЭФФИЦИЕНТІН ӨЛШЕУ¹*Михайлов Н.С.*, ²*Садық Ж.О.*¹*«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан*²*МИСИС ғылым және технологиялар университеті, Мәскеу, Ресей***Автор-корреспондент e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz***Авторлар туралы ақпарат:****Михайлов Н.С.**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан,e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz**Садық Жәдігер Орысбайұлы**, МИСИС ғылым және технологиялар университеті, Мәскеу, Ресей,<https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>; e-mail: sadzhad03@gmail.com

Аңдатпа — Қорғасын цирконат титанаты (PZT) негізіндегі электро-оптикалық (ЕО) модуляторларын жасау интеграцияланған фотоника үшін өте маңызды. PZT жұқа қабықшаларын өңдеу үшін қажетті жоғары күйдіру температурасы олардың заманауи қосымша металл-оксид-жартылай өткізгіш (CMOS) технологиясымен үйлесімділігін шектейді. Бұл жұмыста SiO₂/Si субстраттарында 450 °C төмен жасыту температурасында жоғары сапалы PZT пленкалары дайындалды. PZT фильмдері артықшылықты (100) бағдар көрсетті және біркелкі және жарықтарсыз болды. Төмен температуралы PZT пленкаларына сүйене отырып, біз кейіннен Мах-Зехдер интерферометрінің (MZI) толқындық модуляторын жобалап, жасадық. Өлшенген жарты толқындық кернеу (V_{π}) 1550 нм толқын ұзындығында 4,8 В болды, бұл оптикалық құрылғыларда әлеуетті пайдалануды көрсететін 66 pm/V сияқты құрылғыдағы ЕО коэффициентіне сәйкес келеді. Бұл жұмыста берілген нәтижелер PZT жұқа пленкаларын басқа күрделі жүйелермен біріктіру үшін үлкен перспективаны көрсетеді.

Түйін сөздер — қорғасын цирконатты титанатты пленка, төмен температура, CMOS үйлесімділігі, электро-оптикалық коэффициент.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТОНКИХ ПЛЕНОК ИЗ ДИОКСИДА ЦИРКОНАТА СВИНЦА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

¹Михайлов Н.С., ²Садық Ж.О.

¹НАО «Қарағандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан

²Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

*Автор-корреспондент e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Михайлов Н.С., НАО «Қарағандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан, e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz

Садық Жәдігер Орысбайұлы, Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия, <https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>; e-mail: sadzhad03@gmail.com

Аннотация — Разработка электрооптических (ЕО) модуляторов на основе цирконат-титаната свинца (PZT) имеет решающее значение для интегрированной фотоники. Высокая температура отжига, необходимая для обработки тонких пленок PZT, ограничивает их совместимость с современной технологией дополнительного металлооксидного полупроводника (CMOS). В этой работе на подложках SiO₂/Si были изготовлены высококачественные пленки PZT при температуре отжига ниже 450 °С. Фильмы PZT показали предпочтительную (100) ориентацию и были ровными и без трещин. Основываясь на низкотемпературных пленках PZT, мы впоследствии спроектировали и разработали волновой модулятор интерферометра Мах-Зехндера (MZI). Измеренное полуволновое напряжение (V_{π}) было 4,8 В на длине волны 1550 нм, что соответствует коэффициенту ЕО в таком устройстве, как 66 pm/V, что указывает на потенциальное использование в оптических устройствах. Результаты, представленные в этой работе, открывают большие перспективы для интеграции тонких пленок PZT с другими сложными системами.

Ключевые слова — титанатная пленка с цирконатом свинца, низкая температура, совместимость с CMOS, электрооптический коэффициент.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Төмен температурада дайындалған қорғасын цирконат-титанатының (PZT) жұқа қабықшаларының құрылымдық және электрооптикалық қасиеттері зерттелді. SiO₂/Si субстраттарында 450 °С температурада жоғары сапалы (100)-бағытталған PZT пленкалары дайындалып, олардың кристалдық құрылымы, морфологиясы және элементтік құрамы рентгендік дифракция (XRD), сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM), атомдық-күштік микроскопия (AFM) және энергия-дисперсиялық спектроскопия (EDS) әдістерімен талданды. Дайындалған пленкалар негізінде Mach-Zehnder интерферометрі типіндегі толқындық электро-оптикалық модулятор әзірленіп, оның жарты толқындық кернеуі (V_{π}) және тиімді электро-оптикалық коэффициенті анықталды. Алынған нәтижелер төмен температуралы PZT пленкаларының CMOS технологияларымен үйлесімді интеграцияланған фотоникалық құрылғыларда қолдануға жоғары әлеуетке ие екенін көрсетті.

КІРІСПЕ

ЭО материалдары интегралды фотоникада ерекше және шешуші рөл атқарады [1-3]. Коммерциялық орнатылған ЕО модуляторларында LiNbO₃ жұқа пленкаларының таралуына қарамастан, олардың жоғары жылдамдықты реакциясы және төмен оптикалық жоғалуы, күрделі өңдеу және жоғары құны адамдарды жақсырақ ЕО қасиеттері мен миниатюризациялауға және балама материалдарды зерттеуге итермелейді. PZT жұқа қабықшалары модуляторды жасау үшін ЕО материалы ретінде өте перспективалы болып табылады, өйткені олардың тамаша ЕО эффектісі. Дегенмен, PZT жұқа пленкаларын жоғары күйдіру температурасымен өңдеу микроэлектромеханикалық жүйелердің (MEMS) құрылғыларын CMOS құрылғыларына тікелей біріктіру үшін кедергі жасайды. Бүгінгі күні төмен температуралы PZT толқындық модуляторларын зерттеу бойынша шектеулі зерттеулер жүргізілді [4]. Төмен температура-лық PZT негізіндегі ЭО модуляторларының қасиеттерін зерттеудің шұғыл қажеттілігі бар.

Біздің білуімізше, PZT жұқа қабықшаларын әдеттегі өңдеу үшін материалды қажетті

перовскит фазасына кристалдандыру үшін әдетте 600 °C асатын күйдіру температурасы қажет, ол тамаша ЭО қасиеттерін көрсетуімен белгілі. Мысалы, Чжу т.б. 650 °C жоғары күйдіру температурасында магнетронды шашырату әдісін қолдана отырып, Corning шыны астарларында PZT жұқа пленкаларын дайындауды көрсетті [5]. Олардың зерттеуі 185,3 pm/V ЕО коэффициентіне қол жеткізуді анықтады. Цю жұмысы SiO₂/Si қабатында тұндырылған жоғары (100) бағытталған PZT жұқа қабықшаларын зерттеді және 133 pm/V құрылғыдағы үлкен ЕО коэффициентін көрсетті. Веескман және т.б. $V\pi = 7,0$ В Mach-Zehnder модуляторы арқылы 60 ГГц-тен жоғары өткізу қабілеттілігіне қол жеткізе отырып, TE оптикалық режимі үшін гибриді PZT/Si құрылғысында Mach-Zehnder модуляторын жобалау үшін айырбастарды көрсетті. Дегенмен, бұл процестер үшін қажет жасыту температурасы CMOS құрылғыларымен үйлесімді максималды жылу бюджетінен айтарлықтай асып түседі, әдетте шамамен 450 °C [8].

Бұл шектеуді еңсеру үшін төмен температурада өңдеу әдістерін әзірлеуге айтарлықтай зерттеулер жүргізілді [9]. Дегенмен, төмен температуралы PZT толқын-дық модуляторларын зерттеу бойынша шектеу-лі зерттеулер жүргізілді. Ең тиімді тәсілдердің бірі ретінде төмен температуралы золь-гельмен өңделген PZT пленкаларын әзірлеу ұзақ уақыт бойы жалғасуда, тек бірнеше сәтті нәтижелерге қол жеткізілді. Пэн және т.б. [10] шамамен 450°C ультра төмен температурада золь-гель әдісін қолданып PZT жұқа қабықшаларын жасау туралы хабарлады және шамамен 30 мкК/см² үлкен өздігінен поляризацияны және шамамен 2900 кВ/см диэлектриктің ыдырауының жоғары беріктігін көрсетті. Такамура және т.б. [11] ерітіндінің жану синтезі әдісін қолдана отырып, шамамен 450 °C температурада үлкен қалдық поляризациясы және аз ағып кету тогы бар PZT пленкаларын жасау туралы хабарлады. Соған қарамастан, алынған PZT жұқа қабықшаларының бағдарын бақылау мүмкін болмады, ал Pt төменгі электрод ретінде пайдалану оларды жоғары оптикалық жоғалтуға байланысты фотонды технологиямен үйлеспейді. ЕО модуляторлары үшін төмен температураларда бағдарлауды басқару мүмкіндігі бар PZT жұқа пленкаларын шығаруға қабілетті қарапайым өндіріс процесі өте қажет [12].

Бұл жұмыста жоғары (100)-бағдарланған PZT пленкалары SiO₂/Si субстраттарында төмен жасыту температурасында (450 °C) айналдыру

әдісін қолдану арқылы дайындалған. Оптикалық құрылғыларда пайдалану әлеуетін одан әрі зерттеу үшін біз төмен температуралы PZT MZI толқындық модуляторын жасадық. Модулятордың өнімділігі де көрсетілді.

Зерттеудің маңыздылығы. Интеграцияланған фотониканың қарқынды дамуы жоғары электро-оптикалық қасиеттерге ие және кремний негізіндегі микроэлектрондық технологиялармен үйлесімді материалдарды әзірлеуді талап етеді. Қазіргі уақытта PZT жұқа қабықшалары перспективалы электро-оптикалық материалдардың бірі болып саналғанымен, оларды алу үшін көбінесе 600 °C-тан жоғары күйдіру температурасы қажет, бұл CMOS технологиясының температуралық шектеулеріне сәйкес келмейді. Осыған байланысты төмен температурада дайындалатын, жоғары кристалдық сапасы мен тиімді электро-оптикалық сипаттамаларын сақтайтын PZT жұқа қабықшаларын алу ғылыми және практикалық тұрғыдан өзекті мәселе болып табылады. Бұл зерттеу төмен температуралы технологияларды қолдану арқылы PZT негізіндегі фотондық құрылғыларды микроэлектрондық жүйелермен біріктіру мүмкіндігін кеңейтеді.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылы-ми жаңалығы SiO₂/Si субстратында 450 °C температурада жоғары (100)-бағытталған PZT жұқа қабықшаларын алу технологиясын әзірлеу және олардың құрылымдық, морфологиялық әрі электро-оптикалық қасиеттерін кешенді зерттеу болып табылады. Алғаш рет төмен температурада дайындалған PZT пленкалары негізінде Mach-Zehnder типті толқындық модулятор жасалып, 1550 нм толқын ұзындығында жарты толқындық кернеудің 4,8 В және құрылғыдағы тиімді электро-оптикалық коэффициенттің 66 pm/V мәніне жететіні көрсетілді. Алынған нәтижелер төмен температуралы PZT пленкаларының CMOS технологияларымен үйлесімді интеграцияланған фотоникалық құрылғыларды әзірлеуге жарамды екенін дәлелдейді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

PZT жұқа қабықшаларын дайындау келесідей болды: субстрат қалыңдығы 3 мкм термиялық оксид SiO₂ қабаты бар коммерциялық Si вафли болды. Таза перовскиттік құрылымды PZT жұқа қабықшаларына қол жеткізу үшін вафлидің бетіне атомдық тұқымдық қабат [15] қойылды, бұл қажетті атомдық тор бағытында PZT кристалдануын жеңілдетеді. Тұқым қабаты үшін прекурсорлық ерітінді коммерциялық лантан негізіндегі еріткіш болды [Juhe Electro-Optic (Hangzhou) Tech компаниясынан сатып

алынған. Co. Ltd., Ханчжоу, Қытай]. Айналыру жабыны алдында SiO_2/Si субстраттары ацетон, этанол және ионсыздандырылған суда дәйекті түрде шайылды, содан кейін вакуумды кептіру оттегі плазмасымен өңдеуден өтті. Содан кейін тұқым қабаттары субстраттарға айналырылды және 2-ден 5 минутқа дейін 440°C температурада ыстық плитада термиялық өңдеуге ұшырады.

PZT прекурсорлық шешімдері бұрын хабарланған процедураға негізделген әдісті қолдану арқылы дайындалды [21], шамалы өзгертулер. Атап айтқанда, Pb зольі қорғасын нитраты, аммоний нитраты және трицинді 1:1:1 молярлық қатынаста 2-метоксиэтанолда еріту арқылы дайындалды, ерітінді мөлдір, біртекті ерітіндіні қалыптастыру үшін 110°C температурада 2 сағат бойы араластырылды. Zr золь цирконил нитраты, аммоний нитраты және несепнәрді 2-метоксиэтанолда азот атмосферасында (N_2) еріту арқылы дайындалды, ал Ti зольі титан тетрайзопропанолаты, аммоний нитраты және несепнәрді 2-метоксиэтанолда төмен еріту арқылы алынды. Содан кейін Zr-Ti зольі бөлме температурасында Zr золь мен Ti зольді араластыру арқылы дайындалды. Соңында Pb золь Zr-Ti зольіне 0,5 сағат араластыра отырып қосылды, нәтижесінде тұрақты PZT зольі алынды. PZT прекурсорлық ерітіндісі тұқым қабаттарына айналырылады, содан кейін вакуум жағдайында кептіріледі, содан кейін органикалық компоненттерді жою үшін ыстық пластинада 250°C температурада 20 минут пиролизден өтеді. Үлгі үшін қыздыру және салқындату рампасының жылдамдығы $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ етіп орнатылды. Содан кейін аморфты PZT жұқа қабықшалары оттегі атмосферасында алдын ала белгіленген температурада жылдам термиялық жасыту жүйесін қолдану арқылы жасатылған. Әрбір айналыру жабыны, пиролиз және жасыту қадамы қалыңдығы шамамен 100 нм қабат берді; осылайша, 200 нм пленка қалыңдығына жету үшін процесс циклі екі рет қайталанды.

Әрі қарай, MZI толқын өткізгіші фотолитография және индуктивті байланысқан плазма (ICP) ою арқылы жасалды. Айналыру жабыны арқылы дайындалған үстіңгі қаптама қабаты PZT пленкасына қойылды, содан кейін қалыңдығы 200 ± 10 нм пленканы қалыптастыру үшін 150°C температурада 2,0 сағат бойы ыстық пластинада термиялық өңдеуден өтті. Копланарлы Al электродтары термиялық булану және көтеру процесі арқылы дайындалды.

PZT жұқа қабықшаларының кристаллографиялық құрылымдары $\text{CuK}\alpha$ сәулеленуі арқылы рентгендік дифрактометрия (XRD, Bruker D8 Advance, Бремен, Германия)

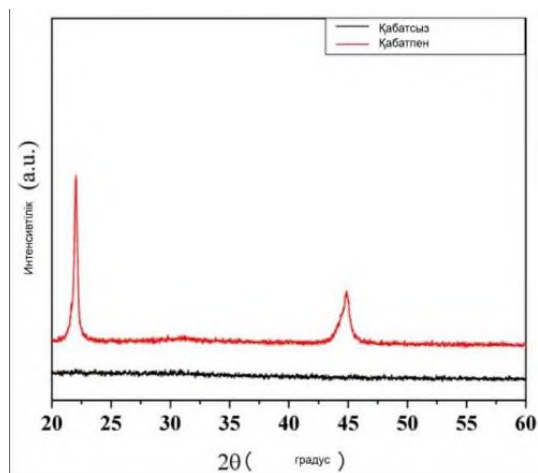
арқылы талданды. Пленкалардың көлденең қимасы мен беткі морфологиясы далалық эмиссиялық сканерлеуші электронды микроскопия (SEM, JEOL 6335F, Токио, Жапония) және атомдық күшті микроскопия (AFM) талдауымен өлшенді. PZT жұқа қабықшаларындағы құрамдас элементтердің химиялық күйлері рентгендік энергетикалық дисперсиялық спектроскоптың (EDS) көмегімен анықталды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

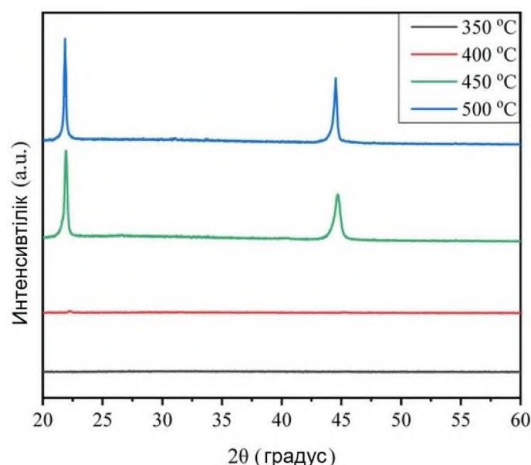
1 және 2-ші суретте 20° пен 60° аралығындағы 2θ бұрыштары үшін жазылған дифрактограммалары бар айналыру әдісі арқылы алынған PZT жұқа қабықтарының XRD үлгілері көрсетілген. 1-суретте көрсетілгендей, ол SiO_2/Si субстраттарында тұндырылған және тұқым қабаты бар немесе онсыз 450°C температурада 1,0 сағат бойы күйдірілген PZT жұқа қабықшасының XRD үлгілерін көрсетеді. Көріп отырғанымыздай, тұқымдық қабаты бар PZT жұқа қабықшасы жақсы кристалданған және жоғары консистенциялы (100) бағдар көрсетті, ал тұқым қабаты жоқ PZT қабықшасы кристалданбаған. Күтілгендей, тұқым қабатын енгізу перовскит-құрылымның қалыптасуына тиімді ықпал ете алады. $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ қабаты сыртқы ауада 440°C температурада тұқым қабатын термиялық өңдеуден кейін пайда болады деп хабарланған [9]. Бұл процесс PZT пленкасының ядролануына ықпал ететін тұрақты және жақсы анықталған тұқым қабатын құруды қамтамасыз етеді. PZT пленкасы мен $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ арасындағы тор сәйкессіздігі өте аз, теориялық тор константалары PZT үшін $4,055 \text{ \AA}$ және $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ үшін $4,076 \text{ \AA}$, нәтижесінде тордың сәйкессіздігі тек 0,505% құрайды. Бұл кішігірім сәйкессіздік PZT пленкасы мен $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ тұқымдық қабаты арасындағы жақсы тор сәйкестігін көрсетеді, бұл жоғары сапалы кристалдануға және оңтайлы электро-оптикалық өнімділікке қол жеткізуге көмектеседі. Бұл нәтижелер аралық фазаның түзілуі нуклеацияның активтену энергиясын төмендететінін көрсетеді, осылайша төмен температурада перовскит фазасын өндіруге мүмкіндік береді.

2-суретте PZT жұқа қабықшаларының оттегі атмосферасында тұқым қабаттарымен әртүрлі температурада жасытудан кейінгі фазалық эволюциясы көрсетілген. 2-суретте көрсетілген барлық PZT қабықшалары бірдей тұндырылды, содан кейін 1,0 сағат бойы 350, 400, 450 және 500°C температурада бөлек күйдірілді. PZT қабықшалары 450°C -тан төмен күйдірілген кезде аморфты болғанын және 450°C күйдірілгеннен кейін перовскит фазасына жақсы

кристалданғанын байқауға болады. Жасыту температурасы 500 °C дейін көтерілгендіктен, басқа қоспа фазасы анықталмады, бұл фазалық түрлендіру процесінің аяқталғанын көрсетеді.



Сурет 1 – Қабаты бар PZT жұқа қабықшаларының XRD үлгілері 450 °C температурада 1,0 сағат бойы күйдіруден кейін алынды.

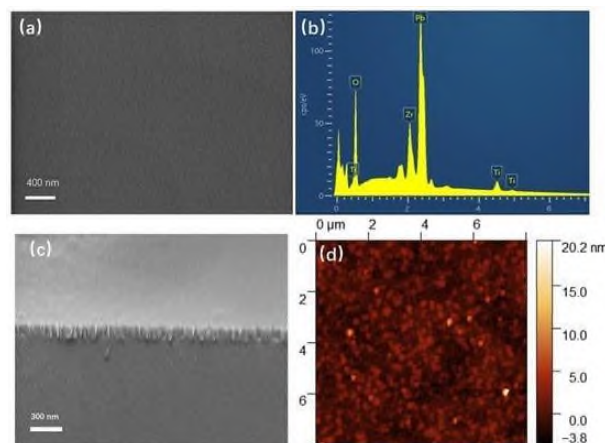


Сурет 2 – Әртүрлі температурада күйдірілген PZT жұқа пленкаларының XRD үлгілері.

Сонымен қатар, PZT пленкаларында пироксид фазасы табылмады және тұқым қабаттары сияқты (100) бағыт бойынша бірдей қолайлы бағытты бөлісетін таза перовскит құрылымы байқалды.

450 °C температурада күйдірілген PZT пленкаларының сапасын одан әрі зерттеу үшін біз элементтік құрамы мен бетінің морфологиясын көрсеттік. Жұқа қабықшалы стехиометрияны дәл бақылауды қамтамасыз ету, әсіресе Pb/Zr/Ti қатынасы, бұл жұмыста шешуші мәселе ретінде пайда болды, өйткені ол PZT жұқа қабықшаларының ЕО қасиеттеріне тікелей әсер етті. PZT жұқа қабықшаларының ЭСҚ, 3b-суретте көрсетілгендей, Pb, Zr, Ti және О болуын растайды. Бұл элементтер перовскит құрылымды PZT жұқа қабықшаларының құрамын біріктіреді.

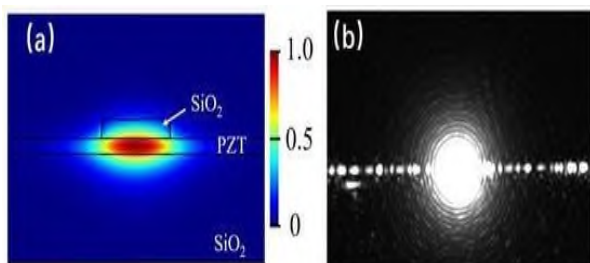
Жартылай сандық талдау одан әрі Ti және Zr мазмұнының арақатынасы шамамен 0,91 екенін көрсетеді, бұл олардың тамаша электро-оптикалық қасиеттерімен танымал морфотропты фаза шекарасы (MPB) композицияларына жақындығын көрсетеді [10]. 3c суретте пленка жақсы кристалданған және жарықтарсыз және шамамен 190 нм біркелкі қалыңдығын көрсететін PZT пленкасының көлденең қимасының SEM кескіні көрсетілген. Бетінің салыстырмалы түрде тегіс профилі болды, ол 3d-суретте көрсетілгендей, түйір өлшемі шамамен 30 нм және бетінің кедір-бұдыры шамамен 1,2 нм. Кішкентай түйір өлшемі және бетінің кедір-бұдырлығы таралу шығындарын азайтуға ықпал етті, бұл жарықтың аз шашырауына әкелді. Сонымен қатар, пленкалардың қолайлы стехиометриясы мен біртектілігі таралу шығындарын тиімді түрде азайтты, осылайша құрылғының практикалық мүмкіндіктерін арттырады.



Сурет 3 – (a) SEM арқылы бақыланатын PZT қабықшасының беткі морфологиясы. (b) PZT жұқа қабықшасының ЭСҚ. (c) Көлденең қима SEM кескіні. (d) AFM топографиялық кескіні.

Төмен температурада (450 °C) өңделген PZT жұқа қабықтарының жоғары кристалдық сапасын ескере отырып, модуляторларда тамаша электро-оптикалық әсерлер алынады деп күтілді. Фильм негізіндегі MZI толқындық модуляторы жасалды. Біздің жобамызға сәйкес, PZT пленкасының қалыңдығы 200 ± 10 нм, ал үстіңгі қаптама қабатының ені 2,0 мкм және қалыңдығы 200 ± 10 нм болды. Үстіңгі қаптау қабаты SiO₂-ден жасалған және дайындау әдісі золь-гель SiO₂ қабатын PZT пленкасына айналдыруды қамтыды, содан кейін ауада екі сатылы пісіру процесі: алдымен 120 °C температурада 2 сағат, содан кейін 150 °C температурада тағы 2 сағат. Бірлескен жазық электродтар PZT қабатының үстіне жасалды, олардың әрқайсысы қалыңдығы 200 нм алюминий қабатынан тұрады, олардың арасындағы қашықтық 6,0 мкм. 4a-суретте

Lumerical оптикалық режимді есептеу арқылы имитацияланған толқын өткізгіштегі негізгі TE режимі көрсетілген. Модельдеуде сыну көрсеткіштері PZT пленкасы үшін 2,40 және 1550 нм толқын ұзындығында SiO_2 қабаты үшін 1,44 болды [23]. Оптикалық өрістердің PZT жұқа қабықшасының ішінде 42% шектеу коэффициентімен шектелгенін көруге болады.



Сурет 4 – (a) толқындық модулятордағы модельденген оптикалық модель профилі; (b) CCD камерасы жинаған TE режимінің шығыс жарығы.

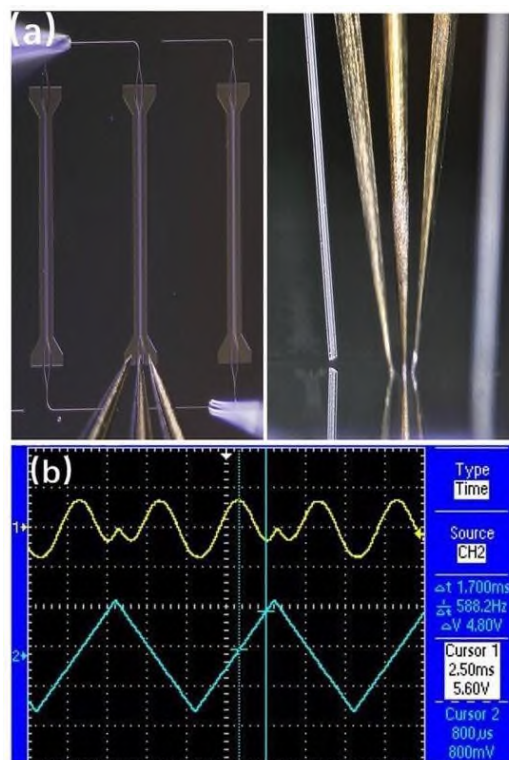
Жоғарыда сипатталған дизайн негізінде PZT MZI толқындық модуляторы 5a-суретте көрсетілгендей жасалды. Интерферометрдің егжей-тегжейлі схемалық диаграммасы енгізілген, ол толқын өткізгіш үлгісін, сондай-ақ электр контактілерінің орналасуы мен орналасуын анық көрсетеді. Кейіннен құрылғы соңғы бетті біріктіру жүйесі арқылы өлшеуден өтті. 1550 нм толқын ұзындығында жұмыс істейтін лазердің кіріс жарығы поляризацияны сақтайтын талшық арқылы құрылғыға қосылды. 4b суретінде кіріс жарығы TE бағытында поляризацияланған кезде ПЗС түсірген шығыс жарығы көрсетілген. Толқынбағдарлама ішінде TE режимінің сәтті таралуын көрсететін ерекше бір режимді үлгі байқалды. 60 °C температурада 1,0 сағат бойы 100 В оңтайландырылған жағдайда полюстен кейін модулятордың $V\pi$ мәні жіберілетін жарықтың қарқындылығы мен қолданылатын айнымалы ток кернеуі арасындағы корреляцияны өлшеу арқылы анықталды. 5b-суретте бейнеленген айқын модуляция шығыс функциясының негізінде 1 кГц жиілікте 4,8 В болатын $V\pi$ өлшенді. Құрылғыдағы ЭО коэффициентін (1) [15] теңдеуінің көмегімен есептеуге болады:

$$\gamma_{33} = -\frac{GV\pi L}{n^3GV\pi L} \quad (1)$$

мұндағы λ операциялық толқын ұзындығын көрсетеді; g – электродаралық қашықтық (мұнда, $g = 6,0$ мкм); G оптикалық режим мен қолданылатын электр өрісі арасындағы қабаттасу коэффициентін білдіреді ($G = 0,5$); және n – толқын өткізгіштің тиімді сыну көрсеткіші. Құрылғыдағы ЭО

коэффициенті үшін $n^3 = n_{eff}^3 = 5,83$. Электрод ұзындығы (L) 1,0 см болғанда модулятордың кернеу-ұзындық өнімі ($V\pi L$) 4,8 В·см болды. Құрылғыдағы ЭО коэффициенті өлшенген $V\pi L$ және қолданылған теңдеу негізінде 66 pm/V деп бағаланды. Бұл ЭО модуляторларына арналған LiNbO_3 жұқа пленкаларынан екі есе үлкен. Бұл нәтижелер төмен температурада өңделген PZT жұқа пленкаларының ЭО модуляторларын қолдану үшін жарамдылығын растайтынын анық көрсетеді. Төмен температуралы PZT пленкаларының ЭО коэффициенті жоғары температуралы PZT пленкаларына қарағанда төмен болғанымен, олардың CMOS технологиясымен үйлесімділігі электронды құрылғыларға интеграцияланудың перспективасын ұсынады, осылайша қолданбалардың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

1-кестеде біз жалпы материалдардың электро-оптикалық қасиеттерін салыстырамыз, соның ішінде LiNbO_3 пленкасы, BaTiO_3 пленкасы, жоғары температуралы PZT пленкасы және осы тәжірибеде зерттелген төмен температуралы PZT пленкасы. Кестеден біздің төмен температуралы PZT пленкасының CMOS үйлесімділігі тұрғысынан айтарлықтай артықшылықтар беретіні анық.



Сурет 5 – (a) Электр контактілерінің орналасуы мен орналасуын көрсететін төмен температуралы PZT негізіндегі MZI модуляторының фотосуреті. (b) 1 КГц үшбұрышты сигналы бар жарты толқындық кернеу ($V\pi$) көрсетілген; осы қуат үшін PZT негізіндегі MZI модуляторының сипаттамалық кернеуі 1550 нм кезінде 4,8 В.

Кесте 1 – Жиі қолданылатын материал пленкаларының ЭО қасиеттері.

Материал	Өңдеу температура-сы	ЭО Коэф-цент	CMOS үйлесімділік
LiNbO ₃	--	31 pm/V	-
BaTiO ₃	660 °C	213 pm/V	-
Жоғары температура PZT	≥600 °C	133 pm/V	-
Төмен-температура PZT	450 °C	66 pm/V	+

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе, біз SiO₂/Si субстратында 450 °C күйдіру температурасында жақсы кристалданған PZT жұқа қабықшаларын сәтті дайындадық. Пленкалардың құрылымдық талдауы жарықсыз және тегіс беті бар күшті артықшылықты (100) өсу бағдарларын анықтады. Төмен температуралы PZT пленкаларының негізінде MZI толқындық модуляторы жобаланған және жасалған. Атап айтқанда, өлшенген V_л 4,8 В электрод ұзындығы L 1,0 см толқын ұзындығы 1550 нм, бұл құрылымдағы әсерлі EO коэффициентін 66 pm/V дейін береді. Жоғарыда келтірілген нәтижелер төмен температуралы PZT пленкаларының перспективалы EO қасиеттерін ашады, бұл PZT негізіндегі құрылымдарды өңдеудің төмен температураларында әзірлеудегі елеулі жетістіктерді білдіреді. Бұл нәтижелер біріктірілген фотоника қолданбалары үшін айтарлықтай коммерциялық әлеуетке ие.

АВТОРЛАРДЫҢ ҮЛЕСІ

(таксономия CRediT):

Михайлов Н.С. – Концептуализация; Әдістеме; Зерттеуді басқару; Ресурстар; Қолжазбаны қарау және редакциялау.

Садық Ж.О. – Деректерді жинау; Формалды талдау; Деректерді визуализациялау; Бағдарламалық қамтамасыз ету; Қолжазба-ның бастапқы нұсқасын дайындау.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

АЛҒЫС

Автор зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ-на алғыс білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Thomaschewski, M.; Bozhevolnyi, S.I. Pockels modulation in integrated nanophotonics. Appl. Phys. Rev. 2022, 9, 021311.
- [2] Kieninger, C.; Kutuvantavida, Y.; Elder, D.L.; Wolf, S.; Zwickel, H.; Blaicher, M.; Kemal, J.N.; Lauermann, M.; Randel, S.; Freude, W.; et al. Ultra-high electro-optic activity demonstrated in a silicon-organic hybrid modulator. Optica 2018, 5, 739–748.
- [3] Hamze, A.K.; Reynaud, M.; Geler-Kremer, J.; Demkov, A.A. Design rules for strong electro-optic materials. NPJ Comput. Mater. 2020, 6, 130.
- [4] Vazimali, M.G.; Fathpour, S. Applications of thin-film lithium niobate in nonlinear integrated photonics. Adv. Photon. 2022, 4, 034001.
- [5] Qi, Y.; Li, Y. Integrated lithium niobate photonics. Nanophotonics 2020, 9, 1287–1320.
- [6] Alexander, K.; George, J.P.; Verbist, J.; Neyts, K.; Kuyken, B.; Thourhout, D.V.; Beeckman, J. Nanophotonic Pockels modulators on a silicon nitride platform. Nat. Commun. 2018, 9, 3444.
- [7] Izyumskaya, N.; Alivov, Y.I.; Cho, S.J.; Morkoç, H.; Lee, H.; Kang, Y.S. Processing, Structure, Properties, and Applications of PZT Thin Films. Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. 2007, 32, 111–202.

- [8] Picavet, E.; Geest, K.D.; Lievens, E.; Rijckaert, H.; Vandekerckhove, T.; Solano, E.; Deduytsche, D.; Van Bossele, L.; Van Thourhout, D.; De Buysser, K.; et al. Solution-Processed Pb(Zr, Ti)O₃ Thin Films with Strong Remnant Pockels Coefficient. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2024, 16, 41134–41144.
- [9] George, J.P.; Smet, P.F.; Botterman, J.; Bliznuk, V.; Woestenborghs, W.; Thourhout, D.V.; Neyts, K.; Beeckman, J. Lanthanide-Assisted Deposition of Strongly Electro-optic PZT Thin Films on Silicon: Toward Integrated Active Nanophotonic Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2015, 7, 13350.
- [10] Zhu, M.; Zhang, H.; Dua, Z.; Liu, C. Structural insight into the optical and electro-optic properties of lead zirconate titanate for high-performance photonic devices. *Ceram. Int.* 2019, 45, 22324–22330.
- [11] Bassiri-Gharb, N.; Bastani, Y.; Bernal, A. Chemical solution growth of ferroelectric oxide thin films and nanostructures. *Chem. Soc. Rev.* 2014, 43, 2125–2140.
- [12] Dey, S.K.; Budd, K.D.; Payne, D.A. Thin-film ferroelectrics of PZT of sol-gel processing. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 1988, 35, 80–81.

REFERENCES

- [1] Thomaschewski, M.; Bozhevolnyi, S.I. Pockels modulation in integrated nanophotonics. *Appl. Phys. Rev.* 2022, 9, 021311.
- [2] Kieninger, C.; Kutuvantavida, Y.; Elder, D.L.; Wolf, S.; Zwickel, H.; Blaicher, M.; Kemal, J.N.; Lauermann, M.; Randel, S.; Freude, W.; et al. Ultra-high electro-optic activity demonstrated in a silicon-organic hybrid modulator. *Optica* 2018, 5, 739–748.
- [3] Hamze, A.K.; Reynaud, M.; Geler-Kremer, J.; Demkov, A.A. Design rules for strong electro-optic materials. *NPJ Comput. Mater.* 2020, 6, 130.
- [4] Vazimali, M.G.; Fathpour, S. Applications of thin-film lithium niobate in nonlinear integrated photonics. *Adv. Photon.* 2022, 4, 034001.
- [5] Qi, Y.; Li, Y. Integrated lithium niobate photonics. *Nanophotonics* 2020, 9, 1287–1320.
- [6] Alexander, K.; George, J.P.; Verbist, J.; Neyts, K.; Kuyken, B.; Thourhout, D.V.; Beeckman, J. Nanophotonic Pockels modulators on a silicon nitride platform. *Nat. Commun.* 2018, 9, 3444.
- [7] Izyumskaya, N.; Alivov, Y.I.; Cho, S.J.; Morkoç, H.; Lee, H.; Kang, Y.S. Processing, Structure, Properties, and Applications of PZT Thin Films. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2007, 32, 111–202.
- [8] Picavet, E.; Geest, K.D.; Lievens, E.; Rijckaert, H.; Vandekerckhove, T.; Solano, E.; Deduytsche, D.; Van Bossele, L.; Van Thourhout, D.; De Buysser, K.; et al. Solution-Processed Pb(Zr, Ti)O₃ Thin Films with Strong Remnant Pockels Coefficient. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2024, 16, 41134–41144.
- [9] George, J.P.; Smet, P.F.; Botterman, J.; Bliznuk, V.; Woestenborghs, W.; Thourhout, D.V.; Neyts, K.; Beeckman, J. Lanthanide-Assisted Deposition of Strongly Electro-optic PZT Thin Films on Silicon: Toward Integrated Active Nanophotonic Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2015, 7, 13350.
- [10] Zhu, M.; Zhang, H.; Dua, Z.; Liu, C. Structural insight into the optical and electro-optic properties of lead zirconate titanate for high-performance photonic devices. *Ceram. Int.* 2019, 45, 22324–22330.
- [11] Bassiri-Gharb, N.; Bastani, Y.; Bernal, A. Chemical solution growth of ferroelectric oxide thin films and nanostructures. *Chem. Soc. Rev.* 2014, 43, 2125–2140.
- [12] Dey, S.K.; Budd, K.D.; Payne, D.A. Thin-film ferroelectrics of PZT of sol-gel processing. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 1988, 35, 80–81

**USE OF VIRTUAL LABORATORY WORK IN THE PREPARATION OF
ENGINEERING STUDENTS****^{1*}Ibraeva A., ^{2,3}Kassymova G., ¹Gumenchuk O., ⁴Urazaliyeva U.**¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan²Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan³Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan⁴SDU University, Kaskelen, Kazakhstan**Corresponding author email: a.ibrayeva@tttu.edu.kz***Author information:****Ibraeva Akzharkyn**, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: a.ibrayeva@tttu.edu.kz**Kassymova Gulzhaina**, Faculty of Pedagogy and Psychology, Abai Kazakh National Pedagogical University; Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan. ORCID: 0000-0001-7004-3864; e-mail: g.kassymova@satbayev.university**Gumenchuk Oksana**, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: o_gumenchuk@mail.ru**Urazaliyeva Ulzhan**, PhD student, SDU University, Kaskelen, Kazakhstan, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7517-0555>; e-mail: ulzhan.urazaliyeva@sdu.edu.kz

Abstract — This article is devoted to the pedagogical and methodological aspects of the use of virtual laboratory work in engineering education in the context of digitalization. The didactic advantages of virtual laboratories are considered, such as visibility, accessibility, interactivity, and the possibility of repeated reproduction of the experiment. An example of virtual laboratory work, "Compression testing of materials," is given with a description of the modeling methodology, the use of the DEFORM Viewer software package, and the calculation of the hardening curve. It is shown that virtual laboratories improve the quality of students' training, contribute to the formation of professional competencies, the development of analytical thinking and skills in working with digital tools.

Keywords — compression test, plastic properties, mathematical modeling, mechanical testing, DEFORM Viewer.

**ИНЖЕНЕРЛІК БАҒЫТТАҒЫ СТУДЕНТТЕРДІ ДАЙЫНДАУДА ВИРТУАЛДЫ
ЗЕРТХАНАЛЫҚ ЖҰМЫСТАРДЫ ПАЙДАЛАНУ****^{1*}Ибраева А.Е., ^{2,3}Касымова Г.К., ¹Гуменчук О.Н., ⁴Уразалиева Ұ.Н.**¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан²Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан³Металлургия және кен байыту институты АҚ, Satbayev University, Алматы, Қазақстан⁴SDU University, Қаскелен, Қазақстан**Корреспондент автор e-mail: a.ibrayeva@tttu.edu.kz***Авторлар туралы ақпарат:****Ибраева Акжаркын Елемесовна**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан, e-mail: a.ibrayeva@tttu.edu.kz**Касымова Гулжайна Куралбаевна**, Педагогика және психология факультеті, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті; «Металлургия және Кен байыту институты» АҚ, Satbayev University, Алматы, Қазақстан. ORCID: 0000-0001-7004-3864; e-mail: g.kassymova@satbayev.university**Гуменчук Оксана Николаевна**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан, e-mail: o_gumenchuk@mail.ru**Уразалиева Ұлжан Нұрзатқызы**, PhD докторанты, SDU университеті, Қаскелең, Қазақстан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7517-0555>; e-mail: ulzhan.urazaliyeva@sdu.edu.kz

Аңдатпа — Бұл мақала цифрландыру жағдайында инженерлік білім беруде виртуалды зертханалық жұмыстарды қолданудың педагогикалық және әдістемелік аспектілеріне арналған. Виртуалды зертханалардың көрнекілік, қолжетімділік, интерактивтілік және экспериментті бірнеше рет қайталау мүмкіндігі сияқты

дидактикалық артықшылықтары қарастырылады. «Материалдарды сығуға сынау» виртуалды зертханалық жұмысының үлгісі келтіріліп, модельдеу әдістемесі, DEFORM Viewer бағдарламалық кешенін қолдану және беріктену қисығын есептеу процесі сипатталады. Виртуалды зертханалар студенттердің кәсіби құзыреттерін қалыптастыруға, аналитикалық ойлауын дамытуға және цифрлық құралдармен жұмыс істеу дағдыларын жетілдіруге ықпал етіп, білім сапасын арттыратыны көрсетілген.

Түйін сөздер — сығуға сынау, пластикалық қасиеттер, математикалық модельдеу, механикалық сынақ, DEFORM Viewer.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ В ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

^{1*}Ибраева А.Е., ^{2,3}Касымова Г.К., ¹Гуменчук О.Н., ⁴Уразалиева У.Н.

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан

³Институт металлургии и обогащения, Satbayev University, Алматы, Казахстан

⁴SDU University, Каскелен, Казахстан

*Автор корреспонденции e-mail: alikhangaini34@gmail.com

Информация об авторах:

Ибраева Акжаркын Елемесовна, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: a.ibrayeva@tttu.edu.kz

Касымова Гулжайна Куралбаевна, Факультет педагогики и психологии, Казахский национальный педагогический университет имени Абая; Институт металлургии и обогащения, Satbayev University, Алматы, Казахстан. ORCID: 0000-0001-7004-3864; e-mail: g.kassymova@satbayev.university

Гуменчук Оксана Николаевна, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: o_gumenchuk@mail.ru

Уразалиева Ұлжан Нұрзатқызы, докторант университета СДУ, Каскелен, Казахстан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7517-0555>; e-mail: ulzhan.urazaliyeva@sdu.edu.kz

Аннотация — Данная статья посвящена педагогическим и методическим аспектам использования виртуальных лабораторных работ в инженерном образовании в условиях цифровизации. Рассматриваются дидактические преимущества виртуальных лабораторий, такие как наглядность, доступность, интерактивность и возможность многократного воспроизведения эксперимента. Приведён пример виртуальной лабораторной работы «Испытание материалов на сжатие» с описанием методики моделирования, применения программного комплекса DEFORM Viewer и расчёта кривой упрочнения. Показано, что виртуальные лаборатории повышают качество подготовки студентов, способствуют формированию профессиональных компетенций, развитию аналитического мышления и навыков работы с цифровыми инструментами.

Ключевые слова — испытание на сжатие, пластические свойства, математическое моделирование, механическое испытание, DEFORM Viewer.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Предложена педагогическая модель использования виртуальных лабораторных работ при подготовке студентов инженерных направлений в условиях цифровизации высшего образования. Показано, что применение виртуальных лабораторий на основе программного комплекса DEFORM Viewer обеспечивает формирование профессиональных компетенций, развитие аналитического мышления и навыков работы с современными цифровыми инженерными инструментами. Разработанный подход способствует повышению качества практической подготовки обучающихся, расширяет возможности самостоятельного освоения учебного материала и обеспечивает

безопасное выполнение лабораторных экспериментов при сохранении их научной достоверности.

ВВЕДЕНИЕ

Современная система высшего образования переживает период активной цифровизации, в ходе которой традиционные формы обучения дополняются инновационными технологиями, основанными на моделировании и виртуализации учебного процесса. Одним из наиболее перспективных направлений является внедрение виртуальных лабораторных работ, позволяющих моделировать реальные физические и технологические процессы в цифровой среде.

Переход к цифровым образовательным технологиям продиктован необходимостью обеспечения качества обучения при ограниченных материальных и временных ресурсах. Особенно это актуально для инженерных направлений подготовки, где проведение реальных лабораторных экспериментов требует сложного оборудования, расходных материалов и соблюдения правил техники безопасности. Виртуальные лаборатории позволяют решить эти проблемы, предоставляя студентам возможность выполнять эксперименты в интерактивной и безопасной форме, при этом сохраняя научную достоверность результатов.

Цель данной статьи – рассмотреть педагогические и методические аспекты использования виртуальных лабораторных работ в инженерном образовании, проанализировать их дидактический потенциал и представить пример лабораторной работы «Испытание материалов на сжатие» как эффективного инструмента формирования профессиональных компетенций.

Педагогическая сущность виртуальных лабораторных работ. Педагогика высшей школы рассматривает лабораторные занятия как одну из основных форм практического обучения, направленную на закрепление теоретических знаний и развитие исследовательских умений. В условиях цифровой трансформации образования их логическим продолжением стали виртуальные лаборатории, сочетающие в себе элементы теоретического моделирования, аналитической деятельности и самостоятельного поиска решений.

С точки зрения дидактики, виртуальные лабораторные комплексы реализуют сразу несколько принципов обучения:

- 1) наглядность – за счёт визуализации сложных физических процессов;
- 2) доступность – возможность работы без ограничений времени и пространства;
- 3) активность и самостоятельность – студент сам управляет процессом, анализирует и интерпретирует результаты;
- 4) интеграция теории и практики – теоретические знания сразу применяются в имитационной деятельности.

Использование виртуальных лабораторий способствует формированию компетентного подхода, когда обучение направлено не только на усвоение знаний, но и на развитие профессиональных умений, аналитического мышления, способности принимать решения на основе экспериментальных данных.

Для выполнения виртуальной лабораторной работы используется персональный компьютер

или ноутбук с операционной системой Windows 7, 8, 8.1 или 10 (64-разрядная).

Минимальные технические требования включают:

- не менее 4 ГБ оперативной памяти;
- процессор не ниже уровня Intel Core2Duo;
- свободное пространство на диске не менее 4 ГБ.

В лабораторной работе применяется специализированный программный комплекс DEFORM Viewer v13.0, предназначенный для визуализации процессов пластического деформирования.

Работа выполняется с использованием трёх модулей:

1. проекционного модуля;
2. базы данных лабораторной работы;
3. модуля расчёта кривой упрочнения.

Программный продукт обеспечивает возможность поэтапного моделирования испытания материала на сжатие с фиксацией результатов каждого шага и последующим построением графических зависимостей.

Цель исследования. Целью исследования является теоретическое обоснование и практическая демонстрация возможностей использования виртуальных лабораторных работ в подготовке студентов инженерных направлений, а также оценка их педагогической эффективности в формировании профессиональных компетенций, развитии аналитического мышления и навыков применения современных цифровых инженерных технологий.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Проанализировать современные подходы к использованию виртуальных лабораторных работ в инженерном образовании.
2. Рассмотреть педагогические и дидактические преимущества виртуальных лабораторий в условиях цифровизации высшего образования.
3. Описать методику проведения виртуальной лабораторной работы «Испытание материалов на сжатие» с использованием программного комплекса **DEFORM Viewer**.
4. Показать особенности моделирования механических испытаний и обработки экспериментальных данных в цифровой образовательной среде.
5. Оценить потенциал виртуальных лабораторных работ для формирования

профессиональных компетенций будущих инженеров.

Пробел в исследованиях. Несмотря на широкое распространение цифровых образовательных технологий, большинство исследований посвящено оценке эффективности виртуальных лабораторий в естественно-научных дисциплинах и общим вопросам цифровизации образования. Вместе с тем недостаточно изучены педагогические и методические особенности использования виртуальных лабораторных работ при подготовке студентов инженерных направлений с применением специализированного программного обеспечения для моделирования технологических процессов. Кроме того, ограничено число исследований, рассматривающих виртуальные лаборатории как средство формирования профессиональных компетенций, развития аналитического мышления и практических навыков работы с современными инженерными цифровыми инструментами.

Научная новизна. Научная новизна исследования заключается в разработке и педагогическом обосновании методики проведения виртуальной лабораторной работы «Испытание материалов на сжатие» с использованием программного комплекса DEFORM Viewer. Предложенный подход интегрирует процессы компьютерного моделирования, обработки экспериментальных данных и анализа механических характеристик материалов в единую образовательную среду, обеспечивая формирование профессиональных компетенций будущих инженеров и повышение эффективности практической подготовки в условиях цифровизации высшего образования.

Исследовательские вопросы. Исследование направлено на поиск ответов на следующие вопросы:

RQ1. Какие педагогические преимущества обеспечивает использование виртуальных лабораторных работ при подготовке студентов инженерных направлений?

RQ2. Каким образом применение программного комплекса DEFORM Viewer способствует формированию профессиональных компетенций и развитию аналитического мышления студентов?

RQ3. Насколько использование виртуальных лабораторных работ повышает эффективность практической подготовки будущих инженеров в условиях цифровизации высшего образования?

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Сжатие является одним из основных видов механических испытаний материалов для

определения их прочностных и пластических свойств. Для испытания используются стандартные образцы определенной формы и размеров, регламентированные различными ГОСТами. В данной лабораторной работе будет использоваться цилиндрический образец с диаметром рабочей части 20 мм и длиной 40 мм, определенной по приложению А в соответствии с ГОСТ 25.503-97 - Метод испытания на сжатие для алюминия (образец 3го типа).

Суть испытания на сжатие сводится к следующему. Образец устанавливается на нижнюю плоскую плиту испытательной машины, после чего верхней плоской плите сообщается движение. По мере сжатия образца на его боковой поверхности начинает образовываться утолщение (бочка), при этом также растет диаметр образца в зоне контакта с плитами.

Целью данной работы является построение кривой упрочнения и определение предела текучести испытуемого материала. Кривая упрочнения представляет собой зависимость σ (напряжение течения) – ε (логарифмическая деформация). После ее построения имеется возможность найти предел текучести визуально.

Логарифмическая деформация определяется по формуле:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{h_0}{h_k} \right),$$

где: h_k – длина образца после сжатия;
 h_0 – исходная длина образца.

Напряжение течения определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{F}{A_k}$$

где: A_k – площадь поперечного сечения образца после сжатия;
 F – усилие сжатия, Н.

Ход выполнения лабораторной работы.

Процесс моделирования включает 30 шагов, каждый из которых соответствует уменьшению высоты образца на 1 мм. Для каждого шага фиксируются геометрические параметры и усилия сжатия.

Этапы работы:

1. Установка необходимых модулей и базы данных.
2. Запуск программы DEFORM Viewer и настройка интерфейса.
3. Включение режима отображения всех шагов моделирования.
4. Просмотр процесса деформации образца.
5. Построение и экспорт графика «Сила – Перемещение».

6. Измерение геометрических размеров (высота, диаметр в зоне бочки, диаметр в зоне торца).

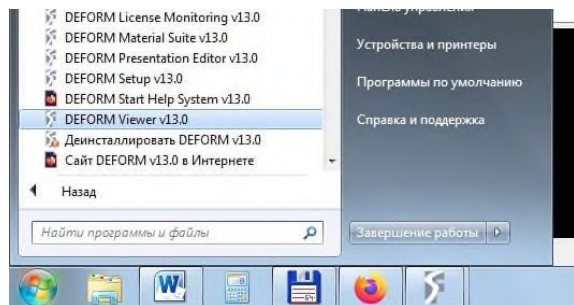


Рисунок 1 – Запуск вьювера из меню Пуск

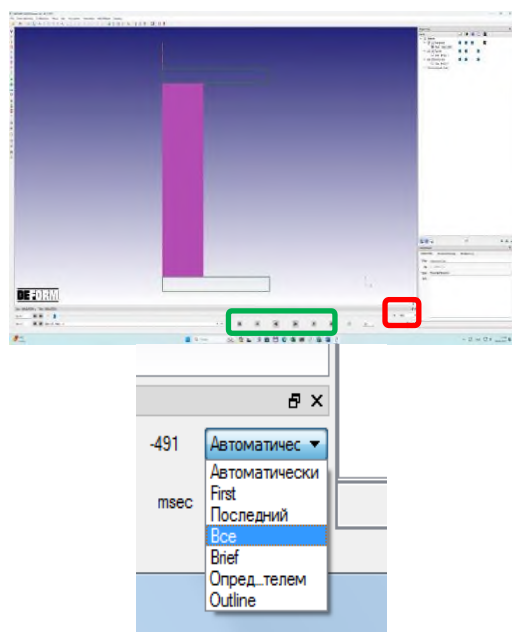


Рисунок 2 – Настройка отображения шагов модели

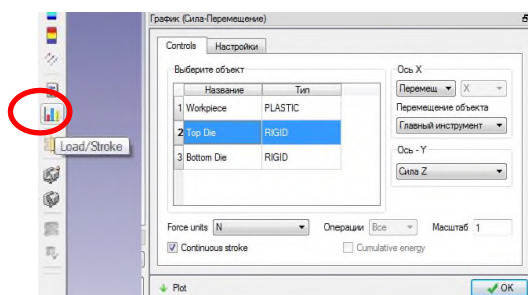


Рисунок 3 – Создание графика усилия

Модель представляет собой осесимметричную модель, т.е. расчет ведется в $\frac{1}{2}$ диаметра заготовки. Для нахождения параметров $\sigma - \epsilon$ необходимо найти определенные геометрические размеры на каждом шаге расчета - диаметр образца в зоне бочки d_{max} , диаметр образца в зоне торца на контакте с плитой dt , а также h_k - длину образца после сжатия.

Для примера найдем данные параметры на 14 шаге. На модели щелкаем правой кнопкой мыши и выбираем «Показать размеры» (рисунок 4а). В результате на заготовке появятся два размера $X = 12,6782$ (Rmax) и $Y = 26,0002$ (hk) (рисунок 4б). Для нахождения R_t на панели сверху выбираем линейку (Measurement Tool) и выделяем длину горизонтальной зоны заготовки на верхней грани (11,3138) (рисунок 4в). Записываем полученные данные в соответствующие столбцы модуля расчета, которые выделены цветами.

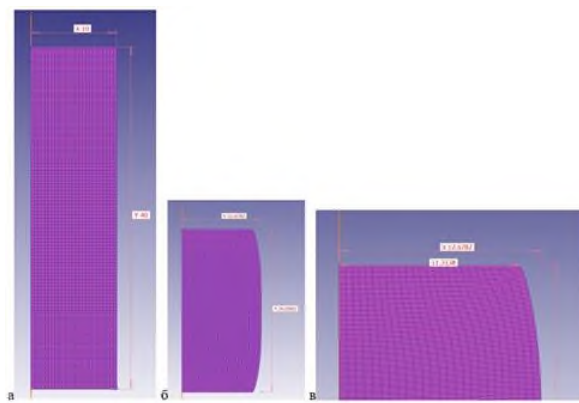


Рисунок 4 – Геометрические размеры для расчета

После ввода всех геометрических размеров и значения усилия, для данного шага будут автоматически рассчитаны показатели $\sigma - \epsilon$ (рисунок 5), после заполнения данных для всех шагов справа будет построена кривая упрочнения алюминия AL1100, по которому будет возможно найти величину предела текучести.

h0, mm	h1, mm	eps	var	F, N	R_max, mm	d_max, mm	R_t, mm	d_t, mm	dk, mm	dk, mm2	sigma
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	0	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	1	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	2	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	3	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	4	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	5	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	6	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	7	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	8	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	9	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	10	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	11	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	12	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	13	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	26,0002	0,43078	14	45465,4	12,6782	25,3564	11,3138	22,6276	23,992	452,088	101,01
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	15	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	16	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	17	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!
40	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	18	0	0	0	0	0	0	0	#ДЕЛ/0!

Рисунок 5 – Ввод данных в модуль расчета

Таким образом, студент не только осваивает методику механических испытаний, но и учится работать с инженерными программами, выполнять математическую обработку данных и анализировать результаты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что использование виртуальной лабораторной работы «Испытание материалов на сжатие» позволяет эффективно интегрировать теоретическую подготовку студентов с практическим освоением методов механических испытаний материалов. Применение программного комплекса DEFORM Viewer обеспечивает визуализацию процессов пластического деформирования, последовательное выполнение этапов моделирования и обработку экспериментальных данных, что способствует более глубокому пониманию физических закономерностей деформации материалов. Полученные результаты согласуются с выводами метаанализа J. Li и W. Liang (2024), который показал, что использование виртуальных лабораторий оказывает статистически значимое положительное влияние на результаты инженерного образования, особенно на учебную мотивацию, вовлечённость студентов и формирование профессиональных компетенций. При этом авторы подчёркивают, что виртуальные лаборатории являются наиболее эффективным дополнением к традиционным практическим занятиям, а не их полной заменой [7].

Полученные результаты подтверждают, что виртуальные лаборатории не заменяют полностью традиционный лабораторный практикум, однако являются его эффективным дополнением. Их использование позволяет повысить доступность практической подготовки, обеспечить безопасное проведение экспериментов, сократить затраты времени на организацию лабораторных занятий и расширить возможности самостоятельной работы студентов. Полученные выводы согласуются с исследованием Н. Pratama, М. Azman, N. Zakaria и М. Khairudin, в котором было показано, что применение цифровых учебных средств на основе программируемых логических контроллеров (PLC) статистически значимо повышает уровень профессиональных компетенций обучающихся и эффективность освоения инженерных дисциплин. Авторы отмечают, что использование современных цифровых средств обучения способствует более глубокому усвоению практических навыков и повышению учебной мотивации студентов [8].

С педагогической точки зрения виртуальная лабораторная работа способствует развитию самостоятельности обучающихся, формированию исследовательских навыков и аналитического мышления. Возможность пошагового анализа процесса деформации, измерения геометрических параметров образца и последующей математической обработки данных формирует у студентов навыки принятия инженерных решений

на основе экспериментальных результатов. Данный результат соответствует подходу, предложенному А. S. Diwakar и S. B. Noronha, которые отмечают, что эффективность виртуальных лабораторий должна оцениваться не только по академической успеваемости студентов, но и по степени достижения образовательных целей инженерной подготовки, включая развитие практических навыков, инженерного мышления и способности применять знания в профессиональной деятельности [9].

ВЫВОДЫ

Проведённое исследование подтвердило высокую образовательную эффективность использования виртуальных лабораторных работ при подготовке студентов инженерных направлений в условиях цифровизации высшего образования. Разработанная методика проведения лабораторной работы «Испытание материалов на сжатие» с использованием программного комплекса DEFORM Viewer обеспечивает интеграцию теоретических знаний и практической деятельности, способствует развитию аналитического мышления, исследовательских навыков и профессиональных компетенций будущих инженеров.

Установлено, что применение виртуальных лабораторий позволяет повысить доступность практического обучения, обеспечить безопасное выполнение инженерных экспериментов, сократить материальные затраты на проведение лабораторных занятий и предоставить обучающимся возможность многократного повторения экспериментов для более глубокого освоения учебного материала. Использование компьютерного моделирования также способствует формированию навыков работы с современными цифровыми инженерными технологиями, востребованными в профессиональной деятельности. Виртуальные лаборатории в педагогическом процессе решают ряд дидактических задач:

1. повышение мотивации обучающихся за счёт интерактивности;
2. формирование практических навыков в условиях безопасной среды;
3. развитие аналитического и критического мышления;
4. реализация принципа наглядности и доступности знаний.

С педагогической точки зрения, подобная форма работы способствует переходу от пассивного восприятия информации к активной деятельности обучающегося. Преподаватель при этом выступает не как источник знаний, а как

тьютор, направляющий процесс самостоятельного поиска решения.

Кроме того, использование таких виртуальных лабораторий согласуется с компетентным подходом, требующим формирования у студентов не только знаний, но и практических умений, готовности применять их в профессиональной деятельности.

Результаты внедрения виртуальных лабораторий в учебный процесс показывают:

1. сокращение времени на подготовку к эксперименту;
2. возможность неоднократного повторения опыта для закрепления материала;
3. развитие навыков самообучения и работы с цифровыми инструментами;
4. повышение уровня усвоения теоретических знаний за счёт визуализации физических процессов.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предложенной методики при реализации образовательных программ инженерного профиля в высших учебных заведениях, особенно в условиях ограниченного доступа к дорогостоящему лабораторному оборудованию и необходимости расширения цифровой образовательной среды. В дальнейшем целесообразно провести экспериментальные педагогические исследования с участием обучающихся различных инженерных специальностей, позволяющие количественно оценить влияние виртуальных лабораторий на академическую успеваемость, уровень сформированности профессиональных компетенций и развитие цифровых навыков студентов. Таким образом, виртуальные лабораторные работы можно рассматривать как инновационную форму интеграции теории и практики в системе высшего инженерного образования.

ВКЛАД АВТОРОВ (таксономия CRediT):

А.Е. Ибраева: научное консультирование, концептуализация исследования, разработка методологии, проведение исследования,

разработка и описание виртуальной лабораторной работы, анализ результатов, написание первоначального варианта рукописи.

Г.К. Касимова: формальный анализ, интерпретация результатов исследования, и научное редактирование рукописи.

О.Н. Гуменчук: разработка методических материалов, валидация результатов исследования, визуализация материалов, анализ литературы.

У.Н. Уразалиева: рецензирование и редактирование рукописи, подготовка окончательной версии статьи. Все авторы ознакомились с окончательной версией статьи, одобрили её к публикации и несут ответственность за достоверность представленных результатов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность НАО «Карагандинский индустриальный университет» за организационную и научно-методическую поддержку исследования, а также Институту металлургии и обогащения АО за содействие в развитии инженерного образования и поддержку при подготовке настоящей статьи.

Авторское право © 2026 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение материала в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения аналогичной лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ГОСТ 25.503–97, Расчёт и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. Moscow, Russia: Издательство стандартов, 1999.
- [2] B. J. Goodno and J. M. Gere, Mechanics of Materials, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2021.
- [3] L. E. Reut, Kurs lektsiy i prakticheskikh zanyatij po distsipline «Mekhanika materialov. Rastyazheniye–szhatiye»: Uchebno-metodicheskoye posobiye dlya studentov mashinostroitel'nykh spetsial'nostey. Minsk, Belarus: BNTU, 2011.

- [4] V. R. Kargin, F. V. Grechnikov, and A. G. Shlyapugin, *Modelirovaniye protsessov OMD*. Samara, Russia: Samara State Aerospace University, 2013.
- [5] G. M. Andreeva, *Pedagogika vysshey shkoly: Innovatsionnyye tekhnologii obucheniya*. Moscow, Russia: Akademiya, 2019.
- [6] P. I. Pidkasistyy, *Pedagogika i psikhologiya vysshey shkoly*. Moscow, Russia: Yurayt, 2020.
- [7] J. Li and W. Liang, "Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis," *PLOS ONE*, vol. 19, no. 12, Art. no. e0316269, Dec. 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0316269.
- [8] H. Pratama, M. N. A. Azman, N. A. Zakaria, and M. Khairudin, "The effectiveness of the kit portable PLC on electrical motors course among vocational school students in Aceh, Indonesia," *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources*, vol. 320, no. 1, pp. 75–87, 2022, doi: 10.31643/2022/6445.09.
- [9] A. S. Diwakar and S. B. Noronha, "The effectiveness of virtual labs in engineering education—What do we measure?," *Journal of Engineering Education Transformations*, vol. 30, no. 1, pp. 73–81, Jul. 2016.

REFERENCES

- [1] GOST 25.503–97, *Raschet i ispytaniya na prochnost'. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Metod ispytaniya na szhatiye* [Strength calculation and testing. Mechanical testing methods for metals. Compression test method]. Moscow, Russia: Izdatel'stvo Standartov, 1999. (In Russian).
- [2] B. J. Goodno and J. M. Gere, *Mechanics of Materials*, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2021.
- [3] L. E. Reut, *Kurs lektsiy i prakticheskikh zanyatiy po distsipline «Mekhanika materialov. Rastyazheniye–szhatiye»: uchebno-metodicheskoye posobiye dlya studentov mashinostroitel'nykh spetsial'nostey* [Course of lectures and practical classes in "Mechanics of Materials. Tension–Compression": Study guide for mechanical engineering students]. Minsk, Belarus: Belarusian National Technical University, 2011. (In Russian).
- [4] V. R. Kargin, F. V. Grechnikov, and A. G. Shlyapugin, *Modelirovaniye protsessov OMD* [Modeling of Metal Forming Processes]. Samara, Russia: Samara State Aerospace University, 2013. (In Russian).
- [5] G. M. Andreeva, *Pedagogika vysshey shkoly: innovatsionnyye tekhnologii obucheniya* [Higher Education Pedagogy: Innovative Teaching Technologies]. Moscow, Russia: Akademiya, 2019. (In Russian).
- [6] P. I. Pidkasistyy, *Pedagogika i psikhologiya vysshey shkoly* [Pedagogy and Psychology of Higher Education]. Moscow, Russia: Yurayt, 2020. (In Russian).
- [7] J. Li and W. Liang, "Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis," *PLOS ONE*, vol. 19, no. 12, Art. no. e0316269, Dec. 2024. doi: 10.1371/journal.pone.0316269.
- [8] H. Pratama, M. N. A. Azman, N. A. Zakaria, and M. Khairudin, "The effectiveness of the kit portable PLC on electrical motors course among vocational school students in Aceh, Indonesia," *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources*, vol. 320, no. 1, pp. 75–87, 2022. doi: 10.31643/2022/6445.09.
- [9] A. S. Diwakar and S. B. Noronha, "The effectiveness of virtual labs in engineering education—What do we measure?," *Journal of Engineering Education Transformations*, vol. 30, no. 1, pp. 73–81, Jul. 2016.

Машина жасау, технологиялық машиналар және көлік, құрылысDOI: <https://doi.org/10.53002/094>**INNOVATIVE METHODS OF RESTORATION OF PIPELINE SYSTEMS: THE USE OF POLYMER-COMPOSITE SLEEVES-LINERS THAT HARDEN WITH ULTRAVIOLET****Yurchenko V.V.***NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, Karaganda, Kazakhstan***Corresponding author e-mail: v.yurchenko@kstu.kz***Author information:****Yurchenko Vasily Viktorovich**, NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: v.yurchenko@kstu.kz

Abstract — The article is devoted to the study of modern methods of pipe restoration with an emphasis on the technology of restoration using polymer-composite sleeve liners that self-harden under the influence of ultraviolet radiation. The features of this technology, its advantages and areas of application, including water supply, sewerage and industrial networks, are considered. Particular attention is paid to environmental and economic aspects, as well as to the analysis of factors influencing the choice of recovery method. The steps of the restoration process are presented, which include pre-cleaning, installation of lining and treatment, which ensures the strength and reliability of engineering systems. The results of the study can be used to optimize pipeline repair methods in dense urban areas and difficult working conditions.

Keywords — pipes, recovery, sleeve lining, ultraviolet radiation, recovery, corrosion, hydraulic characteristics, engineering networks, environmental safety, economic efficiency.

ҚҰБЫР ЖҮЙЕЛЕРІН ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУДІҢ ИННОВАЦИЯЛЫҚ ӘДІСТЕРІ: УЛЬТРАКҮЛГІНМЕН ҚАТАЯТЫН ПОЛИМЕР-КОМПОЗИТТІ ГИЛЬЗА-ЛАЙНЕРЛЕРДІ ҚОЛДАНУ**Юрченко В.В.***«Ә.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қарағанды, Қазақстан***Автор-корреспондент e-mail: v.yurchenko@kstu.kz***Автор туралы ақпарат:****Юрченко Василий Викторович**, «Ә.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қарағанды, Қазақстан, e-mail: v.yurchenko@kstu.kz

Аңдатпа — Мақала ультракүлгін сәулеленудің әсерінен өздігінен қататын полимерлі-композитті гильза төсеніштерін қолдану арқылы қалпына келтіру технологиясына баса назар аудара отырып, құбырларды қалпына келтірудің заманауи әдістерін зерттеуге арналған. Бұл технологияның ерекшеліктері, оның артықшылықтары мен қолдану аймақтары, соның ішінде сумен жабдықтау, канализация және өнеркәсіптік желілер қарастырылады. Экологиялық және экономикалық аспектілерге, сондай-ақ қалпына келтіру әдісін таңдауға әсер ететін факторларды талдауға ерекше назар аударылады. Инженерлік жүйелердің беріктігі мен сенімділігін қамтамасыз ететін алдын ала тазалауды, төсемді орнатуды және емдеуді қамтитын қалпына келтіру процесінің қадамдары ұсынылған. Зерттеу нәтижелері тығыз қалалық жерлерде және қиын жұмыс жағдайында құбырларды жөндеу әдістерін оңтайландыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер — құбырлар, қалпына келтіру, гильзалық төсем, ультракүлгін сәулелену, қалпына келтіру, коррозия, гидравликалық сипаттамалар, инженерлік желілер, экологиялық қауіпсіздік, экономикалық тиімділік.

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРУБНЫХ СИСТЕМ: ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИТНЫХ ГИЛЬЗ-ЛАЙНЕРОВ С УФ-ОТВЕРЖДЕНИЕМ

Юрченко В.В.

НАО «Қарағандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Қарағанда, Қазақстан

*Автор-корреспондент e-mail: v.yurchenko@kstu.kz

Информация об авторе:

Юрченко Василий Викторович, НАО «Қарағандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Қарағанда, Қазақстан, e-mail: v.yurchenko@kstu.kz

Аннотация — Статья посвящена изучению современных методов восстановления труб с упором на технологию восстановления с использованием полимерно-композитных гильзовых матов, которые самопроизвольно затвердевают под воздействием ультрафиолетового излучения. Рассматриваются особенности данной технологии, ее преимущества и области применения, включая водоснабжение, канализацию и промышленные сети. Особое внимание уделяется экологическим и экономическим аспектам, а также анализу факторов, влияющих на выбор метода восстановления. Предложены этапы процесса восстановления, которые включают предварительную очистку, установку и отверждение асфальтоукладчика, что обеспечивает прочность и надежность инженерных систем. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации методов ремонта трубопроводов в густонаселенных городских районах и в сложных рабочих условиях.

Ключевые слова — трубы, восстановление, гильзовая прокладка, ультрафиолетовое излучение, восстановление, коррозия, гидравлические характеристики, инженерные сети, экологическая безопасность, экономическая эффективность.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Мақалада құбыр желілерін қазусыз қалпына келтірудің заманауи технологияларына талдау жүргізіліп, ультракүлгін сәулелену әсерінен қатайтылатын полимерлі-композиттік лайнер-гильзаларды қолдану әдісінің ерекшеліктері қарастырылды. Технологияның инженерлік, экономикалық және экологиялық артықшылықтары бағаланып, оны пайдалану тиімділігіне әсер ететін негізгі факторлар жүйеленді. Полимерлі-композиттік лайнерлерді қолдану құбырлардың пайдалану мерзімін ұзартуға, жөндеу жұмыстарының ұзақтығы мен құнын төмендетуге, гидравликалық сипаттамаларды жақсартуға және қоршаған ортаға түсетін әсерді азайтуға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Сонымен қатар бұл технологияның тығыз қалалық құрылыс жағдайында және инженерлік коммуникациялары күрделі учаскелерде қолдануға жоғары тиімділігі негізделді.

КІРІСПЕ

Қазіргі заманғы инженерлік желілер экономиканың әртүрлі салаларының үздіксіз жұмысын және халықтың өмірін қамтамасыз етуді қамтамасыз ететін инфрақұрылымның негізгі элементтері болып табылады [1-3].

Канализация жүйелерін, мұнай, газ, су және технологиялық құбырларды салу үшін ең көп

таралған материал көміртекті және төмен легирленген болат болып табылады, сонымен қатар шойыннан, бетоннан және басқа материалдардан жасалған құбырлар қолданылады; Бұл материалдар жұмыс кезінде коррозияға және ішкі шөгінділерге жоғары төзімділікке ие емес [4].

Зерттеудің маңыздылығы. Инженерлік құбыр жүйелерінің едәуір бөлігі ұзақ уақыт пайдаланылуына байланысты коррозияға, абразивті тозуға және ішкі шөгінділердің жиналуына ұшырайды. Дәстүрлі жөндеу әдістері көп жағдайда жер қазу жұмыстарының үлкен көлемін, жоғары қаржылық шығындарды және инфрақұрылым жұмысының уақытша тоқтатылуын талап етеді. Осыған байланысты құбырларды қазусыз қалпына келтіру технологиялары ерекше өзектілікке ие. Ультракүлгін сәулемен қатайтылатын полимерлі-композиттік лайнер-гильзаларды пайдалану жөндеу мерзімін қысқартуға, инженерлік желілердің қызмет ету мерзімін ұзартуға, пайдалану шығындарын азайтуға және қоршаған ортаға әсерді төмендетуге мүмкіндік береді.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы ультракүлгін сәулелену әсерінен қатайтылатын полимерлі-композиттік лайнер-гильзаларды пайдалану технологиясының техникалық және пайдалану ерекшеліктерін кешенді бағалауда жатыр. Технологияны

қолданудың негізгі артықшылықтары жүйеленіп, оны инженерлік желілердің әртүрлі түрлерінде пайдалану мүмкіндіктері айқындалды. Сонымен қатар лайнердің геометриялық параметрлерін таңдау кезінде құбырдың техникалық жағдайын, жұмыс қысымын және пайдалану ортасының ерекшеліктерін ескерудің маңыздылығы көрсетілді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Ағынды суларды қысымды кәріз және, атап айтқанда, гравитациялық кәріз желілері арқылы тасымалдау кезінде құбыр қабырғалары ағынды сулардың құрамындағы газдар мен агрессивті орталардың әсеріне ұшырайды, бұл қабырғалардың бұзылуына әкеледі, кейіннен ағып кетуге және нәтижесінде төтенше жағдайларға әкеледі.

Тасымалданатын орта қаттылық тұздарымен, асфальт-парафинді қосылыстармен, коррозиялық қоспалармен және механикалық қоспалармен қаныққан жағдайда құбырлар қабырғалардың айтарлықтай коррозиясына, абразивті тозуға және ішкі бетінде шөгінділерге ұшырайды. Құбыр қабырғаларының коррозиясы құбырдың

герметикалығын жоғалтуға, тасымалданатын ортаның ағып кетуіне әкеледі, бұл адам өмірінің қауіпсіздігіне және қоршаған ортаның ластануына қауіп төндіреді.

Құбырлардың ішкі бетіндегі шөгінділер тасымалданатын ортаның гидравликалық кедергісінің жоғарылауына әкеледі, бұл сорғы және технологиялық жабдықтың жүктемесін арттырады. Кейіннен шөгінділер құбырлардың толық бітелуіне әкелуі мүмкін, бұл технологиялық жабдықтың істен шығуымен және қоршаған ортаға және адамдарға теріс әсер ететін төтенше жағдайлардың туындауымен жүретін ортаны тасымалдау процесінің толық тоқтауына әкеледі [5].

Құбырлардың жұмысы, әсіресе агрессивті ортада және жоғары жүктемелерде, олардың бірте-бірте тозуымен бірге жүреді, бұл пайдалану сипаттамаларын төмендетеді және авария қаупін арттырады (Сурет 1).

Бұл мәселелер, әсіресе, ауқымды жөндеу үшін шектеулі мүмкіндіктер қалпына келтірудің инновациялық технологияларын қолдануды талап ететін қалалық орталарда өзекті болып табылады.



Сурет 1 – Шөгінділер мен коррозиямен құбырдың ішкі бетінің кимасы.

Полимерлі материалдар агрессивті орта мен тұз шөгінділеріне ең жақсы төзімділікке ие. Алайда, тығыз қала құрылысының тар жағдайларына немесе байланысты және/немесе қиылысатын коммуникациялардың қанықтылығына байланысты болат, шойын, бетон және басқа құбырларды полимерлік құбырларға ауыстыру көбінесе техникалық қиын және экономикалық тиімсіз.

Мұндай жағдайларда құбырларды жөндеудің, функционалдығын қалпына келтірудің және қызмет ету мерзімін ұзартудың ең тиімді жолы әртүрлі қалпына келтіру әдістерін қолдану болып табылады - құбыр қабырғаларының коррозиясын және ішкі

бетіндегі шөгінділерді болдырмайтын жабындарды қолдану арқылы ішкі бетті қорғау.

Құбырларды қалпына келтіру инженерлік жүйелердің қызмет ету мерзімін ұзартуға, шығындарды азайтуға және жөндеу және қалпына келтіру жұмыстарына қажетті уақытты қысқартуға тиімді тәсіл болып табылады. Қолданыстағы әдістердің ішінде полимер-композиттік материалдарды қолдануға негізделген технологиялар ерекше назар аударады. Перспективті шешімдердің бірі электромагниттік (ультракүлгін) сәулеленудің әсерінен өздігінен қатайтатын полимерлі-композициялық лайнер гильзаларын пайдалану болып табылады. Бұл әдіс сенімділікті,

үнемділікті және экологиялық қауіпсіздікті біріктіреді, бұл оны қолданудың әртүрлі салаларында сұранысқа ие етеді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Бұл мақалада полимерлі-композитті төсеніш гильзаларын қолдану арқылы құбырларды қалпына келтіру әдісінің ерекшеліктері мен артықшылықтары қарастырылады, сонымен қатар құбыр жүйесінің күйіне және оның жұмыс жағдайларына байланысты технологияны таңдауды анықтайтын факторларға талдау жасалады. Зерттеу ең аз шығындармен және қоршаған ортаға теріс әсер ететін инженерлік желілердің ұзақ мерзімділігін арттырудың оңтайлы шешімдерін анықтауға бағытталған.

Халықаралық классификацияға сәйкес құбырларды қалпына келтіруге арналған ішкі қорғаныс жабындары келесі түрде жасалуы мүмкін [6]:

1. коррозиядан қорғайтын және жақсартылған гидравликалық өнімділікті қамтамасыз ететін шашырау қабаттары,

2. құбырдың бүкіл ұзындығы бойынша бір қорғаныс қабатын жасайтын үздіксіз жабындар;

3. конструкцияның қосымша беріктігі мен тығыздығын қамтамасыз ететін спиральды қаптамалар;

4. жекелеген ақаулы аймақтарды жөндеу үшін қолданылатын нүктелік (жергілікті) жабындар.

Құбыр желілерін қалпына келтіруге арналған қолданыстағы технологиялардың кең спектрінің ішінде ең көп таралғандарын бөліп көрсету керек:

1. Ішкі бетті цемент-құм қоспасымен қаптау. Бұл әдіс коррозияға ұшыраған құбырларды

қалпына келтіру үшін қолданылады. Қаптау құбыр қабырғаларының одан әрі бұзылуына жол бермейтін және оның жұмыс сипаттамаларын жақсартатын қорғаныс қабатын жасайды.

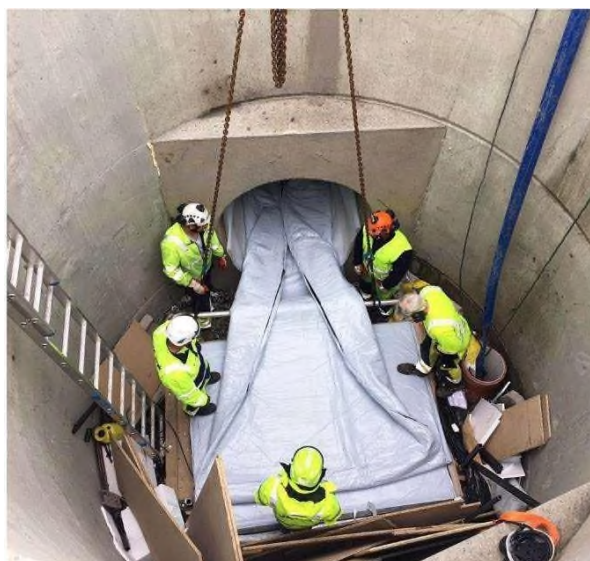
2. Тозғанның ішіне жаңа полиэтилен құбырын тарту. Бұл технологияның екі нұсқасы бар: ескі құбырды бұзумен және онсыз. Бірінші жағдайда, жаңа құбырды тарту алдында ескі құбырды жою үшін пневматикалық соққылар сияқты арнайы механизмдер қолданылады. Екінші жағдайда, жаңа құбыр гидрооқшаулағыш және тығыздау функцияларын орындайтын бұрыннан бар құбырдың ішіне орналастырылады.

3. Серпімді полимер құбыр арқылы тарту. Бұл әдіс алдын ала бүктелген немесе тартылған құбырды пайдалануды қамтиды, ол қалпына келтірілетін құбырдың ішіне орнатқаннан кейін қажетті пішінді алады. Бұл жер қазу жұмыстарына кететін шығындарды барынша азайтуға мүмкіндік береді және жұмысты аяқтауға кететін уақытты қысқартады.

4. Тісті жабыстырғыш құрылымы бар қаңылтыр материалдан жасалған серпімді компоненттерді пайдалану. Бұл тәсіл құбырдың учаскелерін жылдам және сенімді қалпына келтіруге, берік және берік байланыстарды жасауға мүмкіндік береді.

5. Серпімді құрама жеңдерді қолдану. Бұл гильзалар бар құбырдың ішінде жаңа композиттік құбыр жасайды. Олар жоғары беріктікке, төзімділікке және агрессивті ортаға төзімділікке ие.

6. Тар орамды ораманы қолдану. Бұл әдіс тозған құбырдың ішкі бетіне оралып, жаңа қорғаныс қабатын жасайтын шексіз профильді таспаларды қолдануды қамтиды.



Сурет 2 – Электромагниттік (ультрақұлгін) сәулеленудің әсерінен өзін-өзі емдейтін полимерлі-композитті жеңді төсемді қолдану арқылы қалпына келтіру әдісі.

Манжеттерді қолданатын әдістердің бірі құбырларды қалпына келтірудің қазіргі заманғы инновациялық технологияларына жататын электромагниттік (ультракүлгін) сәулелену әсерінен өздігінен қатаю, полимер-композициялық лайнер гильзасымен құбырларды қалпына келтіру (Сурет 2).

Әдістің ерекшеліктері:

1. Ультракүлгін сәулеленуді пайдалану материалдың қатаю уақытын айтарлықтай қысқартуға мүмкіндік береді.
2. Полимерлі-композиттік гильза механикалық және химиялық әсерлерге төзімді қабат жасайды, құбырдың қызмет ету мерзімін арттырады.
3. Технология ауқымды қазба жұмыстарын қажет етпейді, бұл оны тығыз қалалық жерлерде пайдалану үшін өте қолайлы етеді.
4. Әдіс әртүрлі мақсаттарға арналған құбырларды қалпына келтіруге жарамды, соның ішінде сумен жабдықтау, кәріз және өндірістік желілер.
5. Технологияның икемділігі мен бейімділігі оны қол жетімділігі шектеулі қиын аймақтарда да қолдануға мүмкіндік береді.

Полимерлі композициялық жеңді лайнерді қалпына келтіру әдісінің артықшылықтары:

1. Жең қатайғаннан кейін өздігінен жүретін құрылымның жоғары беріктігі,
 2. Басқа әдістермен салыстырғанда гильзаның ең аз қалыңдығына байланысты қалпына келтіруден кейін құбырдың көлденең қимасының минималды қысқаруы,
 3. Зауыттық дизайнға орнатуға толығымен дайын өнімді жеткізу,
 4. Монтаждау жұмыстарының жоғары жылдамдығы (8-14 сағатта 100 м),
 5. Тегіс ішкі беті ағынның сырғуын жақсартады,
 6. Құбырлардың кез келген пішіні мен қимасын пайдалану мүмкіндігі,
- Тікелей гильзаның сыртқы диаметрі мен қабырғасының қалыңдығы құбырдың геометриялық өлшемдеріне, сондай-ақ егер бар болса, жер асты суларының деңгейіне сәйкес таңдалады [7]. Параметрлерді таңдау дұрыстығы есептеу арқылы расталады (Сурет 3).



Сурет 3 – Электромагниттік (ультракүлгін) сәулелену әсерінен өздігінен қатайтатын лайнер гильзасымен қалпына келтіруден кейінгі құбырдың ішкі беті.

Полимерлі-композиттік гильзаларды қолдану арқылы қалпына келтіру сияқты инновациялық әдістерді қолдану инженерлік желілерді қайта құру саласында жаңа перспективалар ашады. Әрі қарайғы зерттеулер технологияны оңтайландыруға, беріктігін арттыру үшін жаңа материалдарды әзірлеуге және әдістерді әртүрлі жұмыс жағдайларына бейімдеуге бағытталған.

Бұл тәсілдер инженерлік жүйелердің сенімділігі мен ұзақ мерзімділігін қамтамасыз етеді, шығындарды барынша азайтады және жұмысты

аяқтауға кететін уақытты қысқартады, бұл әсіресе тығыз қалалық жерлерде маңызды [8-10].

ҚОРЫТЫНДЫ

Мақалада қарастырылған құбырларды қалпына келтірудің заманауи технологиялары күрделі пайдалану талаптарында жоғары тиімділікті көрсетеді. Ультракүлгін сәулеленудің әсерінен өздігінен қатайтатын полимерлі-композициялық гильза төсеніштерін пайдалану әдісіне ерекше назар аударылады.

Әдістің артықшылықтарын талдау, оның ішінде оның экологиялық қауіпсіздігі, жұмысты

аяқтауға кететін уақытты қысқарту және қолданудың әмбебаптығы оны әртүрлі мақсаттарда инженерлік жүйелерде пайдалану перспективаларын растайды. Технологияны енгізудің ұсынылған кезеңдері, лайнер гильзаларын тазалаудан бастап емдеуге дейін, оны әртүрлі жұмыс жағдайларына, соның ішінде қолжетімділігі шектеулі қалалық желілерге бейімдеуге мүмкіндік береді.

Болашақ зерттеулер осы әдісті оңтайландыруға, қасиеттері жақсартылған жаңа композиттік материалдарды әзірлеуге және коррозияның жоғары жағдайында және күрделі климаттық жағдайларда пайдалану үшін технологияларды бейімдеуге бағытталады. Бұл міндеттерді іске асыру инфрақұрылымдық жүйелердің тиімділігін және олардың сыртқы әсерлерге төзімділігін арттыруға ықпал етеді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Автор осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Авторлар осы зерттеуді орындау кезінде сыртқы қаржыландырудың жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС

Автор қолжазбаны мұқият қарастырып, мақаланың мазмұны мен сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік берген құнды ескертулері мен ұсынымдары үшін журналдың редакторы мен рецензентіне шынайы алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. *Manufacturing Engineering and Technology*, 8th ed. Pearson, 2023.
- [2] Najafi, M. *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*, 2nd ed. McGraw-Hill, 2022.
- [3] Stein, D. (Ed.). *Rehabilitation and Renovation of Pipelines*. Wiley, 2022.
- [4] Matthews, J., & Allouche, E. *Cured-in-Place Pipe (CIPP): Design, Materials and Installation Technologies*. ASCE Press, 2023.
- [5] Wang, Y., Li, X., Zhang, H., et al. "Recent Advances in UV-Cured Glass-Fiber Reinforced Composite Liners for Trenchless Pipeline Rehabilitation." *Construction and Building Materials*, vol. 381, 2023, Art. 131282.
- [6] Zhang, Y., Chen, Z., Liu, H., et al. "Performance Evaluation of UV-Cured Composite Liners for Water Distribution Pipelines." *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 139, 2024, Art. 105214.
- [7] Zhao, L., Wang, Q., & Li, J. "Mechanical Performance and Durability of UV-Cured Glass Fiber Reinforced Composite Liners." *Composite Structures*, vol. 337, 2024, Art. 118216.
- [8] ASTM F2019-22. *Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Pulled-in-Place Installation of Glass Reinforced Plastic (GRP) Cured-in-Place Thermosetting Resin Pipe (CIPP)*. ASTM International, 2022.
- [9] ISO 11296-4:2023. *Plastics Piping Systems for Renovation of Underground Non-pressure Drainage and Sewerage Networks — Part 4: Lining with Cured-in-Place Pipes*. ISO, 2023.
- [10] EN ISO 11295:2023. *Classification and Information on Design and Applications of Plastics Piping Systems Used for Renovation and Replacement*. ISO, 2023.

REFERENCES

- [1] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. *Manufacturing Engineering and Technology*, 8th ed. Pearson, 2023.
- [2] Najafi, M. *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*, 2nd ed. McGraw-Hill, 2022.
- [3] Stein, D. (Ed.). *Rehabilitation and Renovation of Pipelines*. Wiley, 2022.
- [4] Matthews, J., & Allouche, E. *Cured-in-Place Pipe (CIPP): Design, Materials and Installation Technologies*. ASCE Press, 2023.
- [5] Wang, Y., Li, X., Zhang, H., et al. "Recent Advances in UV-Cured Glass-Fiber Reinforced Composite Liners for Trenchless Pipeline Rehabilitation." *Construction and Building Materials*, vol. 381, 2023, Art. 131282.
- [6] Zhang, Y., Chen, Z., Liu, H., et al. "Performance Evaluation of UV-Cured Composite Liners for Water Distribution Pipelines." *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 139, 2024, Art. 105214.

- [7] Zhao, L., Wang, Q., & Li, J. "Mechanical Performance and Durability of UV-Cured Glass Fiber Reinforced Composite Liners." *Composite Structures*, vol. 337, 2024, Art. 118216.
- [8] ASTM F2019-22. *Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Pulled-in-Place Installation of Glass Reinforced Plastic (GRP) Cured-in-Place Thermosetting Resin Pipe (CIPP)*. ASTM International, 2022.
- [9] ISO 11296-4:2023. *Plastics Piping Systems for Renovation of Underground Non-pressure Drainage and Sewerage Networks — Part 4: Lining with Cured-in-Place Pipes*. ISO, 2023.
- [10] EN ISO 11295:2023. *Classification and Information on Design and Applications of Plastics Piping Systems Used for Renovation and Replacement*. ISO, 2023.

Машина жасау, технологиялық машиналар және көлік, құрылыс

DOI: <https://doi.org/10.53002/095>

TOOL TRAJECTORY PLANNING AND PERFORMANCE OPTIMIZATION OF CNC MACHINE TOOLS, TAKING INTO ACCOUNT TIME EFFICIENCY

Arkabayev U.

NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, Karaganda, Kazakhstan

**Corresponding author e-mail: usen_0496@mail.ru*

Author information:

Arkabayev Ussen, NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, Karaganda, Kazakhstan,

e-mail: usen_0496@mail.ru

Abstract — This study considers the optimization of processing time on CNC milling machines, which is achieved by changing machine parameters and tool trajectories. Using version 3.1.0 of ICAM3D, this approach aims to reduce processing time while maintaining workflow constraints. In addition, a new method of G-code optimization is proposed, which is aimed at reducing processing time, but maintaining the required accuracy and quality of the finished product. We offer a method that combines advanced algorithms that detect and eliminate excess movements, optimize tool trajectories, and improve processing strategies. Experimental results show that without reducing the processing accuracy, the processing time can be greatly reduced, which can save significant cost for industrial applications and improve efficiency. The importance of this work lies in the correct choice of the trajectory of the tool. In the P3 project, the optimization process reduced the processing time from 15 minutes 23 seconds to 13 minutes 33 seconds by improving the G-code. The initial processing time was 20 minutes and 2 seconds, which coincides with the completion time of the P3 project under the condition of the CNC machine tool working at 75% speed. To further increase efficiency, additional software tools such as ARTCAM and ASPIRE were used to implement a new tool trajectory strategy.

Keywords — recovery, sleeve lining, ultraviolet radiation, recovery, corrosion, hydraulic characteristics, engineering networks, economic efficiency.

УАҚЫТ ТИІМДІЛІГІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ҚҰРАЛ ТРАЕКТОРИЯСЫН ЖОСПАРЛАУ ЖӘНЕ CNC СТАНОКТАРЫНЫҢ ӨНІМДІЛІГІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аркабаев У.Б.

«Ә.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қарағанды, Қазақстан

**Автор-корреспондент e-mail: usen_0496@mail.ru*

Автор туралы ақпарат:

Аркабаев Усен Бекжанович, «Ә.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қарағанды,

Қазақстан, e-mail: usen_0496@mail.ru

Аңдатпа — Бұл зерттеу CNC фрезерлеу станоктарында өңдеу уақытын оңтайландыруды қарастырады, оған машина параметрлері мен құрал траекторияларын өзгерту арқылы қол жеткізіледі. ICAM3D бағдарламасының 3.1.0 нұсқасын қолдана отырып, бұл тәсіл өңдеу уақытын азайтуды мақсат етеді, сонымен бірге жұмыс процесінің шектеулерін сақтайды. Сонымен қатар, G-кодты оңтайландырудың жаңа әдісі ұсынылады, ол өңдеу уақытын қысқартуға бағытталған, бірақ дайын өнімнің қажетті дәлдігі мен сапасын сақтайды. Біз артық қозғалыстарды анықтап, жоятын, құрал траекторияларын оңтайландыратын және өңдеу стратегияларын жақсартатын жетілдірілген алгоритмдерді біріктіретін әдісті ұсынамыз. Эксперименттік нәтижелер көрсеткендей, өңдеу дәлдігін төмендетпей, өңдеу уақытын едәуір қысқартуға болады, бұл өнеркәсіптік қолданбалар үшін айтарлықтай шығын үнемдеуге және тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Бұл жұмыстың маңыздылығы құрал траекториясын дұрыс таңдауда жатыр. P3 жобасында оңтайландыру процесі G-кодты жетілдіру арқылы өңдеу уақытын 15 минут 23 секундтан 13 минут 33 секундқа дейін қысқартты. Бастапқы өңдеу уақыты 20 минут 2 секундты құрады, бұл CNC станогының 75% жылдамдықта жұмыс істеу жағдайында P3 жобасын аяқтау уақытымен сәйкес келеді. Тиімділікті одан әрі арттыру үшін ARTCAM және ASPIRE сияқты қосымша бағдарламалық құралдар жаңа құрал траекториясы стратегиясын енгізу үшін пайдаланылды.

Түйін сөздер — қалпына келтіру, гильзалық төсем, ультракүлгін сәулелену, қалпына келтіру, коррозия, гидравликалық сипаттамалар, инженерлік желілер, экономикалық тиімділік.

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ИНСТРУМЕНТА С УЧЕТОМ ВРЕМЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СТАНКОВ С ЧПУ

Аркабаев У.Б.

НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: usen_0496@mail.ru*

Информация об авторе:

Аркабаев Усен Бекжанович, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Казахстан, e-mail: usen_0496@mail.ru

Аннотация — В данном исследовании рассматривается оптимизация времени обработки на фрезерных станках с ЧПУ, что достигается изменением параметров станка и траекторий инструмента. Используя версию 3.1.0 ICAM3D, этот подход направлен на сокращение времени обработки, сохраняя при этом ограничения рабочего процесса. Кроме того, предлагается новый метод оптимизации G-кода, который направлен на сокращение времени обработки, но сохраняет необходимую точность и качество готового продукта. Мы предлагаем метод, который объединяет передовые алгоритмы, которые выявляют и устраняют избыточные движения, оптимизируют траектории инструментов и улучшают стратегии обработки. Экспериментальные результаты показывают, что можно значительно сократить время обработки без снижения точности обработки, что может значительно сэкономить затраты и повысить эффективность для промышленных приложений. Важность этой работы заключается в правильном выборе траектории инструмента.

В проекте P3 процесс оптимизации сократил время обработки с 15 минут 23 секунды до 13 минут 33 секунды за счет улучшения G-кода. Начальное время обработки составило 20 минут 2 секунды, что соответствует времени завершения проекта P3 в условиях работы станка с ЧПУ со скоростью 75%. Для дальнейшего повышения эффективности дополнительные программные инструменты, такие как ARTCAM и ASPIRE, были использованы для реализации новой стратегии траектории инструмента.

Ключевые слова — восстановление, гильзовая прокладка, ультрафиолетовое излучение, восстановление, коррозия, гидравлические характеристики, инженерные сети, экономическая эффективность.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында CNC станоктарында құрал траекториясын оңтайландыру өңдеу уақытын қысқартып, өндірістік процестің тиімділігін арттыратыны анықталды. CAM жүйелерін пайдалану құрал қозғалысын дәл жоспарлауды қамтамасыз етіп, адам факторынан туындайтын қателіктерді азайтатыны дәлелденді. Жүргізілген салыстырмалы талдау нәтижесінде Zig Zag траекториясының басқа стратегиялармен салыстырғанда өңдеу уақыты бойынша жоғары тиімділік көрсететіні анықталды. ICAM3D бағдарламасын ArtCAM және Aspire бағдарламаларымен біріктіріп қолдану CNC өңдеу дәлдігін сақтай отырып, өндірістің жалпы өнімділігін арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілді.

КІРІСПЕ

Өңдеуде сандық басқару, немесе компьютерлік сандық басқару (CNC), құралдарды

компьютердің көмегімен автоматты басқару әдісін білдіреді. CNC – бұл алдын ала бағдарламаланған компьютерлік бағдарламалық жасақтаманы қолдана отырып, станок құралдарының жұмысын, қозғалысын және дәлдігін автоматтандыратын өндірістік әдіс. Бұл бағдарламалық жасақтама әртүрлі кесу құралдарының (фрезерлер, токарлық станоктар, маршрутизаторлар, бұрғылар, тегістегіштер, су ағындары және лазерлер) функцияларын автоматтандыру үшін машиналарға біріктірілген.

G-кодты өңдеу уақытын оңтайландыру CNC өңдеу процестерінің тиімділігі мен өнімділігін арттырудағы маңызды аспект болып табылады. Бұл мақалада жылдамдықтың, беріліс жылдамдығының және аспап траекториясының стратегияларының әртүрлілігіне байланысты өңдеу уақытын оңтайландыру қарастырылады. Компьютерлік өндіріс технологияларын (CAM) қолдану өңдеу тиімділігі мен сапасын арттыратын

аспап траекториясын жетілдіруге мүмкіндік береді.

Оңтайландыру арқылы өңдеу уақытын қысқартуға, беткі қабат сапасын жақсартуға және құралдың тозуын азайтуға болады. Әрбір параметрдің өңдеу уақыты ICAM3D нұсқасы 3.1.0 және Autodesk Art нұсқасы 2018.0.0 ECMAScript 6 (ES6)/ECMAScript 2015–2017 CNC модельдеу бағдарламалық жасақтамасын пайдаланып модельдеу арқылы анықталды. ICAM3D бағдарламасы өндірістік процестерді модельдеуге және оларды іске асыру алдында жобаның дұрыстығын тексеруге мүмкіндік береді. Өңдеу стратегиясы жалпы өңдеу уақытына айтарлықтай әсер етеді.

Қазіргі CNC жүйелерінде бағдарламаланатын автоматтандырылған станоктар қолмен бағдарламалаудың орнына CAM бағдарламалық жасақтамасына сүйенеді. Бұл бағдарлама жасау уақытын қысқартуға және адам қателерінің ықтималдығын азайтуға мүмкіндік береді.

CNC өңдеу саласында дәлдік, тиімділік және үнемділік сияқты параметрлер бойынша оңтайлы өнімділікке қол жеткізу қазіргі заманғы өндіріс үшін аса маңызды. Бұл оңтайландыруды жетілдіруде негізгі рөл атқаратын фактор – аспап траекториясының стратегиясы, яғни дайындаманы өңдеу үшін кесу құралының алдын ала бағдарламаланған қозғалыс жолы.

Аспап траекториясының стратегиясы құрал қозғалысының тиімділігіне, өңдеу циклінің уақытына, құралдың тозуына және беткі қабат сапасына тікелей әсер етеді. Озық алгоритмдер мен оңтайландыру әдістерін қолдану арқылы бұл стратегия құралдардың ең тиімді және үнемді қозғалысын қамтамасыз етеді, сонымен бірге дәлдік пен сапаны сақтайды. CNC жүйелері мен жоғары дәлдікті талап ететін өндірістердің дамуына байланысты аспап траекториясы стратегиясы CNC бағдарламалаудың негізгі элементіне айналды.

Аспап траекториясының негізгі мақсаты – өңдеу процесін толықтай оңтайландыру, құралдың қозғалыс жолын қысқарту, материалды өңдеу жылдамдығын арттыру және жалпы өнімділікті жоғарылату арқылы өндіріс шығындарын азайту. Бұл стратегия әсіресе авиация, автомобиль жасау және медициналық құрылғылар өндірісінде өте маңызды, өйткені бұл салаларда әрбір детальдің жоғары дәлдікпен жасалуы талап етіледі.

CNC технологиясының үнемі дамуымен аспап траекториясының стратегиясы нақты уақыттағы машинаның кері байланысын және бейімделген оқыту алгоритмдерін қолдану

арқылы одан әрі жетілдірілуде, бұл одан да жоғары оңтайландыру мен өнімділік деңгейлерін қамтамасыз етеді.

Бұл зерттеу ICAM3D бағдарламалық жасақтамасының стандартты мүмкіндіктерін кеңейту арқылы CNC өңдеуді жетілдірудің маңызды жетістіктерін көрсетеді. Бұл мақсатқа ArtCAM және Aspire сияқты қосымша құралдарды енгізу арқылы қол жеткізілді. Бұл бағдарламалық жасақтама жетілдірілген G-кодты генерациялау мен оңтайландыруды іске асырып, уақытты тиімді пайдалануға мүмкіндік берді. ICAM3D тек төрт аспап траекториясын қолдаса, біздің әдіс өңдеу уақытын 15 минут 23 секундтан 13 минут 33 секундқа дейін қысқартты, яғни 12%-ға жақсарды. Бұл әдістеме заманауи өндірісте тиімділік, дәлдік және өнімділікті арттыруға көмектеседі.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі машина жасау өндірісінде CNC станоктарының өнімділігін арттыру, өңдеу уақытын қысқарту және өндірістік шығындарды төмендету маңызды ғылыми-техникалық міндеттердің бірі болып табылады. Бұл міндеттерді шешуде құрал траекториясын оңтайлы жоспарлау ерекше рөл атқарады, себебі ол өңдеу уақытына, құралдың тозуына, энергия шығынына және дайын бұйымның сапасына тікелей әсер етеді. CAM жүйелерінің және өңдеу стратегияларының қарқынды дамуына қарамастан, көптеген өндірістік кәсіпорындарда құрал траекторияларының тиімділігі толық пайдаланылмайды. Осыған байланысты G-кодты жетілдіру және қосымша бағдарламалық қамтамасыз ету арқылы өңдеу уақытын қысқарту өндірістің экономикалық тиімділігін арттырудың маңызды бағыты болып табылады. Зерттеу нәтижелері машина жасау кәсіпорындарында CNC өңдеу процестерін жетілдіруге және өндірістік ресурстарды тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

Зерттеудің жаңалығы.

- ICAM3D бағдарламасының стандартты мүмкіндіктерін кеңейту арқылы CNC өңдеу уақытын қысқартудың жаңа тәсілі ұсынылды;

- ArtCAM және Aspire бағдарламаларының көмегімен оңтайландырылған G-код генерациялау әдістемесі әзірленді;

- Құрал траекториясының төрт стратегиясының (Spiral In, Spiral Out, One Way және Zig Zag) өңдеу уақытына әсері салыстырмалы түрде зерттелді;

- Zig Zag стратегиясының өңдеу уақытын азайтудағы артықшылықтары тәжірибелік түрде дәлелденді;

- Ұсынылған әдіс дәстүрлі өңдеу тәсілдерімен салыстырғанда өңдеу уақытын 15 мин 23 с-тан 13 мин 33 с-қа дейін қысқартуға мүмкіндік берді, бұл өндірістің тиімділігін арттырады.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Бұл зерттеу өңдеу процестерін талдау үшін модельдеу және оңтайландыру әдістерін қолданады. Ол CAM және CNC модельдеу бағдарламалық жасақтамасын пайдаланып, бағдарламаның тиімділігін және өңдеу уақытын талдауды қамтиды. ICAM3D бағдарламасы CNC бағдарламаларын жасау үшін қолданылады, онда жылдамдық пен аспап жолының стратегиясы сияқты параметрлер жұмыс бөлшегінің қималық өзгерістеріне негізделі отырып анықталады.

Жобаларды талдау үшін біз материал ретінде мәрмәрді қолдандық. Мәрмәр – эктастың жоғары температура мен қысым әсерінен қайта кристалдануынан пайда болатын метаморфтық жыныс. Ол негізінен кальций карбонатынан (CaCO_3) тұрады, ал оның ерекше өрнектері немесе тамырлары түзілу кезінде кездесетін қоспалардан, мысалы, саз, құм, шөгінділер немесе басқа минералдардан пайда болады.

P1 және P2 жобаларында біз 20 мм қалыңдықтағы кремді мәрмәрді қолдандық, ал P3 жобасында 15 мм қалыңдықтағы кремді мәрмәр пайдаланылды. Мәрмәр эстетикалық қасиеттері мен өңдеуге жеңілдігіне байланысты мүсіндерде, ғимараттарда, үстел беттерінде, еден жабындарында және сәндік элементтерде кеңінен қолданылады.

Бұл зерттеуде біз төрт түрлі аспап жолы стратегиясын қолдандық, олардың сипаттамасы төменде келтірілген.

Spiral In (Ішке қарай спираль) стратегиясы – бұл әдісте аспап қалтаның немесе кесілетін пішіннің сыртқы жиегінен басталып, ортасына қарай спираль бойымен біртіндеп қозғалады. Бұл аспап жолы, әдетте, қалта фрезерлеу, гравюра немесе контурды өңдеу тапсырмалары үшін қолданылады, онда кесу құралы материалды тегіс және үздіксіз алып тастауы керек. TP1 үшін Spiral In стратегиясының теңдеулері төмендегідей сипатталады:

$$\begin{aligned}x &= (D - k \cdot a) \cdot \cos(a) \\y &= (D - k \cdot a) \cdot \sin(a)\end{aligned}$$

мұнда:

D – сыртқы диаметр;

a – бұрыштық параметр;

k – бір айналымдағы қадамның азаюы.

Spiral Out (Сыртқа қарай спираль) стратегиясы TP2 үшін Spiral In стратегиясының

кері нұсқасы болып табылады. Бұл әдісте аспап қалтаның немесе кесілетін пішіннің ортасынан бастап шетке қарай спираль бойымен қозғалады. Бұл әдіс көбінесе нақыштау (гравюра) немесе таяз қалта жасау операцияларында қолданылады, мұнда өңдеу орталықтан басталып, шетке қарай жылжуы қажет. TP2 үшін Spiral Out стратегиясының теңдеулері төмендегідей сипатталады:

$$\begin{aligned}x &= (k \cdot a) \cdot \cos(a) \\y &= (k \cdot a) \cdot \sin(a)\end{aligned}$$

мұнда:

a – бұрыштық параметр;

k – бір айналымдағы қадамның азаюы.

One Way (Бір бағытта) стратегиясы TP3 үшін кесу құралы дайындама бойымен бір ғана бағытта қозғалады, әдетте түзу сызықты траекторияны ұстанады. Бұл құрал жолы қарапайым қалта өңдеу немесе контурлау тапсырмалары үшін ең жиі қолданылады және бір бағытта (не солдан оңға, не оңнан солға) орындалатын кесу қозғалыстарымен сипатталады. Әрбір өтуден кейін құрал қайтадан жоғары көтеріліп, сол бағытта жаңа өтуді бастайды.

20 флейтасы (кесу жиегі) бар құрал материалмен бір уақытта бірнеше нүктеде жанасады. Бір өтудің кесу траекториясы флейта арасындағы қашықтықпен анықталады және келесі теңдеулермен сипатталады:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + n \cdot w, \\y &= y_0 + i \cdot S_{\text{effective}}\end{aligned}$$

мұнда:

$S_{\text{effective}} = s/20$ – 20 флейтаның әсерінен азайтылған қадам аралығы; x_0, y_0 – бастапқы позиция;

n – X бағытындағы өтулер саны;

i – Y бағытындағы қадамдар саны.

Zig Zag (Зигзаг) стратегиясы TP4 үшін, сонымен қатар кері және алға фрезерлеу деп те аталады, құрал екі бағытта (солдан оңға және оңнан солға) ауыспалы түрде қозғалады, осылайша зигзаг үлгісін жасайды. Бұл стратегия көбінесе қалта фрезерлеу, профильді кесу және материалды біркелкі әрі жылдам алып тастау қажет болатын басқа да операциялар үшін қолданылады.

TP4 үшін Zig Zag стратегиясында құрал қозғалыс бағытын ауыстырады, ал 20 флейта әсерінен нақты кесу қадамының арақашықтығы азаяды. Бұл стратегия үшін теңдеулер келесі түрде болады:

$$x = x_0 + (-1)^i \cdot (n \cdot w)$$

$$y = y_0 + i \cdot S_{\text{Effective}}$$

мұнда:

$S_{\text{Effective}} = s/20 - 20$ флейта әсерінен азайтылған қадам аралығы; x_0, y_0 – бастапқы позиция;

w – қалта ені (құрал диаметрін ескере отырып түзетілген); n – зигзаг өтулер саны;

i – қатар индексі (кезектескен бағыттармен $(-1)^i$).

20 флейта арқасында құрал материалды алу тиімділігін арттырады және жоғары кесу дәлдігін сақтайды.

Материалды алу жылдамдығы (MRR) әрбір стратегия үшін келесі формулалар арқылы есептеледі:

$$f_t = f/N = 700/20 = 35 \text{ [mm/tooth]}$$

$$\text{MRR} = f_t \cdot N \cdot D \cdot W \cdot \text{DOC} \text{ [mm}^3/\text{min]} = 3 \cdot 20 \cdot 85 \cdot 70 \cdot 2 = 8330 \text{ [mm}^3/\text{min]}$$

мұнда:

f – жалпы беріліс жылдамдығы (мм/мин); f_t – бір тістегі беріліс (мм/тіс);

N – құралдағы тістер (флейта) саны;

D – құрал диаметрі (мм);

W – кесу ені немесе қадам аралығы (мм);

DOC – кесу тереңдігі (мм).

P1 жобасы – $1200 \times 900 \text{ мм}^2$ өлшемдері бар шаршы геометрияны қамтиды. Қолданылған материал – табиғи тас. Тас өңдеуі T0050 құралымен жүргізілді, қалта қазу (pocketing) процесі бір өтуде 3 мм тереңдікте орындалды. P1 жобасы төрт түрлі құрал жолдары (TP1 – TP4) стратегияларын қолдану арқылы аяқталды. Нәтижелер кестеде көрсетіліп, жобаны аяқтау уақыты минутпен беріледі.

P2 жобасы – $1600 \times 750 \text{ мм}^2$ өлшемдері бар шаршы пішіннен тұрады. Бұл жобада да табиғи тас қолданылды. Қалта қазу процесі T0050 құралымен 2 мм тереңдікте орындалды. P1 жобасындағыдай жұмыс процедурасы қолданылды, сол құрал пайдаланылды. Жобаның симуляциясы ICAM3D бағдарламасы арқылы орындалды.

P3 жобасында $100 \times 50 \text{ мм}$ өлшемдері бар төртбұрышты траншея зерттелді. Траншеяны өңдеу T503 құралының бүйірімен 2 мм тереңдікте бір өтуде аяқталды. Жер жырту (plowing) процесі төрт түрлі құрал жолдары (TP1 – TP4) стратегияларымен орындалды. ICAM3D бағдарламасында симуляция жүргізілді, ал соңғы өнім Intermac Master 33.3 CNC станогында жасалды. Нәтижелер кестеде көрсетіліп, әрбір төрт стратегия бойынша жұмысты аяқтауға кеткен уақыт минутпен беріледі.

V	Y	D	L	MATERIAL	DIRECTION OF ROTATION	RPM	FEED mm/min	REMOVAL mm	CODE
30	10	10	55	M	DX	7000-8000	300-500	2-3	OFFR00776



Сурет 1 – Металды дәл өңдеуге арналған T503 токарлық / фрезерлік кескіш.

POS	ITEM TYPE	D	H	GRIT	CODE
1-2	Rough segmented	85	35	D427	DRI70162



Сурет 2 – Материалды өрескел алу үшін t0050 сегменттелген Гауһар кескіш

T0050 құралы материалды бұрғылау үшін жасалған, оның диаметрі $D = 85$ мм, биіктігі $H = 35$ мм.

Бұл құрал 20 тісті және 3800-4200 айн/мин (RPM) диапазонында жұмыс істейді.

T0050 құралы үшін рұқсат етілген беріліс жылдамдығы 600-1000 мм/мин аралығында, ал жұмыс тереңдігі 3,84 мм. Бұл құралдың негізгі мақсаты – материалды алу, әсіресе босату (emptying) процесі арқылы.

T0050 ISO стандарттарына сәйкес конусқа орнатылады, бұл оны жеңіл ауыстыруға және

тозған кезде жаңасына алмастыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, құрал екі деңгейлі суыту жүйесімен жабдықталған:

1. Сыртқы суыту (external cooling)
2. Ішкі суыту (internal cooling)

Жұмысты талдау үшін Intermac Master 33.3 CNC (Biesse Group, Италия, Пезаро) станогы қолданылды. Үш жоба талданды:

1. Бірінші және екінші жобаларда T0050 құралы пайдаланылып, симуляция жүргізілді.
2. Үшінші жоба (P3) үшін T503 құралы қолданылды.

Кесте 1 – Талданатын жобалар және олардың сәйкес кодтары.

Код	Өлшем	Құрал
P1	1200 x 900	0050
P2	1600 x 750	0050
P3	100 x 50	503

Механикалық өңдеу процесінде, мысалы, фрезерлеу немесе токарлық өңдеу кезінде құралдың қозғалатын нақты бағыты траекториясы (toolpath) деп аталады. Бұл траектория ICAM3D бағдарламасында жасалып, қажетті пішінді алу үшін құралдың дайындама бойынша қозғалысын анықтайды.

Құрал траекторияларын дұрыс басқару жоғары сапалы өңдеу нәтижелеріне қол жеткізуде маңызды рөл атқарады. Оған дәл өлшемдер, тегіс беткі қабат, сондай-ақ тиімді материал алу процесі жатады.

Сонымен қатар, траекториялар кесу құралының қасиеттерін, өңдеу параметрлерін және құрал ұстағышының шектеулері сияқты факторларды ескереді. Бұл материалды тиімді алып тастауға және құралдың дұрыс жұмыс істеуіне мүмкіндік береді.

ICAM3D бағдарламасында құрал траекториясының төрт стратегиясы қарастырылған: ішке спираль (Spiral In), сыртқа спираль (Spiral Out), бір бағытта (One Way) және зигзаг (Zig Zag). Бұл стратегиялар TP1-ден TP4-ке дейін нөмірленген. Құрал траекториясының параметрі қалталар (pocketing) өңдеу операцияларында қолданылған.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Талдау барысында үш жоба (P1–P3) қарастырылды. Төрт түрлі құрал траекториясы (TP1–TP4) — ішке спираль (Spiral In), сыртқа спираль (Spiral Out), бір бағытта (One Way) және зигзаг (Zig Zag) — кезекпен қолданылды. Бұл ретте кесу жылдамдығы, беріліс жылдамдығы және кесу ені сияқты параметрлер ескерілді.

Жобаларда қолданылған құралдар P1 және P2 жобалары

Бұл жобаларда T0050 құралы қолданылды. Қалталарды (pocketing) өңдеу 2 мм тереңдікте, 75% жылдамдықта орындалды. Салқындату жүйесі ретінде ішкі және сыртқы су салқындатуы қолданылды.

T0050 құралының сипаттамалары:

1. Диаметр (D) = 85 мм
2. Биіктігі (H) = 35 мм
3. Айналу жылдамдығы (RPM) = 4000
4. Беріліс жылдамдығы = 700 мм/мин P3 жобасы

Бұл жобада T503 құралы қолданылды. Жұмыс екі фазада орындалды:

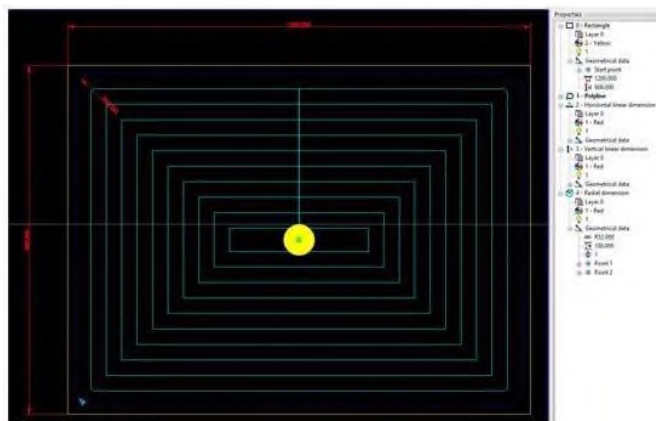
1. Бірінші фазада 75% жылдамдық
2. Екінші фазада 100% жылдамдық Кесу 2 мм тереңдікте жүргізілді. Ішкі және сыртқы су салқындату жүйесі қолданылды.

T503 құралының сипаттамалары:

1. Диаметр (D) = 10 мм
2. Биіктігі (H) = 5,5 мм
3. Айналу жылдамдығы (RPM) = 8000
4. Беріліс жылдамдығы = 400 мм/мин P1 жобасының геометриясы

1200 × 900 мм өлшемдері бар геометрия пайдаланылды. Қалталар T0050 құралының көмегімен өңделді. Талдау үшін жалпы қалтаны өңдеу уақыты тіркелді, ол төрт түрлі құрал траекториясы негізінде есептелді.

3- суретте зерттеу үшін қолданылған геометрия көрсетілген. Оң жақ бөлігінде 1200 × 900 өлшемдері және геометрияның доғалық бөлігі көрсетілген. Геометрия ICAM3D бағдарламасының көмегімен жасалған.



Сурет 3 – CNC аппаратына арналған геометрия

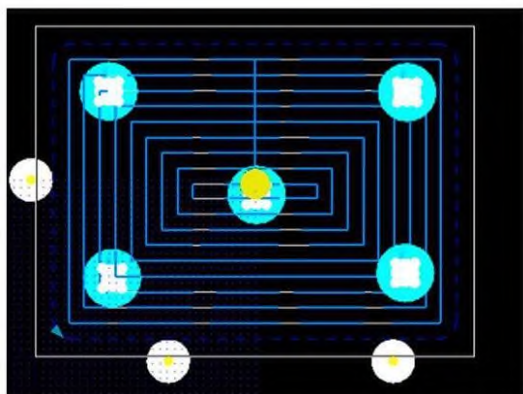
Сурет 4-7 P1 жобасы аяқталғаннан кейін құрал траекторияларын көрсетеді. Жоба алдымен ICAM3D бағдарламасында модельденді, содан кейін CNC станогында өңделді.

Симуляцияның негізгі мақсаты:

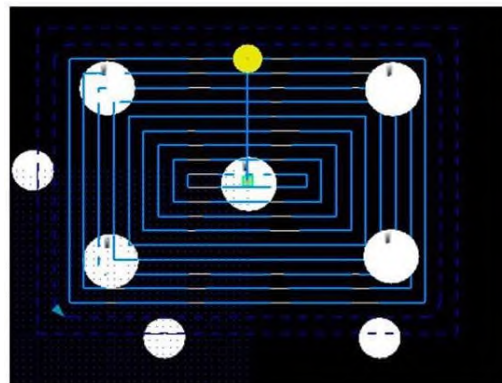
- Геометрияның және құралдың дұрыстығын тексеру;
- Жобаның сәтті аяқталу мүмкіндігін бағалау;

- Құрал жолдарын оңтайландыру және ықтимал қателерді алдын ала анықтау;

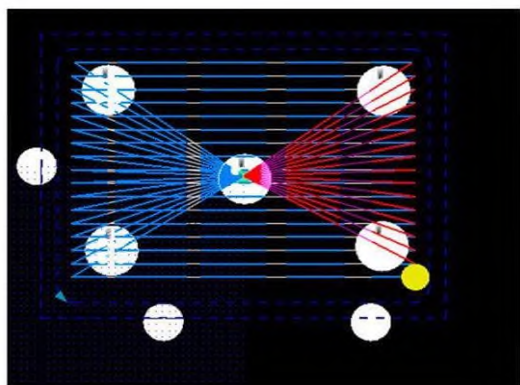
ICAM3D бағдарламасында алынған нәтижелерді CNC өңдеу кезінде растау маңызды болды, өйткені бұл материалды тиімді алып тастауға және өңдеу уақытының оңтайландырылуына мүмкіндік берді.



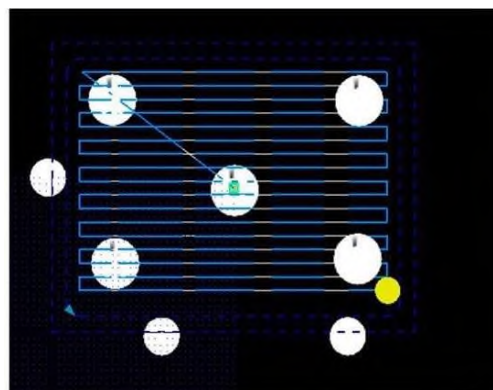
Сурет 4 – CNC аппаратында спираль ішке бағыттылан



Сурет 5 – CNC аппаратында спираль сыртқа бағыттылан



Сурет 6 – CNC аппаратында спираль бір бағытта (One Way)



Сурет 7 – CNC аппаратында спираль Зиг-Заг

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл зерттеуде біз төрт аспаптық жол стратегиясын бағаладық: спираль кіріс, спиральды шығу, зиг Заг және бір жол.

Деректерді талдаудан CNC машиналарының жұмысында аспап жолын таңдау өте маңызды деген қорытынды жасауға болады. Ең аз жұмыс уақыты 00:20:02 және максимум 01:21:46 болған P3 жобасында көрсетілгендей, құралдарды дұрыс таңдамау машинаның жұмыс уақытына әсер етеді.

Дегенмен, аспап жолын таңдау дайындаманың геометриясына да байланысты. Талдау нәтижесінде жобалар үшін өңдеудің ең аз уақыттары және сәйкес құралдар жолының түрлері келесідей екенін табуға болады.

Жалпы, өңдеудің ең аз уақыты TP4, Zig Zag үлгісі арқылы алынды, ал ең көп уақыт TP3, One Way үлгісімен жазылды. P3 жобасының аяқталу уақыты 20:02 мин. ICAM3D деректерін және P3 жобасы үшін CNC нақты деректерін ескере отырып, біз аяқтаудың соңғы уақытын 15 минут және 23 секундқа дейін қысқарттық. Бағдарламалық құрал және G-код арқылы оңтайландырылған уақыт одан әрі 13 минут және 33 секундқа дейін қысқарды.

Бұл жағдайда пайдаланылатын CNC түріне арналған бағдарламалық құрал тек төрт стратегия үлгісіне рұқсат етілгендіктен, біз одан әрі оңтайландыру мүмкіндіктерін қамтамасыз ететін ArtCAM және Aspire сияқты қосымша бағдарламалық құралды пайдаландық. Осы бағдарламалық бағдарламалардан G-коды жасалды, ол оңтайландырудан кейін CNC машинасында қолданылды.

Жалпы алғанда, біз қалтаға салу процесінде стандартты ICAM3D бағдарламалық жасақтамасының шектеулерін және уақыт тиімділігі тұрғысынан оңтайландырылған G-кодын жасау үшін басқа бағдарламалық құралдар ұсынатын артықшылықтарды пайдаландық.

CNC максималды жылдамдығында ең оңтайландырылған 15 минут және 23 секунд

уақытынан бастап, біз қосымша бағдарламалық құрал мен G-кодты оңтайландыру процесін пайдалану арқылы бұл уақытты 13 минут және 33 секундқа дейін қысқарта алдық.

Бұл зерттеу инженерлерге жұмыс процестерін оңтайландыруға көмектесуі мүмкін, әсіресе күрделі геометриялар үшін. Оңтайлы стратегияларды анықтау арқылы ол ресурстарды максималды пайдалану арқылы тұрақты өндірістік тәжірибелерді сәйкестендіреді.

Болашақ зерттеулер дайындаманың геометриясына, материалына және өңдеу параметрлеріне негізделген құрал-сайман жолының оңтайлы стратегияларын болжау үшін машиналық оқыту үлгілерін пайдалануға бағытталуы керек.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Автор осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Авторлар осы зерттеуді орындау кезінде сыртқы қаржыландырудың жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС

Автор қолжазбаны мұқият қарастырып, мақаланың мазмұны мен сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік берген құнды ескертулері мен ұсынымдары үшін журналдың редакторы мен рецензентіне шынайы алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Denkena B., Schmidt J., Krüger M. Toolpath optimization strategies for high-performance CNC machining. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. 77. P. 619–632. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.041>
- [2] Li X., Wang H., Zhang Y. Toolpath planning and machining efficiency optimization in CNC manufacturing: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. 75. 102298. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102298>
- [3] Kumar R., Singh P., Sharma A. Intelligent toolpath optimization for CNC milling using advanced CAM systems. *Materials Today: Proceedings*. 2023. 72. P. 2155–2162.
- [4] Zhang Y., Liu Q., Chen J. Recent advances in CNC machining process optimization: A comprehensive review. *Machines*. 2023. 11(8). 765. <https://doi.org/10.3390/machines11080765>

- [5] Krolczyk G., Legutko S., Nieslony P. Digital manufacturing and optimization of machining processes in Industry 4.0. *Applied Sciences*. 2023. **13**(4). 2407. <https://doi.org/10.3390/app13042407>
- [6] Xu J., Zhao H., Li M. Optimization of G-code generation and toolpath planning for CNC machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024. **72**. P. 319–331.
- [7] Patel D., Mehta R. Artificial intelligence-assisted CNC machining optimization: Current trends and future perspectives. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. **129**. 107658.
- [8] Yao X., Sun Y., Wang Z. Advanced toolpath generation for CNC machining using hybrid optimization algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. **131**. P. 2501–2518.
- [9] Chen L., Zhao W., Huang Y. Sustainable CNC machining through toolpath optimization and digital manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2025. **489**. 145678.
- [10] Singh V., Gupta S., Kumar A. Intelligent CNC machining optimization using digital twin and advanced CAM technologies. *Manufacturing Letters*. 2025. **34**. P. 90–96.

REFERENCES

- [1] Denkena B., Schmidt J., Krüger M. Toolpath optimization strategies for high-performance CNC machining. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. **77**. P. 619–632. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.041>
- [2] Li X., Wang H., Zhang Y. Toolpath planning and machining efficiency optimization in CNC manufacturing: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. **75**. 102298. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102298>
- [3] Kumar R., Singh P., Sharma A. Intelligent toolpath optimization for CNC milling using advanced CAM systems. *Materials Today: Proceedings*. 2023. **72**. P. 2155–2162.
- [4] Zhang Y., Liu Q., Chen J. Recent advances in CNC machining process optimization: A comprehensive review. *Machines*. 2023. **11**(8). 765. <https://doi.org/10.3390/machines11080765>
- [5] Krolczyk G., Legutko S., Nieslony P. Digital manufacturing and optimization of machining processes in Industry 4.0. *Applied Sciences*. 2023. **13**(4). 2407. <https://doi.org/10.3390/app13042407>
- [6] Xu J., Zhao H., Li M. Optimization of G-code generation and toolpath planning for CNC machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024. **72**. P. 319–331.
- [7] Patel D., Mehta R. Artificial intelligence-assisted CNC machining optimization: Current trends and future perspectives. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. **129**. 107658.
- [8] Yao X., Sun Y., Wang Z. Advanced toolpath generation for CNC machining using hybrid optimization algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. **131**. P. 2501–2518.
- [9] Chen L., Zhao W., Huang Y. Sustainable CNC machining through toolpath optimization and digital manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2025. **489**. 145678.
- [10] Singh V., Gupta S., Kumar A. Intelligent CNC machining optimization using digital twin and advanced CAM technologies. *Manufacturing Letters*. 2025. **34**. P. 90–96.

МАШИНА ЖАСАУ, ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ МАШИНАЛАР ЖӘНЕ КӨЛІК, ҚҰРЫЛЫСDOI: <https://doi.org/10.53002/096>**INNOVATIVE METHODS OF CONDUCTING GEOPHYSICAL SURVEYS OF WELLS****Kaukarov A.K.**

NJSC “K.Zhubanov Aktobe regional university”, Aktobe, Kazakhstan

*Corresponding author e-mail: altynbek-79@mail.ru**Author information:****Kaukarov Altynbek Kubashevich**, NJSC “K.Zhubanov Aktobe regional university”, Aktobe, Kazakhstan, e-mail: altynbek-79@mail.ru

Abstract — Well construction and geophysical exploration is a complex multi - stage process that requires compliance with strict technological norms and standards. At the stage of preparation for the supply of equipment, the arrangement of the site and the installation of the drilling rig. Drilling is carried out by installing and cementing the casing column. Geophysical researchthereer includes a complex of methods for analyzing open and lined holes, as well as horizontal wells, which allows you to obtain accurate data on the composition of rocks and the filtration characteristics of productive horizons. Particular attention is paid to LWD technology, which allows logging during drilling, instant adjustment of parameters and speeding up construction. Such a complex of autonomous geophysical equipment as AMK-horizon increases the efficiency and quality of research. Strict adherence to the sequence of stages and quality control will help reduce risks and ensure the safety of the process, promoting better solutions at each stage.

Keywords — Geophysical Research, drilling, well control, circulation, filter, AMK-Gorizont.

ҰҢҒЫМАЛАРҒА ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ ЖҮРГІЗУДІҢ ИННОВАЦИЯЛЫҚ ӘДІСТЕРІ**Каукаров А.К.**

«Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті» КеАҚ, Ақтөбе, Қазақстан.

*Автор-корреспондент e-mail: altynbek-79@mail.ru**Автор туралы ақпарат:****Каукаров Алтынбек Кубасевич**, «Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті» КеАҚ, Ақтөбе, Қазақстан, e-mail: altynbek-79@mail.ru

Аңдатпа — Бұл зерттеу CNC фрезерлеу станоктарында өңдеу уақытын оңтайландыруды қарастырады, оған машина параметрлері мен құрал траекторияларын өзгерту арқылы қол жеткізіледі. ICAM3D бағдарламасының 3.1.0 нұсқасын қолдана отырып, бұл тәсіл өңдеу уақытын азайтуды мақсат етеді, сонымен бірге жұмыс процесінің шектеулерін сақтайды. Сонымен қатар, G-кодты оңтайландырудың жаңа әдісі ұсынылады, ол өңдеу уақытын қысқартуға бағытталған, бірақ дайын өнімнің қажетті дәлдігі мен сапасын сақтайды. Біз артық қозғалыстарды анықтап, жоятын, құрал траекторияларын оңтайландыратын және өңдеу стратегияларын жақсартатын жетілдірілген алгоритмдерді біріктіретін әдісті ұсынамыз. Эксперименттік нәтижелер көрсеткендей, өңдеу дәлдігін төмендетпей, өңдеу уақытын едәуір қысқартуға болады, бұл өнеркәсіптік қолданбалар үшін айтарлықтай шығын үнемдеуге және тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Бұл жұмыстың маңыздылығы құрал траекториясын дұрыс таңдауда жатыр. P3 жобасында оңтайландыру процесі G-кодты жетілдіру арқылы өңдеу уақытын 15 минут 23 секундтан 13 минут 33 секундқа дейін қысқартты. Бастапқы өңдеу уақыты 20 минут 2 секундты құрады, бұл CNC станогының 75% жылдамдықта жұмыс істеу жағдайында P3 жобасын аяқтау уақытымен сәйкес келеді. Тиімділікті одан әрі арттыру үшін ARTCAM және ASPIRE сияқты қосымша бағдарламалық құралдар жаңа құрал траекториясы стратегиясын енгізу үшін пайдаланылды.

Түйін сөздер — Қалпына келтіру, гильзалық төсем, ультракүлгін сәулелену, қалпына келтіру, коррозия, гидравликалық сипаттамалар, инженерлік желілер, экономикалық тиімділік.

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

Каукаров А.К.

НАО «Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова», Актюбе, Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: altynbek-79@mail.ru

Информация об авторе:

Каукаров Алтынбек Кубашевич, НАО «Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова», Актюбе, Казахстан, e-mail: altynbek-79@mail.ru

Аннотация — Строительство скважин и геофизическая разведка - сложный многоступенчатый процесс, требующий соблюдения строгих технологических норм и стандартов. На этапе подготовки к поставке оборудования, приведения в порядок площадки и установки буровой установки. Бурение осуществляется путем установки и цементирования обсадной колонны. Геофизическое исследование включает в себя комплекс методов анализа открытых и покрытых отверстий, а также горизонтальных скважин, позволяющих получить точные данные о составе горных пород и фильтрационных характеристиках продуктивных горизонтов. Особое внимание при бурении уделяется технологии LWD, которая позволяет проводить каротаж, оперативно регулировать параметры и ускорять строительство. Комплекс автономного геофизического оборудования, такого как АМК-Горизонт, повышает эффективность и качество исследований. Строгое соблюдение последовательности этапов и контроль качества помогают снизить риски и обеспечить безопасность процесса, продвигая лучшие решения на каждом этапе.

Ключевые слова — Геофизические исследования, бурение, наблюдение за скважинами, циркуляция, фильтр, АМК-Gorizont.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында LWD технологиясын және АМК-Горизонт автономды геофизикалық кешенін қолдану бұрғылау процесінде геофизикалық ақпаратты нақты уақыт режимінде алуға мүмкіндік беретіні анықталды. Ұсынылған технологиялық тәсіл геологиялық құрылымды, өнімді қабаттардың фильтрациялық қасиеттерін және ұңғыма жағдайын жоғары дәлдікпен бағалауды қамтамасыз ететіні көрсетілді. Геофизикалық деректерді жедел алу бұрғылау параметрлерін уақытылы түзетуге мүмкіндік беріп, ұңғымаларды салу мерзімін қысқартуға және өндірістік тәуекелдерді төмендетуге ықпал ететіні дәлелденді.

КІРІСПЕ

Ұңғымаларды салу процесін бірнеше маңызды технологиялық кезеңдерге бөлуге болады. Бірінші кезең бұрғылау қондырғысын жеткізу үшін бұрғылау нүктесін және кірме жолдарды дайындауды қамтиды. Содан кейін бұрғылау жабдықтарының үлкен бөлшектері тасымалданады және ұңғыма алаңында тұрғын қалашық орнатылады. Бұрғылау әдетте бағыттаушы сапты бұрғылаудан басталады, содан кейін сапты іске қосу және цементтеу [1]. Ұңғымаларды каротажға ашық ұңғымаларды барлау, сондай-ақ қаптау мен цементтеуден кейін қоршалған саңылаулардың өнімділігін талдау

сияқты жұмыс бағыттары кіреді. Геофизикалық барлау (ГИС) кешеніне көлденең ұңғымаларды зерттеу де кіреді. Негізгі міндет - қабаттардың құрамына байланысты геологиялық қиманы зерттей отырып, ашық тесікті талдау. Бағалау әдістеріне анықталған қабаттардың литологиясын зерттеу және өнімді горизонттың фильтрациялық қасиеттерін және мұнайға қанықтыру сипаттамаларын бағалау кіреді [2].

Зерттеудің маңыздылығы. Ұңғымаларды геофизикалық зерттеу мұнай-газ кен орындарын игеру барысында геологиялық құрылымды, өнімді қабаттардың фильтрациялық қасиеттерін және ұңғыма жағдайын дәл бағалауға мүмкіндік береді. Заманауи геофизикалық әдістерді, соның ішінде LWD технологиясы мен АМК-Горизонт кешенін қолдану зерттеу дәлдігін арттырып, бұрғылау процесін оңтайландыруға, шығындарды азайтуға және өндірістік қауіпсіздікті қамтамасыз етуге ықпал етеді.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеуде ұңғымаларды геофизикалық зерттеудің заманауи әдістері кешенді түрде қарастырылып, LWD технологиясы мен АМК-Горизонт автономды кешенін пайдалану ерекшеліктері жүйеленді. Сонымен қатар, геофизикалық зерттеулерді жүргізудің технологиялық кезеңдері мен жабдықтарды қолдану тәртібі талданып, олардың бұрғылау тиімділігін арттыруға және зерттеу сапасын жақсартуға әсері негізделді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Геофизикалық зерттеу процесі былай жүргізіледі: жұмысшылар белгілі бір аралық бұрғыланған бұрғылау қондырғысына қажетті құрал-жабдықтары бар рельефтік көлікпен жеткізіледі. Маңызды элемент - лебедка, оған құралдарды түсіруге арналған арқан оралған. Оператор аспаптың қонуына жол бермеу үшін процесі бақылайды. Мұндай жағдайлар туындаса, жабдықты алып тастау және ұңғыма оқпанын дайындау керек. Геофизикалық зерттеулерді қиын жағдайларда, мысалы, қону бар жерде жүргізуге қатаң тыйым салынады [3].

Тәжірибеде қондыру геофизикалық аспаптардың жұмысында қиындықтарға және кабельдердің үзілуіне әкелуі мүмкін, бұл апаттарды жою үшін ұзақ және шығынды әрекеттерді, соның ішінде қайта бұрғылауды қажет етеді. Мұндай жағдайларды жою үшін «шортан аузы» немесе басқа көтеру механизмдері сияқты арнайы құрылғыларды қолдануға болады.

Көлденең ұңғымалардың геофизикалық зерттеулеріне ерекше назар аудару керек, олар тракторларды, автономды құрылғыларды немесе орамдық құбырларды технологияларды қолдану арқылы орындалуы мүмкін. LWD технологиялары деп аталатын бұрғылау кезіндегі барлау әдістері мен бұрғылау әдістері бар.

Қазіргі уақытта геофизикалық аспаптарды ұңғыма түбіне жеткізудің төрт негізгі әдісі бар. Тік ұңғымаларда икемді немесе қатты геофизикалық кабельді қолданатын әдіс қолданылады. Бұл әдіс энергияны аз қажет етеді, бірақ көлденең ұңғымалар үшін шектеулер бар. Көлденең ұңғымалар үшін неғұрлым кең таралған әдіс - аспаптарды бұрғылау құбырларында немесе құбырларда жеткізу. Иілгіш сорғы құбырларын ағаш кесу құралдарын жеткізу үшін де пайдалануға болады.

Бұрғылау кезінде каротажды жүргізуге мүмкіндік беретін LWD әдісі ұңғыма оқпанының жай-күйі туралы үздіксіз ақпаратты және бұрғылау параметрлерін жедел өзгертуді қамтамасыз етеді. Бұл әдіс үнемді болып саналады, өйткені ол қымбат тұратын өшіру және көтеру операцияларының қажеттілігін азайтады және бұрғылау жылдамдығын арттырады. Дегенмен, LWD жабдығының құны жоғары және ол бұрғылау ерітіндісінің сапасы үшін қатаң стандарттарды талап етеді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Геофизикалық зерттеулердің кең тараған түрі ауытқыған ұңғымаларда және цемент қатынасын талдау үшін қолданылатын сымды каротаж. Көлденең ұңғымаларда бұл әдісті қолдану мүмкіндігі шектеулі, бірақ LWD құрылыс уақытын қысқарта алады, лай фильтратының ену аймағының тереңдігін зерттеуге көмектеседі және радиоактивті түсіру әдістерінің статистикалық қателігін азайтады. Осылайша, ашық ұңғыма оқпанының геологиялық құрамын зерттеудің ең өзекті әдісі АМК-Горизонт кешенін пайдалану болып табылады. АМК-Горизонт кешені келесі негізгі техникалық блоктардан тұрады (Сурет 1).

Болат бұрғылау құбырларынан құрылғының өзіне өту үшін бұрғылау құбырларынан Тр-80*4 бұрандалы қосылымға бұрандалы қосылымы бар өтпелі бөлік қолданылады. Құрылғының сыртқы диаметрі 155 мм. Ұзындығы шамамен 3 метр болатын келесі функционалды құрылғы ASPG-108 деп аталады, ол өтуге болмайды және белгілі бір сенсорларды қамтиды. Одан кейін ұзындығы шамамен алты метр болатын құрылғы АКГ-У деп аталады. Бұл құрылғыға сыртқы диаметрі 108 мм болатын 2GGKP-A-108 құрылғысы қосылған.



Сурет 1 – Кешенді ГАЖ АМК-Gorizont.

Қарастырылып отырған құрылғы топсалы адаптерден, гамма-сәулелену көзінен, серіппелі сақтандырғыштан және қорғаныс корпусынан тұрады. Серіппелі қауіпсіздік құрылғысы геофизикалық аспаптың ұңғыма қабырғасының өткізгіш қабатымен жанасуын азайту үшін қызмет етеді. Ең соңында сыртқы диаметрі 102 мм болатын KASP-Tver адаптері бар. Құрылғы дизайнында ТМ-А2 модулі бар. Қарастырылып отырған модуль тұрақты жадта барлық модульдердің геофизикалық параметрлерін өлшеу деректерін сақтауды қамтамасыз етеді. Сондай-ақ құрылғы модуль ішіндегі температураны, қоршаған ортаның температурасын және борттық қуат көзінің кернеуін өлшеуге мүмкіндік береді. Бұл құрылғы келесі функцияларды орындайды.

Геофизикалық аспаптарды ұңғыма түбіне жеткізу үшін қолданылатын бұрғылау құралы дәл өлшеніп, өлшеу нәтижелері бригадирдің, тапсырыс беруші өкілінің қолымен расталып, геофизикалық ұйымның басшысына ұсынылуы керек. Сондай-ақ геофизикалық зерттеулер кезінде тоқтап қалмау үшін жабдықты жоспардан тыс тексеруді жүргізу қажет. Барлық дайындық әрекеттері аяқталғаннан кейін деректерді жазу басталады [4].

Геофизикалық зерттеулер белгілі бір реттілікпен жүргізіледі. Біріншіден, автономды кешен бетте 5 метр биіктікке түсіріледі, содан кейін құрал сыналарға бекітілген кезде бір минутқа тоқтау жазылады. Қайта отырғызу немесе қатайту орын алса, бұрғылау тізбегі кері жүреді. Құралдың бос тұру уақыты үш минуттан аспауы керек, сондықтан жабдықты уақтылы диагностикалау қажет. Көтеру жылдамдығын өзгерту қажет болса, бұл тапсырыс берушінің өкілімен келісілуі керек. Автономды кешен көтерілгеннен кейін ол бөлшектеліп, радиоактивті иондаушы көз жойылады [5].

ҚОРЫТЫНДЫ

Осылайша, ұңғымаларды салу және геофизикалық зерттеу қауіпсіздік пен тиімділікті қамтамасыз ету үшін барлық кезеңдерді және стандарттарды дәл орындауды талап ететін күрделі процесс болып табылады. Бір кезеңде

дұрыс ретті сақтамау келесі кезеңде проблемаларды тудыруы мүмкін, сондықтан стандарттарды сақтау және сапаны үздіксіз бақылауды қамтамасыз ету маңызды. Әртүрлі кезеңдердегі геофизикалық зерттеулер тау жыныстарының құрамы, фильтрациялық қасиеттері және қабаттардың қанығу сипаттамалары туралы нақты мәліметтер алуға мүмкіндік береді. Бұрғылау құбырларын каротаждау және автономды жүйелерді пайдалану сияқты заманауи әдістер процесті жылдамдатады, шығындарды азайтады және тез шешім қабылдауды қамтамасыз етеді. Барлық технологиялық стандарттарды сақтау және зерттеулерге мұқият дайындық тәуекелдерді барынша азайтады және ұңғымаларды бұрғылау тиімділігін арттырады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Автор осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Авторлар осы зерттеуді орындау кезінде сыртқы қаржыландырудың жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС

Автор қолжазбаны мұқият саралап, мақаланың мазмұны мен сапасын жақсартуға бағытталған сындарлы пікірлері мен пайдалы ұсынымдары үшін журнал редакторы мен рецензентіне шынайы алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

[1] А. И. Архипов, «Апробация информационно-измерительных систем в процессы строительства и эксплуатации скважин», в *Новые технологии в газовой промышленности: Тезисы докладов конференции*, Москва, Россия, 8–11 окт. 2013, Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2013, с. 62.

[2] Л. Г. Нигматов, «Снижение аварийности при бурении скважин за счет идентификации и учета наработки бурильной колонны», в *Современное развитие нефтегазовой отрасли России: вызовы, проблемы, решения: Материалы конференции*, Оренбург, Россия, 9 февр. 2024, Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2024, с. 295–297.

- [3] M. Khadisov, H. Hagen, A. Jakobsen *et al.*, "Developments and experimental tests on a laboratory-scale drilling automation system," *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 10, pp. 605–621, 2020.
- [4] A. Kunshin, M. Dvoynikov, E. Timashev, and V. Starikov, "Development of Monitoring and Forecasting Technology Energy Efficiency of Well Drilling Using Mechanical Specific Energy," *Energies*, vol. 15, no. 19, Art. no. 7408, 2022.
- [5] Kessai, S. Benammar, M. Z. Doghmane, and K. F. Tee, "Drill Bit Deformations in Rotary Drilling Systems under Large-Amplitude Stick-Slip Vibrations," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 18, Art. no. 6523, 2020.

REFERENCES

- [1] I. Arkhipov, "Approbation of information and measurement systems in well construction and operation processes," in *Proceedings of the Conference "New Technologies in the Gas Industry"*, Moscow, Russia, Oct. 8–11, 2013. Moscow, Russia: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2013, p. 62.
- [2] L. G. Nigmatov, "Reducing drilling accidents through identification and tracking of drill string service life," in *Proceedings of the Conference "Modern Development of the Russian Oil and Gas Industry: Challenges, Problems, Solutions"*, Orenburg, Russia, Feb. 9, 2024. Moscow, Russia: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2024, pp. 295–297.
- [3] M. Khadisov, H. Hagen, A. Jakobsen *et al.*, "Developments and experimental tests on a laboratory-scale drilling automation system," *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 10, pp. 605–621, 2020.
- [4] Kunshin, M. Dvoynikov, E. Timashev, and V. Starikov, "Development of Monitoring and Forecasting Technology Energy Efficiency of Well Drilling Using Mechanical Specific Energy," *Energies*, vol. 15, no. 19, Art. no. 7408, 2022.
- [5] Kessai, S. Benammar, M. Z. Doghmane, and K. F. Tee, "Drill Bit Deformations in Rotary Drilling Systems under Large-Amplitude Stick-Slip Vibrations," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 18, Art. no. 6523, 2020.

Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство

DOI: <https://doi.org/10.53002/097>

COMPLEX FOR ELIMINATING THE «FLARE» DEFECT DURING CONVERTER MELT TAPPING

^{1*}Romanov V.I., ¹Bestembek E.S., ¹Murtazayev K.N., ¹Brazhnikov A.S., ²Kazakov V.I.

¹NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan

²JSC “Qarmet”, Temirtau, Kazakhstan

*Corresponding author email: victor-romanov-47@list.ru

Authors information:

Romanov Victor Ivanovich, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,

e-mail: victor-romanov-47@list.ru

Bestembek Yerbol Serikuly, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,

e-mail: qwert.06@mail.ru

Murtazayev Kanat Nurlanuly, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,

e-mail: k.murtazayev@ttu.edu.kz

Brazhnikov Aleksandr Sergeevich, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan.

e-mail: a.brazhnikov@ttt.ed.kz

Kazakov Vladimir Ivanovich, JSC “Qarmet”, Temirtau, Kazakhstan. Email: vv.kazakovkazakov@mail.ru

Abstract — This article is devoted to the pedagogical and methodological aspects of the use of virtual laboratory work in engineering education in the context of digitalization. The didactic advantages of virtual laboratories are considered, such as visibility, accessibility, interactivity, and the possibility of repeated reproduction of the experiment. An example of virtual laboratory work, "Compression testing of materials," is given with a description of the modeling methodology, the use of the DEFORM Viewer software package, and the calculation of the hardening curve. It is shown that virtual laboratories improve the quality of students' training, contribute to the formation of professional competencies, the development of analytical thinking and skills in working with digital tools.

Keywords — converter, flight channel, bell, slag-metal melt, steel defects, non-metallic inclusions, lining, metal release, cellulose liner, heating of the flight unit, steel quality.

КОНВЕРТЕРДЕН БАЛҚЫМАНЫ ШЫҒАРУ КЕЗІНДЕГІ «РАСТРУБ» АҚАУЫН ЖОЮ КЕШЕНІ

^{1*}Романов В.И., ¹Бестембек Е.С., ¹Муртазаев К.Н., ¹Бразжников А.С., ²Казаков В.И.

¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан

²«Qarmet» АҚ, Теміртау, Қазақстан

*Корреспондент автор e-mail: victor-romanov-47@list.ru

Авторлар туралы ақпарат:

Романов Виктор Иванович, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: victor-romanov-47@list.ru

Бестембек Ербол Серікұлы, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: qwert.06@mail.ru

Муртазаев Канат Нұрланұлы, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: k.murtazayev@ttu.edu.kz

Бразжников Александр Сергеевич, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: a.brazhnikov@ttt.ed.kz

Казаков Владимир Иванович, «Qarmet» АҚ, Теміртау, Қазақстан, e-mail: vv.kazakovkazakov@mail.ru

Аңдатпа — Мақалада оттекті конвертерден шлак-металл балқымасын летка арнасы арқылы шығару кезінде «раструб» ақауының түзілу мәселесі қарастырылады. Ақаудың летка блогының сыртқы бөлігі күрт салқындап, торец аймағында металдың кристалдануы нәтижесінде қалыптасатыны көрсетілген. Бұл құбылыс ағынның ықшамдылығының бұзылуына, оның тотығуына, газдануына және металл емес қосындылар үлесінің артуына

экеледі. Летка арнасын қыздыруға арналған қолданыстағы технологиялық шешімдер талданып, олардың кемшіліктері айқындалған. Түйінді алдын ала шлак шығарумен қыздыруды және ықшам ағынның тұрақты қалыптасуын қамтамасыз ететін целлюлоза салымшасын қолдануды қамтитын техникалық шаралар кешені ұсынылған. Ұсынылған технологияны енгізу тотығу негізіндегі қосындылар мөлшерін азайтуға, раскислительдер мен қоспалардың жану шығынын төмендетуге, футеровканың төзімділігін арттыруға және алынатын болаттың сапасын жақсартуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер — конвертер, летка арнасы, раструб, шлак-металл балқымасы, болат ақаулары, металл емес қосындылар, футеровка, металл шығару, целлюлоза салымшасы, летка торабын қыздыру, болат сапасы.

КОМПЛЕКС УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТА «РАСТРУБ» ПРИ ВЫПУСКЕ РАСПЛАВА ИЗ КОНВЕРТЕРА

¹Романов В.И., ¹Бестембек Е.С., ¹Муртазаев К.Н., ¹Бразжников А.С., ²Казаков В.И.

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан

²АО «Qarmet», Темиртау, Казахстан

*Автор корреспонденции e-mail: victor-romanov-47@list.ru

Информация об авторах:

Романов Виктор Иванович, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: victor-romanov-47@list.ru

Бестембек Ербол Серікұлы, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: qwert.06@mail.ru

Муртазаев Канат Нұрланұлы, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: k.murtazayev@tttu.edu.kz

Бразжников Александр Сергеевич, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: a.brazhnikov@ttt.ed.kz

Казаков Владимир Иванович, АО «Qarmet», Темиртау, Казахстан, email: vv.kazakovkazakov@mail.ru

Аннотация — В статье рассмотрена проблема образования дефекта «раструб» при выпуске шлако-металлического расплава из кислородного конвертера через леточный канал. Показано, что дефект формируется вследствие резкого охлаждения наружной части леточного блока и кристаллизации металла на торцевом участке, что приводит к нарушению компактности струи, ее окислению, газонасыщению и увеличению доли неметаллических включений. Проанализированы существующие технологические решения по подогреву леточного канала и их недостатки. Предложен комплекс технических мероприятий, включающий предварительный выпуск шлака для прогрева узла и применение целлюлозного вкладыша, обеспечивающего устойчивое формирование компактной струи. Реализация предложенной технологии позволяет снизить количество оксидных включений, уменьшить угар раскислителей и легирующих материалов, повысить стойкость футеровки и улучшить качество выпускаемой стали.

Ключевые слова — конвертер, леточный канал, раструб, шлако-металлический расплав, дефекты стали, неметаллические включения, футеровка, выпуск металла, целлюлозный вкладыш, подогрев леточного узла, качество стали.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Разработан комплекс технических решений по предотвращению образования дефекта «раструб» при выпуске расплава из кислородного конвертера. Установлено, что основными причинами возникновения дефекта являются интенсивное охлаждение торцевой части леточного канала и последующая кристаллизация металла. Предложено применение предварительного выпуска высокотемпературного шлака для прогрева леточного узла и использование целлюлозного вкладыша, обеспечивающего формирование устойчивой компактной струи расплава. Реализация предложенного комплекса

способствует снижению содержания неметаллических включений, уменьшению расхода раскислителей и повышению качества стали.

ВВЕДЕНИЕ

Завершающей стадией передела по выплавке углеродистого полупродукта в сталь в кислородном конвертере является выпуск расплава через леточный канал, расположенный на стыке цилиндрической и конической частями конструкции конвертера, предназначенный для сепарации шлака от металла [1].

С учетом основного назначения операции выпуска расплава возникает множество

сопутствующих задач по координации позиции вытекающей струи расплава по отношению к сталь-ковшу и лотков для одновременной подачи сыпучих и штучных раскисляющих и легирующих материалов, возможных аварийных переливов расплава через горловину агрегата, синхронизации скоростей наклона и подъема конвертера для “подрыва” струи и конечно же, получение компактной однородной струи без оксидных неметаллических включений возникающими из металла, шлака и футеровки.

Цель исследования. Целью исследования является разработка и научное обоснование комплекса технических решений, направленных на устранение дефекта «раструб» при выпуске расплава из кислородного конвертера посредством совершенствования технологии подготовки леточного узла и стабилизации формирования компактной струи металла.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- исследованы причины образования дефекта «раструб» при выпуске металла из кислородного конвертера;
- выполнен анализ существующих способов подогрева леточного канала и определены их недостатки;
- разработан комплекс технологических мероприятий, включающий предварительный прогрев леточного узла шлаком и применение целлюлозного вкладыша;
- оценено влияние предложенного комплекса на условия формирования струи расплава и качество выпускаемой стали.

Пробел в исследованиях. Несмотря на наличие различных способов подогрева леточного канала, существующие технологические решения не обеспечивают стабильного предотвращения образования дефекта «раструб», поскольку не устраняют интенсивное охлаждение торцевой части леточного блока в начальный период выпуска металла. Недостаточно изучены комплексные методы, сочетающие предварительный прогрев леточного узла с конструктивными решениями, обеспечивающими устойчивое формирование компактной струи расплава.

Научная новизна. Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного способа предотвращения образования дефекта «раструб», основанного на сочетании предварительного выпуска высокотемпературного шлака для прогрева леточного узла и применения целлюлозного

вкладыша специальной конструкции. Обосновано влияние предложенного комплекса на стабилизацию гидродинамики струи расплава, снижение вторичного окисления металла и уменьшение образования оксидных неметаллических включений

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В период выпуска металла из плавильного агрегата при соприкосновении наружной части леточного блока с температурой 350-700 °С (замер с помощью тепловизора FLIR T540) с жидким металлом обладающем температурой 1590-1680 °С (замер погружной платино-платинородной термопарой ПР 30/6) образуется закристаллизовавшийся металл «раструб» в виде усеченного расчленённого конуса, преобразующего компактную струю в распылённую, тем самым насыщая металл азотом, кислородом, снижая концентрацию углерода, увеличивая долю оксидов железа в ковше, что сопровождается снижением стойкости футеровки стального ковша, повышенным угаром раскислителей и легирующих материалов, а также значительным снижением температуры металла.

В традиционных металлургических агрегатах, домна, мартен, индукционная и дуговых электропечь, ферросплавные установки, плавни цветной металлургии снабжены каналами – желобами для слива металла расположенными под углом 3-75 градусов к горизонтали, что не позволяет защитить металл от атмосферы и контакта с футеровкой желоба, так как расплав рассредоточивается по поверхности, по законам гравитации и гидродинамики.

Предлагаемый технический регламент основан на том, что перед выпуском металла из конвертера через леточный канал производится выпуск шлака с температурой 1560-1640 °С в течение 10-80 секунд в шлаковую чашу, после чего производится слив металла в сталь-ковш [2].

В современных технологиях по эксплуатации сталеплавильных агрегатов [2, с 6] перед выпуском металла из реторты торцевую часть леточного канала подогревают специальной горелкой.

Недостатком данного приема является прогрев только наружных внешних слоев огнеупора, что при большой теплопроводности торец-устье быстро охлаждается и вновь на нем образуется “раструб” в виде застывшего металла.

Для гарантированного устранения дефекта «раструб» вводится дополнительное технологическое оборудование в виде целлюлозного вкладыша, толщиной 15-60 мм с отверстием равным 0,95-1,2 диаметра выходного

леточного блока, находящего соосно с леточным каналом [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлена фронтальная и горизонтальная часть (проекция) леточного узла,

где 1 – огнеупорный леточный канал, вмонтированный в стальной кожух 2 и замурованный кирпичной кладкой 3, 4 – вкладыш из целлюлозы с отверстием для монтажа 5, с полозьями 6 и крепежными элементами 7.

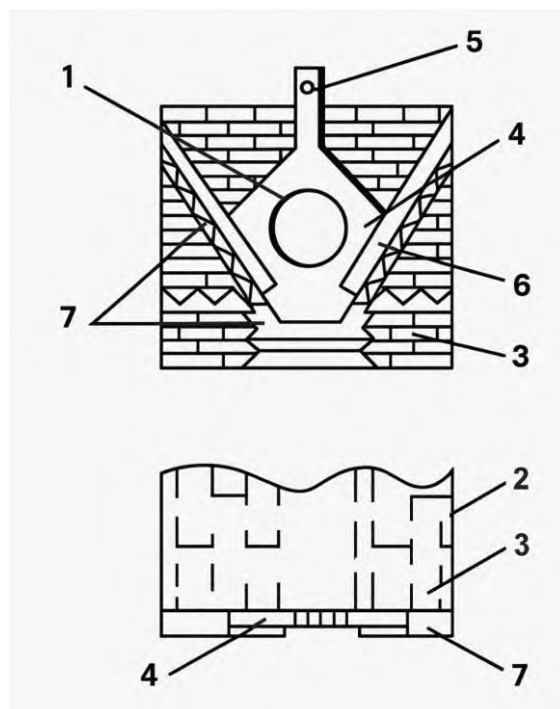


Рисунок 1 – Фронтальная и горизонтальная проекции леточного узла

1 – огнеупорный леточный канал; 2 – стальной кожух леточного блока; 3 – кирпичная кладка (огнеупорная футеровка); 4 – целлюлозный вкладыш; 5 – монтажное отверстие для установки вкладыша; 6 – полозья; 7 – крепежные элементы.

При выплавке стали на большегрузных, наиболее распространённых 300 – тонных конвертерах, леточный блок состоит из семи катушек, коаксиально вставленных друг в друга с общей длиной 161 см и внутренним цилиндрическим леточным каналом 160 мм, при пуске в работу после полной перефутеровки конвертера с продолжительностью 12 минут 10 секунд.

Стойкость футеровки леточного канала 95-140 плавов, в то время как стойкость рабочего слоя футеровки конвертера до 10000 плавов.

Перед выпуском металла леточный блок вместе с конвертером устанавливается на уровне рабочей площадки сталевара, который очищает желоба полозьев от остатков шлака, устанавливают с помощью отверстия в верхней части вкладыша, сам вкладыш после чего производят выпуск расплава из конвертера.

Использование предлагаемого оборудования и технологии позволяет создать условия для получения качественной стали путем снижения доли неметаллических включений, снизить расход электроэнергии на подогрев, увеличить стойкость

футеровки сталеразливочных и промежуточных ковшей.

ВЫВОДЫ

Установлено, что образование дефекта «раструб» при выпуске расплава из конвертера является следствием резкого охлаждения торцевой части леточного канала и последующей кристаллизации металла, что приводит к распылению струи, повышенному окислению и газонасыщению расплава.

Показано, что традиционный подогрев торца леточного блока горелками не обеспечивает достаточной глубины прогрева, вследствие чего дефект формируется повторно уже в начальный период выпуска металла.

Предложена технологическая схема, включающая предварительный выпуск высокотемпературного шлака, который обеспечивает прогрев леточного узла до 1500-1610 °С и создаёт условия для формирования стабильной компактной струи.

Разработана конструкция целлюлозного вкладыша, устанавливаемого соосно с леточным

каналом. Его применение позволяет существенно уменьшить охлаждение расплава и предотвратить образование дефекта «раструб» в течение всего периода выпуска металла.

Внедрение предложенного комплекса технических мероприятий позволяет снизить содержание оксидных неметаллических включений в стали, уменьшить угар раскислителей и легирующих материалов, повысить стойкость футеровки разливочных и промежуточных ковшей и улучшить общее качество металлического стали.

ВКЛАД АВТОРОВ

(таксономия CRediT):

В.И. Романов: концептуализация исследования, разработка методологии, научное руководство, формальный анализ, интерпретация результатов, подготовка первоначального варианта рукописи.

Е.С. Бестембек: проведение исследования, разработка технических решений, сбор и обработка экспериментальных данных, визуализация результатов, подготовка материалов статьи.

К.Н. Муртазаев: анализ литературных источников, валидация результатов исследования, участие в обсуждении полученных данных, научное редактирование рукописи.

А.С. Бражников: анализ и интерпретация результатов, разработка графических материалов, проверка корректности технических решений, редактирование рукописи.

В.И. Казаков: консультирование по производственным вопросам, предоставление технологических данных и экспертная оценка предложенных технических решений, рецензирование рукописи.

Все авторы принимали участие в обсуждении результатов исследования, ознакомились с окончательной версией рукописи, одобрили её к публикации и несут ответственность за достоверность представленных данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность специалистам АО «Qarmet» за содействие при проведении производственных наблюдений, предоставление технологической информации и консультационную поддержку при апробации предложенных технических решений. Также авторы признательны редакции и рецензентам журнала за конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению содержания статьи.

Авторское право © 2025 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение материала в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения аналогичной лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. И. Романов, К. А. Ногаев и Е. С. Бестембек, «Способ выпуска расплава из конвертера», Патент Республики Казахстан № 36507, МПК C21C 5/42, C21C 5/46, F27D 3/15, опубл. в бюл. № 50, 2023.
- [2] Г. Холлэйс и К. Файгл, «БМЗ-ФАИ / Начало и перспективы», *Сталь*, № 10, с. 6–8, 2002.
- [3] Б. А. Жаутиков, В. И. Романов и К. А. Ногаев, «Леточный узел сталеплавильного агрегата», Патент Республики Казахстан № 35140, МПК C21C 5/28, C21C 5/46, F27D 3/1, опубл. в бюл. № 24, 2021.

REFERENCES

- [1] V. I. Romanov, K. A. Nogaev, and E. S. Bestembek, “Method for tapping melt from a converter,” *Patent of the Republic of Kazakhstan* No. 36507, IPC C21C 5/42, C21C 5/46, F27D 3/15, Bull. no. 50, 2023.
- [2] G. Hollais and K. Faigl, “BMZ-FAI: Beginning and Prospects,” *Stal' (Steel)*, no. 10, pp. 6–8, 2002.
- [3] B. A. Zhautikov, V. I. Romanov, and K. A. Nogaev, “Tap-hole assembly of a steelmaking unit,” *Patent of the Republic of Kazakhstan* No. 35140, IPC C21C 5/28, C21C 5/46, F27D 3/1, Bull. no. 24, 2021.

ENERGY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF CONVERTING BOILER PLANTS FROM PULVERIZED COAL TO NATURAL GAS

**Akchulpanov R., Zhabalova G.G., Kamarova S.N., Onishchenko O.N., Kornev V.V.*

NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan

**Corresponding author email: r.akchulpanov@tttu.edu.kz*

Authors information:

Akchulpanov Rauan, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail:

r.akchulpanov@tttu.edu.kz

Zhabalova Gulnara Gazizovna, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,

e-mail: g.zhabalova@tttu.edu.kz

Kamarova Saule Nurtazaevna, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,

e-mail: s.kamarova@tttu.edu.kz

Onishchenko Olga Nikolaevna, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,

e-mail: o.onichshenko@tttu.edu.kz

Kornev V.V., NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: v.kornev@tttu.edu.kz

Abstract — In the current stage of Kazakhstan’s energy sector development, one of the key priorities is improving energy efficiency and reducing the carbon footprint of the fuel and energy complex. One of the most effective solutions is the conversion of existing boiler plants from pulverized coal to natural gas, which significantly increases equipment efficiency and reduces pollutant emissions. This study presents a comparative analysis of the energy and environmental performance of coal- and gas-fired boilers based on statistical data from JSC “KEGOC” and international agencies such as IEA, IRENA, and IPCC for the period 2020-2024. The results show that when switching to natural gas, the boiler efficiency increases from 68% to 88%, while the specific emissions of CO₂, SO₂, NO_x, and particulate matter decrease by 45-95%. Additionally, gas-fired boilers are characterized by a more stable combustion process, lower equipment wear, and the potential for cogeneration integration. The analysis confirms that the gasification of heat sources is a key stage in implementing the national decarbonization program and contributes to a significant improvement in the environmental situation in Kazakhstan’s industrial regions.

Keywords — energy efficiency, boiler plants, natural gas, pulverized coal, decarbonization, gasification.

КӨМІР ШАҢДЫ ОТЫННАН ТАБИҒИ ГАЗҒА АУЫСТЫРЫЛҒАН ҚАЗАНДЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ТИІМДІЛІГІ

**Акчульпанов Р., Жабалова Г.Г., Камарова С.Н., Онищенко О.Н., Корнев В.В.*

«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан

**Корреспондент автор e-mail: r.akchulpanov@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Акчульпанов Рауан, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: r.akchulpanov@tttu.edu.kz

Жабалова Гульнара Газизовна, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: g.zhabalova@tttu.edu.kz

Камарова Сауле Нуртазаевна, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: s.kamarova@tttu.edu.kz

Онищенко Ольга Николаевна, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан,

e-mail: o.onichshenko@tttu.edu.kz

Корнев В.В., «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан, e-mail: v.kornev@tttu.edu.kz

Аңдатпа — Қазіргі Қазақстан энергетикасының даму жағдайында негізгі бағыттардың бірі – энергия тиімділігін арттыру және отын-энергетикалық кешеннің көміртек жүктемесін азайту болып табылады. Ең тиімді шешімдердің бірі – жұмыс істеп тұрған қазандық қондырғыларын көмір шаңды отыннан табиғи газға көшіру.

Бұл тәсіл жабдықтың пайдалы әсер коэффициентін (ПЭК) едәуір арттыруға және зиянды заттар шығарындыларын азайтуға мүмкіндік береді. Осы жұмыста 2020-2024 жылдар аралығындағы «KEGOC» АҚ және халықаралық агенттіктер IEA, IRENA және IPCC деректері негізінде көмір және газ қазандықтарының энергетикалық және экологиялық көрсеткіштеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижелері табиғи газға көшу кезінде қазандықтардың ПЭК-і 68%-дан 88%-ға дейін өсетінін, ал CO₂, SO₂, NO_x және қатты бөлшектердің меншікті шығарындылары 45-95%-ға төмендейтінін көрсетті. Сонымен қатар, газ қазандықтары жану процесінің тұрақтылығымен, жабдықтың тозуының аздығымен және когенерациялық технологияларды біріктіру мүмкіндігімен ерекшеленетіні анықталды. Жүргізілген талдау жылу көздерін газдандыру мемлекеттік декарбонизация бағдарламасын іске асырудың маңызды кезеңі болып табылатынын және Қазақстанның өнеркәсіптік өңірлеріндегі экологиялық жағдайды айтарлықтай жақсартатынын дәлелдейді.

Түйін сөздер — энергия тиімділігі, қазандық қондырғылары, табиғи газ, көмір шанды отын, декарбонизация, газдандыру.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕВОДА КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

**Акчульпанов Р., Жабалова Г.Г., Камарова С.Н., Онищенко О.Н., Корнев В.В.*

НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан

**Автор корреспонденции e-mail: r.akchulpanov@tttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Акчульпанов Рауан, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: r.akchulpanov@tttu.edu.kz

Жабалова Гульнара Газизовна, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: g.zhabalova@tttu.edu.kz

Камарова Сауле Нургазиевна, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: s.kamarova@tttu.edu.kz

Онищенко Ольга Николаевна, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: o.onichshenko@tttu.edu.kz

Корнев В.В., НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: v.kornev@tttu.edu.kz

Аннотация — В современных условиях развития энергетики Казахстана ключевым направлением является повышение энергоэффективности и снижение углеродной нагрузки топливно-энергетического комплекса. Одним из наиболее эффективных решений выступает перевод действующих котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ, что позволяет существенно повысить КПД оборудования и снизить выбросы загрязняющих веществ. В данной работе проведён сравнительный анализ энергетических и экологических показателей угольных и газовых котельных на основе статистических данных АО «KEGOC» и международных агентств IEA, IRENA и IPCC за 2020-2024 годы. Результаты исследования показали, что при переходе на природный газ коэффициент полезного действия котельных возрастает с 68% до 88%, а удельные выбросы CO₂, SO₂, NO_x и твёрдых частиц снижаются на 45-95%. Дополнительно отмечено, что газовые котельные характеризуются более стабильным режимом горения, меньшим износом оборудования и возможностью интеграции когенерационных технологий. Проведённый анализ подтверждает, что газификация тепловых источников является важным этапом реализации государственной программы декарбонизации и обеспечивает значительное улучшение экологической ситуации в промышленных регионах Казахстана.

Ключевые слова — энергоэффективность, котельные установки, природный газ, пылеугольное топливо, декарбонизация, газификация.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Выполнена комплексная оценка энергетической и экологической эффективности перевода котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ. Установлено, что переход на природный газ обеспечивает повышение коэффициента полезного действия котельных с 67 до 88 % за счет снижения

тепловых потерь и более полного сгорания топлива. Определены количественные показатели сокращения выбросов загрязняющих веществ (CO₂, SO₂, NO_x и PM_{2.5}) при сохранении одинаковой тепловой мощности котельной. Предложен интегральный энергетико-экологический показатель, позволяющий комплексно оценивать эффективность

мероприятий по газификации теплоэнергетических объектов.

ВВЕДЕНИЕ

Современная энергетическая политика Республики Казахстан ориентирована на устойчивое развитие и поэтапную декарбонизацию топливно-энергетического комплекса. В структуре энергопроизводства страны доля угольного топлива по состоянию на 2024 год составляет более 60%, что обуславливает высокие выбросы диоксида углерода и других загрязняющих веществ [1]. Основные котельные установки, функционирующие на пылеугольном топливе, характеризуются низким коэффициентом полезного действия (в среднем 65-70%) и повышенными затратами на техническое обслуживание [2]. В то же время мировой и национальный тренд направлен на повышение энергоэффективности, сокращение углеродного следа и переход к более чистым источникам энергии [3].

Одним из ключевых направлений модернизации коммунально-промышленных тепловых источников в Казахстане является перевод котельных с пылеугольного топлива на природный газ. Данный процесс обеспечивает значительное снижение удельных выбросов CO_2 , SO_2 , NO_x и твёрдых частиц, а также повышение энергетической эффективности систем теплоснабжения [4]. Согласно исследованиям Международного энергетического агентства (IEA), при использовании природного газа количество выбросов CO_2 уменьшается на 45-50%, выбросы сернистых соединений – на 95%, а твёрдых частиц ($\text{PM}_{2.5}$) – более чем в 50 раз по сравнению с угольным топливом [5].

Дополнительным преимуществом газификации является возможность внедрения когенерационных технологий, что позволяет одновременно вырабатывать тепловую и электрическую энергию, повышая общий КПД установки до 90-92% [6]. Использование природного газа способствует также снижению износа оборудования, уменьшению затрат на фильтрацию дымовых газов и созданию более безопасных условий эксплуатации [7].

В Казахстане реализация программ по газификации активно осуществляется в регионах с высоким уровнем загрязнения атмосферы – Карагандинской, Павлодарской и Костанайской областях. По данным АО «KEGOC», только за 2020-2024 годы количество котельных, переведённых на природный газ, увеличилось более чем в два раза, что уже позволило снизить выбросы углерода на 1,2 млн тонн в год [8].

Цель исследования. Целью исследования является комплексная оценка энергетической и экологической эффективности перевода котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ на основе сравнительного анализа теплотехнических характеристик, коэффициента полезного действия, тепловых потерь и выбросов загрязняющих веществ.

Задачи исследования. выполнить анализ современного состояния использования угольного топлива и природного газа в теплоэнергетике Казахстана;

провести расчет энергетических показателей угольных и газовых котельных при одинаковой тепловой нагрузке;

определить изменение коэффициента полезного действия и структуры тепловых потерь при переходе на природный газ;

выполнить сравнительную оценку выбросов CO_2 , SO_2 , NO_x и твёрдых частиц по методикам IPCC и EPA;

разработать интегральный показатель энергетико-экологической эффективности газификации котельных установок.

Пробел в исследованиях. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных вопросам декарбонизации энергетики и повышению эффективности теплоэнергетических установок, недостаточно работ, в которых одновременно выполняется комплексная оценка энергетических и экологических преимуществ перевода котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ с использованием единой расчетной методики. Кроме того, ограничено количество исследований, учитывающих современные статистические данные Республики Казахстан и объединяющих анализ коэффициента полезного действия, теплового баланса, выбросов загрязняющих веществ и интегральных показателей эффективности.

Научная новизна. Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного методического подхода к оценке эффективности перевода котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ, основанного на совместном анализе энергетических, теплотехнических и экологических показателей. Предложен интегральный энергетико-экологический показатель, позволяющий количественно оценить совокупный эффект газификации с учетом прироста коэффициента полезного действия и снижения выбросов загрязняющих веществ, что обеспечивает более объективную оценку

эффективности мероприятий по декарбонизации теплоэнергетики Казахстана.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Методическая основа исследования направлена на определение энергетической и экологической эффективности перевода котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ. Целью методики является получение объективных данных о влиянии вида топлива на КПД, расход энергии, уровень выбросов загрязняющих веществ и общий экологический эффект. Исследование выполнено с использованием комплексного подхода, включающего анализ нормативных документов, расчёт теплотехнических показателей, а также сопоставление фактических и расчётных данных по котельным установкам Казахстана [1-8].

В качестве информационной базы использовались отчёты АО «КЕГОС» за 2020-2024 годы, статистические материалы Министерства энергетики Республики Казахстан, а также международные источники – IEA, IRENA, IPCC и EPA. Для уточнения расчётов были привлечены учебные и методические пособия по теплотехнике и котельным установкам, в том числе труды Богословского и Кибарина [9-11].

Методика включает последовательные этапы: анализ исходных данных, определение энергетических показателей котельных, расчёт теплового баланса, оценку выбросов загрязняющих веществ и интегральную оценку эффективности газификации. Особое внимание уделяется сравнению угольных и газовых котельных при одинаковых условиях эксплуатации, что позволяет установить количественные различия в эффективности и экологических характеристиках.

Исходные теплотехнические параметры топлива – низшая теплота сгорания и массовое содержание углерода и серы – определяются по ГОСТ 147-2013 [10]. Средние значения составляют для пылеугольного топлива 27-29 МДж/кг, а для природного газа 34-36 МДж/м³. Эти различия непосредственно влияют на энергетическую эффективность котельных.

Теплотворная способность определяет величину теплового потока, поступающего на теплообменные поверхности котла. Для оценки КПД котельной используется зависимость:

$$\eta = (Q_{\text{тепл}}/Q_n) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где Q_n – полезная теплота, переданная в систему теплоснабжения, а $Q_{\text{тепл}}$ – количество теплоты, выделившееся при сгорании топлива.

Полезная теплота определяется произведением расхода теплоносителя, его удельной теплоёмкости и температурного перепада между подающей и обратной линиями:

$$Q_n = G \cdot C_p \cdot (t_1 - t_2), \quad (2)$$

где G – массовый расход воды, C_p – теплоёмкость (4,19 кДж/кг·°C), t_1 , t_2 – температуры подачи и обратки соответственно.

В качестве иллюстративного, но реалистичного режима приняты параметры теплофикационного контура: расход воды $G = 120$ кг/с, температуры подачи и обратки $t_1 = 95^\circ\text{C}$ и $t_2 = 70^\circ\text{C}$, удельная теплоёмкость воды $C_p = 4,19$ кДж/(кг·°C). Полезная тепловая мощность котельной при таких условиях равна:

$$Q_n = 120 \cdot 4,19 \cdot (95 - 70) = 12,570 \text{ кДж/с} = 12,57 \text{ МВт}. \quad (3)$$

Для варианта на угле принимается низшая теплота сгорания $q_{\text{нр, уг}} = 28$ МДж/кг [10]. Если фактический секундный расход топлива $B_{\text{уг}} = 0,67$ кг/с, то тепловой ввод в топку равен:

$$Q_{\text{топл, уг}} = B_{\text{уг}} \cdot q_{\text{нр, уг}} = 0,67 \times 28,000 = 18,76 \text{ МВт}. \quad (4)$$

Отсюда коэффициент полезного действия угольной котельной составляет:

$$\eta_{\text{уг}} = (18,76/12,57) \cdot 100 = 67,0\% \quad (5)$$

Полученное значение соответствует типовым удельным потерям пылеугольных агрегатов: суммарно около 12-14% при работе с избытком воздуха, значимых потерях с уходящими газами и неполноте сгорания [9, 11].

Для варианта на природном газе принимается низшая теплота сгорания $q_{\text{нр, газ}} = 35$ МДж/м³ [10]. Требуемый тепловой ввод для поддержания той же полезной мощности при целевом КПД $\eta_{\text{газ}} = 88\%$ определяется через:

$$Q_{\text{топл., газ}} = Q_n / \eta_{\text{газ}} = 12,57/0,88 = 14,29 \text{ МВт}. \quad (6)$$

Эквивалентный объёмный расход газа:

$$V_{\text{газ}} = Q_{\text{топл., газ}} / q_{\text{нр, газ}} = 14,29 \cdot 10^3 \text{ кДж/с} / 35,000 \text{ кДж/м}^3 = 0,408 \text{ м}^3/\text{с} \approx 1,47 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (7)$$

Переход от угля к газу повышает КПД с 67,0% до 88,0% то есть на 21%, что физически связано с меньшими потерями с уходящими газами, отсутствием химической неполноты сгорания и снижением механической неполноты (зольности) в газовом варианте [9, 11]. На рис. 1

представлен сравнение КПД угольной и газовой котельных.

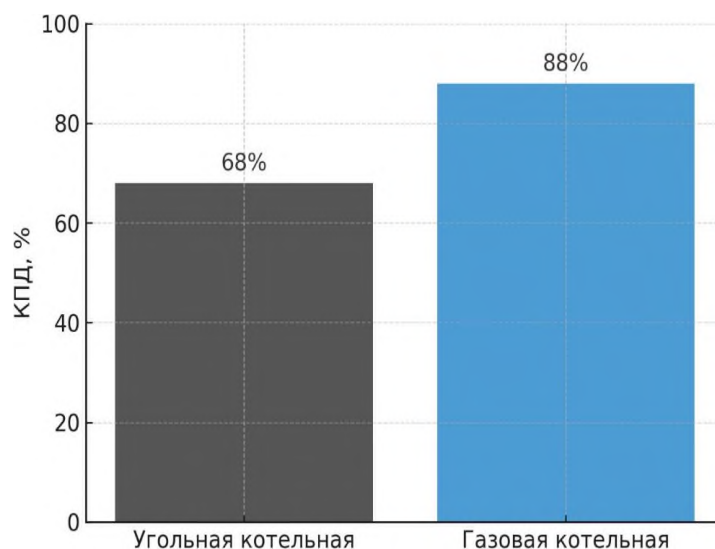


Рисунок 1 – Сравнение КПД угольной и газовой котельных

Переходя к выбросам, за 1 час устойчивой работы рассматриваемого режима выработка тепла равна:

$$A = Q_n \cdot 3600 \text{ с/ч} = 12,57 \cdot 3,6 = 45,252 \text{ ГДж.} \quad (8)$$

Используя методику IPCC и эмиссионные факторы IPCC/EPA [6, 7], находим часовые выбросы каждого загрязнителя по формуле:

$$E_i = A \cdot EF_i \quad (9)$$

где E_i – масса выбросов i -го загрязняющего вещества, кг/ГДж;

A – количество сожжённого топлива, ГДж;

EF_i – эмиссионный фактор, кг/ГДж.

Значения эмиссионных факторов определялись по данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2023) и Агентства по охране окружающей среды США (EPA, 2024) [6, 7]. Для угольного топлива при $EF_{CO_2} = 94 \text{ кг/ГДж}$, $EF_{SO_2} = 900 \text{ г/ГДж}$, $EF_{NO_x} = 450 \text{ г/ГДж}$, $EF_{PM_{2.5}} = 180 \text{ г/ГДж}$ получаем:

$$\begin{aligned} E_{CO_2, \text{уг}} &= 45,252 \cdot 94 = 4,253 \text{ кг/ч} \approx 4,25 \text{ т/ч}; \\ E_{SO_2, \text{уг}} &= 45,252 \cdot 900 = 40,727 \text{ г/ч} = 40,73 \text{ кг/ч}; \\ E_{NO_x, \text{уг}} &= 45,252 \cdot 450 = 20,363 \text{ г/ч} = 20,36 \text{ кг/ч}; \\ E_{PM_{2.5}, \text{уг}} &= 45,252 \cdot 180 = 8,145 \text{ г/ч} = 8,15 \text{ кг/ч}. \end{aligned}$$

Для природного газа при: $EF_{CO_2} = 50 \text{ кг/ГДж}$, $EF_{SO_2} = 40 \text{ г/ГДж}$, $EF_{NO_x} = 180 \text{ г/ГДж}$, $EF_{PM_{2.5}} = 3 \text{ г/ГДж}$. соответственно:

$$\begin{aligned} E_{CO_2, \text{газ}} &= 45,252 \cdot 50 = 2,263 \text{ кг/ч} \approx 2,26 \text{ т/ч}; \\ E_{SO_2, \text{газ}} &= 45,252 \cdot 40 = 1,810 \text{ г/ч} = 1,81 \text{ кг/ч}; \\ E_{NO_x, \text{газ}} &= 45,252 \cdot 180 = 8,145 \text{ г/ч} = 8,15 \text{ кг/ч}; \\ E_{PM_{2.5}, \text{газ}} &= 45,252 \cdot 3 = 136 \text{ г/ч} = 0,136 \text{ кг/ч}. \end{aligned}$$

Сопоставление показывает, что при сохранении той же полезной мощности газовая котельная снижает CO_2 примерно в 1,9 раза, SO_2 – более чем в 22 раза, $PM_{2.5}$ – в 60 раз, а NO_x – примерно в 2,5 раза. Для наглядности эти различия представлены на рис. 2 [5-7].

Основная доля выбросов приходится на диоксид углерода (CO_2) – около 4,25 кг/ч, что свидетельствует о значительной углеродной нагрузке при сжигании угля. Также существенны выбросы оксидов серы и азота, являющиеся основными причинами кислотных дождей и фотохимического смога.

Переход на природный газ обеспечивает существенное снижение выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов при сохранении прежнего уровня теплоснабжения. Это подтверждает необходимость модернизации систем теплоснабжения с акцентом на переход к более экологически чистым видам топлива.

Дальнейшее снижение эмиссий возможно за счёт внедрения систем очистки дымовых газов, повышения энергоэффективности оборудования и интеграции возобновляемых источников энергии в гибридные системы теплоснабжения.

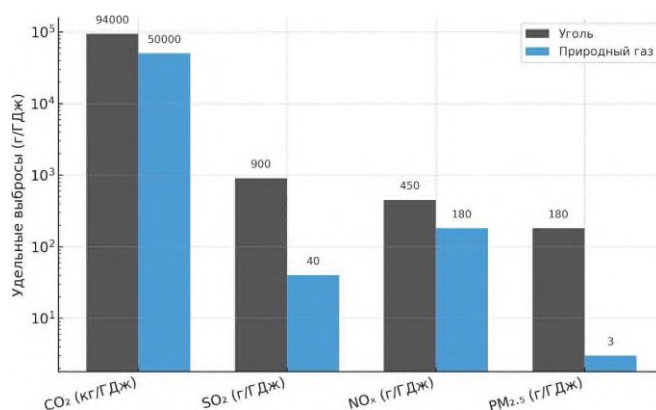


Рисунок 2 – Сравнение удельных выбросов загрязняющих веществ

Тепловой баланс аппроксимировался распределением потерь, согласованным с полученными КПД. Для угольного варианта при $Q_{топл, уг} = 18,76$ принята суммарная доля потерь 33%: с уходящими газами 20%, химическая неполнота 6%, механическая неполнота 4%, корпус/радиация 3%.

Соответствующие мощности потерь: 3,753, 1,131, 0,750 и 0,56 МВт (суммарно 6,19 МВт), что даёт

$\eta_{уг} \approx 67\%$. Для газового варианта при $Q_{топл, газ} = 14,29$ МВт суммарные потери приняты 12%: уходящие газы 8%, механическая 1%, корпус/радиация 2%, прочие 1%, что соответствует 1,14, 0,14, 0,29, 0,14 МВт (суммарно 1,71 МВт) и даёт $\eta_{газ} \approx 88\%$. Для иллюстрации структуры тепловых потерь целесообразно использовать графическое сравнение по четырём категориям для угольного и газового топлива (см. рис. 3) [9; 11].

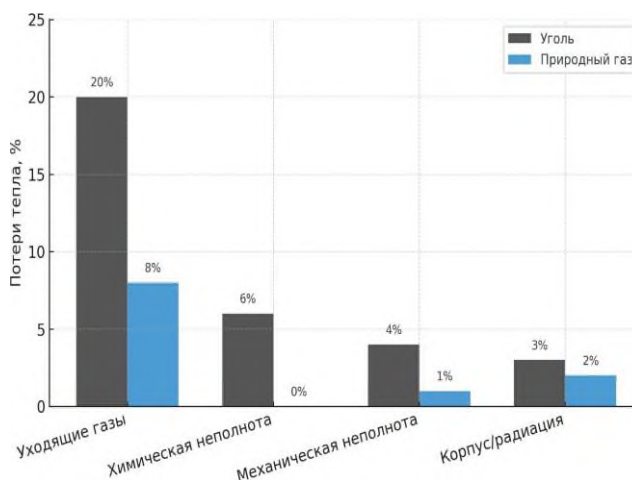


Рисунок 3 – Сравнение потерь угля и газа

Для сопоставления энергетического выигрыша и экологического эффекта введём интегральный показатель, отражающий совокупный результат газификации при сохранении тепловой нагрузки. Идея показателя состоит в том, что итоговая «польза» складывается из двух безразмерных слагаемых: относительного прироста КПД и относительного снижения суммарных выбросов. С учётом приоритетов отрасли (энергоэффективность – первична, экология – ко-приоритет) используем весовые коэффициенты α и β так, чтобы $\alpha + \beta = 1$.

Совокупный эффект газификации оценивается на уровне 37,8%, что интерпретируется как интегральный прирост «полезности» системы с учётом выбранных весовых приоритетов энергетического и экологического критериев. В случае, если в конкретном проекте экологический аспект является определяющим, допустимо увеличение коэффициента β и соответствующее уменьшение α ; при этом методологический подход, нормировки и интерпретация результатов сохраняются без изменений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённые расчёты показали, что переход от пылеугольного топлива к природному газу приводит к значительному росту энергетической эффективности и существенному снижению экологической нагрузки на окружающую среду. При сохранении одинаковой тепловой мощности котельной $Q_n = 12,57$ МВт использование природного газа обеспечивает повышение коэффициента полезного действия с $\eta_{yz} = 67\%$ до $\eta_{газ} = 88\%$ что соответствует приросту на 21 процентный пункт.

Расчёты экологических показателей выявили, что при переходе на природный газ наблюдается снижение удельных выбросов загрязняющих веществ более чем в пять раз. Удельные выбросы диоксида углерода уменьшаются с 94 до 50 кг/ГДж, оксидов серы – с 900 до 40 г/ГДж, оксидов азота – с 450 до 180 г/ГДж, а твёрдых частиц (PM_{2.5}) – с 180 до 3 г/ГДж. На рисунке 2 наглядно показано, что доля твёрдых частиц и сернистых соединений при сжигании природного газа практически стремится к нулю, что подтверждает высокую экологическую эффективность газификации.

Анализ теплового баланса подтвердил, что для угольных котельных суммарные потери составляют около 14%, из которых 7% приходится на уходящие газы, 3% – на химическую неполноту сгорания и до 4% – на механическую неполноту и теплопередачу через корпус. Для газовых котельных эти потери снижаются до 6%, что согласуется с расчётным КПД 88%.

Для обобщённой оценки использован интегральный энергетико-экологический показатель, объединяющий относительный прирост КПД и относительное снижение суммарных выбросов. Расчёты показали, что совокупный эффект газификации составляет около 37,8%, что подтверждает комплексное улучшение эксплуатационных характеристик котельных при переходе на природный газ.

Таким образом, газификация котельных установок является эффективным инструментом повышения энергоэффективности и снижения углеродного следа в теплоэнергетике Казахстана, особенно в регионах с высокой концентрацией промышленных источников выбросов – Карагандинской, Павлодарской и Костанайской областях [1-8].

ВЫВОДЫ

1. Проведённый анализ подтвердил, что перевод котельных установок с пылеугольного топлива на природный газ обеспечивает повышение КПД с 67% до 88%, то есть примерно на 21 процентный пункт.

2. Суммарные тепловые потери при газовом сжигании сокращаются более чем вдвое, главным образом за счёт снижения потерь с уходящими газами и отсутствия механической и химической неполноты сгорания.

3. Экологическая эффективность газификации выражается в снижении выбросов CO₂ почти в два раза, SO₂ – более чем в двадцать раз, NO₂ – в 2,5 раза, а твёрдых частиц (PM_{2.5}) – почти в 60 раз.

4. Интегральный энергетико-экологический эффект газификации составил 37,8%, что свидетельствует о комплексном улучшении характеристик системы и подтверждает целесообразность внедрения природного газа в качестве основного энергоносителя для коммунально-промышленных котельных Казахстана.

ВКЛАД АВТОРОВ

(таксономия CRediT):

Акчульпанов Р.А.: концептуализация исследования, разработка методологии, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов, визуализация данных, подготовка первоначального варианта рукописи.

Жабалова Г.Г.: формальный анализ, проверка расчетов, участие в интерпретации результатов, научное редактирование рукописи.

Камарова С.Н.: анализ литературных источников, валидация результатов исследования, участие в обсуждении результатов, подготовка материалов статьи.

Онищенко О.Н.: научное консультирование, анализ энергетических и экологических аспектов исследования, критический пересмотр содержания рукописи.

Корнев В.В.: научное руководство, постановка задач исследования, экспертная оценка полученных результатов, окончательное редактирование и утверждение рукописи.

Все авторы принимали участие в обсуждении результатов исследования, ознакомились с окончательной версией рукописи, одобрили её к публикации и несут ответственность за достоверность представленных данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллективу НАО «Карагандинский индустриальный университет» за поддержку при выполнении исследования, а также Министерству энергетики Республики Казахстан, АО «KEGOC», Международному энергетическому агентству (IEA), Международному агентству по возобновляемым источникам энергии (IRENA), Межправительственной группе экспертов по изменению климата (IPCC) и Агентству по охране окружающей среды США (EPA) за предоставленные статистические и методические

материалы, использованные при подготовке исследования.

Авторское право © 2025 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение материала в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения аналогичной лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Министерство энергетики Республики Казахстан, Национальный энергетический обзор. Астана, Казахстан, 2024.
- [2] Г. М. Аубакирова и др., «Декарбонизация экономики Казахстана: перспективы энергетического перехода», *Economy: Strategy and Practice*, т. 18, № 4, с. 55–72, 2024.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA), *World Energy Transitions Outlook 2024*. Abu Dhabi, UAE: IRENA, 2024.
- [4] S. A. Pigolkin, “Methodological Tools for Improving Energy Efficiency of Industrial Enterprises,” *Energy Systems Research*, vol. 12, no. 2, pp. 45–56, 2024.
- [5] International Energy Agency (IEA), *Kazakhstan Energy Profile 2024*. Paris, France: IEA, 2024.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2023: Mitigation of Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.
- [7] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *Air Pollutant Emission Factors (AP-42)*. Washington, DC, USA: EPA, 2024.
- [8] KEGOC, *Annual Report 2024*. Астана, Казахстан, 2024.
- [9] В. Н. Богословский, *Техническая термодинамика*. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 2019.
- [10] ГОСТ 147–2013, *Топливо твёрдое. Методы определения теплоты сгорания*. Москва, Россия: Стандартинформ, 2013.
- [11] А. А. Кибарин и Т. В. Ходанова, *Котельные установки тепловых электростанций*. Москва, Россия: Академия, 2020.

REFERENCES

- [1] Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, *National Energy Review*. Astana, Kazakhstan, 2024.
- [2] G. M. Aubakirova et al., “Decarbonization of Kazakhstan's Economy: Prospects for the Energy Transition,” *Economy: Strategy and Practice*, vol. 18, no. 4, pp. 55–72, 2024.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA), *World Energy Transitions Outlook 2024*. Abu Dhabi, UAE: IRENA, 2024.
- [4] S. A. Pigolkin, “Methodological Tools for Improving Energy Efficiency of Industrial Enterprises,” *Energy Systems Research*, vol. 12, no. 2, pp. 45–56, 2024.
- [5] International Energy Agency (IEA), *Kazakhstan Energy Profile 2024*. Paris, France: IEA, 2024.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2023: Mitigation of Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.
- [7] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *Air Pollutant Emission Factors (AP-42)*. Washington, DC, USA: EPA, 2024.
- [8] Kazakhstan Electricity Grid Operating Company (KEGOC), *Annual Report 2024*. Astana, Kazakhstan, 2024.
- [9] V. N. Bogoslovskii, *Technical Thermodynamics*. Moscow, Russia: Energoatomizdat, 2019.
- [10] GOST 147–2013, *Solid Fuel. Methods for Determining the Heat of Combustion*. Moscow, Russia: Standartinform, 2013.
- [11] A. A. Kibarin and T. V. Khodanova, *Boiler Plants of Thermal Power Stations*. Moscow, Russia: Akademiya, 2020.

A METHOD FOR CONVERTING A REGULAR BUTTON INTO A STATE-RETAINING BUTTON USING ARDUINO PROGRAMMING

^{1*}Romanov D., ²Yessengaliyev A.

¹NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan

²NPJSC “L.N.Gumilyov Eurasian National University”, Astana, Kazakhstan

*Corresponding author email: d.romanov@tttu.edu.kz

Authors information:

Romanov Dmitry, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: d.romanov@tttu.edu.kz

Yessengaliyev Adilkazy, NPJSC “L.N.Gumilyov Eurasian National University”, Astana, Kazakhstan. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1977-5661>, e-mail: Adil.yesengaliyev@gmail.com

Abstract — The article presents a software-based method for converting a conventional momentary push button into a state-retaining (toggle) button using the Arduino programming environment. Unlike a standard push button, which remains active only while pressed, the proposed method enables the button to retain its logical state after each actuation without requiring additional electronic components such as flip-flops, relays, or latching switches. The approach is based on detecting the transition of the button signal from the released to the pressed state and changing the stored logical variable each time this event occurs. To improve operational reliability, the algorithm incorporates software debouncing to eliminate false triggering caused by mechanical contact bounce. The proposed solution reduces hardware complexity, minimizes system cost, and increases flexibility, since the switching behavior can be easily modified by changing the program code. The method is suitable for controlling LEDs, relays, motors, and other actuators that require stable ON/OFF operation. Practical implementation examples demonstrate the effectiveness of the algorithm in educational laboratory projects, home automation systems, lighting control, industrial control panel simulation, and rapid prototyping of embedded devices. Experimental testing confirmed stable operation under repeated switching cycles and reliable state retention during continuous controller operation.

Keywords — Arduino, button, state-retaining button, programming, automation, state control, electronic devices, education.

ARDUINO ПЛАТФОРМАСЫНДА БАҒДАРЛАМАЛАУ АРҚЫЛЫ КҮЙДІ ЕСТЕ САҚТАЙТЫН БАТЫРМАНЫ ЖАСАУ ӘДІСІ

^{1*}Романов Д.Ю., ²Есенғалиев Ә.М.

¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан

²«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ

*Корреспондент автор e-mail: d.romanov@tttu.edu.kz

Авторлар туралы ақпарат:

Романов Дмитрий Юрьевич, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан, e-mail: d.romanov@tttu.edu.kz

Есенғалиев Әділқазы Мағазұлы, «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1977-5661>, e-mail: Adil.yesengaliyev@gmail.com

Аңдатпа — Мақалада Arduino бағдарламалау ортасын пайдалана отырып, кәдімгі қысқа уақытқа басылатын батырманы күйді сақтайтын (ауыстырып-қосқыш) батырға бағдарламалық түрде түрлендіру әдісі ұсынылған. Қалыпты батырма тек басылған сәтте ғана белсенді болатын болса, ұсынылған әдіс әрбір басудан кейін оның логикалық күйін триггерлер, релелер немесе механикалық бекіткіші бар батырмалар сияқты қосымша аппараттық элементтерді қолданбай сақтауға мүмкіндік береді. Әдістің негізі батырма сигналының «жіберілген» күйден «басылған» күйге ауысуын анықтауға және осындай әрбір оқиға кезінде сақталған логикалық айнымалының мәнін өзгертуге негізделген. Жұмыс сенімділігін арттыру мақсатында алгоритмге батырма контактілерінің механикалық дірілінен туындайтын жалған іске қосылуларды болдырмайтын бағдарламалық debouncing (контактілердің дірілін бағдарламалық сүзгілеу) енгізілген. Ұсынылған шешім құрылғының аппараттық күрделілігін азайтады, оның құнын төмендетеді және жүйенің икемділігін арттырады, өйткені

ауыстырып-қосу логикасын бағдарламалық кодты өзгерту арқылы оңай бейімдеуге болады. Әдіс жарықдиодтарды, релелерді, электрқозғалтқыштарды және тұрақты қосу/өшіру режимін қажет ететін басқа да атқарушы құрылғыларды басқару үшін қолданылуы мүмкін. Практикалық іске асыру мысалдары алгоритмнің оқу зертханалық жобаларында, үйді автоматтандыру жүйелерінде, жарықтандыруды басқаруда, өнеркәсіптік басқару панельдерін модельдеуде және ендірілген құрылғыларды жедел прототиптеуде тиімді екенін көрсетеді. Эксперименттік сынақтар алгоритмнің көп мәрте ауыстырып-қосу циклдері кезінде тұрақты жұмыс істейтінін және микроконтроллердің үздіксіз жұмысы барысында күйдің сенімді сақталатынын растады.

Түйін сөздер — Arduino, батырма, күйді есте сақтайтын батырма, бағдарламалау, автоматтандыру, күйді басқару, электрондық құрылғылар, білім беру.

МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОБЫЧНОЙ КНОПКИ В КНОПКУ С ЗАПОМИНАНИЕМ СОСТОЯНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ARDUINO

^{1*}Романов Д.Ю., ²Есенғалиев Ә.М.

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан

²НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева»

*Автор корреспонденции e-mail: d.romanov@ttu.edu.kz

Информация об авторах:

Романов Дмитрий Юрьевич, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: d.romanov@ttu.edu.kz

Есенғалиев Әділқазы Мағазұлы, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева». ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1977-5661>, e-mail: Adil.yesengaliyev@gmail.com

Аннотация — В статье представлен программный метод преобразования обычной кнопки мгновенного действия в кнопку с функцией сохранения состояния (переключатель) с использованием среды программирования Arduino. В отличие от стандартной кнопки, которая остается активной только в момент нажатия, предлагаемый метод позволяет сохранять логическое состояние после каждого нажатия без использования дополнительных аппаратных компонентов, таких как триггеры, реле или кнопки с механической фиксацией. Предлагаемый подход основан на обнаружении перехода сигнала кнопки из состояния «отпущена» в состояние «нажата» и изменении сохраненной логической переменной при каждом таком событии. Для повышения надежности работы алгоритм включает программное подавление дребезга контактов, что исключает ложные срабатывания, вызванные механическими особенностями кнопки. Предложенное решение уменьшает аппаратную сложность устройства, снижает его стоимость и повышает гибкость системы, поскольку логика переключения может быть легко изменена путем корректировки программного кода. Метод может применяться для управления светодиодами, реле, электродвигателями и другими исполнительными устройствами, требующими устойчивого режима включения и выключения. Примеры практической реализации демонстрируют эффективность алгоритма в учебных лабораторных проектах, системах домашней автоматизации, управлении освещением, моделировании промышленных панелей управления и быстром прототипировании встраиваемых устройств. Экспериментальные испытания подтвердили стабильную работу алгоритма при многократных циклах переключения и надежное сохранение состояния в процессе непрерывной работы микроконтроллера.

Ключевые слова — Arduino, кнопка, кнопка с фиксацией состояния, программирование, автоматизация, управление состоянием, электронные устройства, образование.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Разработан программный метод преобразования стандартной кнопки Arduino в кнопку с функцией запоминания состояния без применения дополнительных аппаратных компонентов. Предложен алгоритм переключения логического состояния при каждом нажатии кнопки с использованием программных средств Arduino IDE. Показано, что предложенный подход позволяет снизить стоимость разработки электронных устройств, упростить схемотехническую реализацию

проектов и повысить эффективность обучения программированию микроконтроллеров.

ВВЕДЕНИЕ

Arduino – это платформа для создания различных устройств и даже роботов. Проекты Arduino состоят из самой платы Arduino (например, в данной работе используется Arduino Uno), различных датчиков, и различных исполнительных устройств.

Arduino применяется во многих сферах – в образовании, на небольших производствах, в

«умных» домах. Например, в [1] представлена система сигнализации о пожаре/дыме «умного» дома на основе Arduino и детектором дыма.

В Карагандинском индустриальном университете Arduino используется для освоения основ электроники, программирования и автоматизации. Arduino идеально подходит для того, чтобы показать студентам принципы работы автоматизированных систем – есть датчики, есть контроллер, и есть исполнительные устройства. Главное преимущество Arduino в образовательной цели – студент изучает теорию, затем сам создает миниатюрную систему автоматизации на практике, и видит, как теория и программирование превращается в устройство или робота.

Во время создания проектов Arduino возникла проблема – в университете нет кнопок с фиксацией своего состояния; то есть в наличии есть только обычные кнопки, представленные на рисунке 1.

Внутренняя структура такой кнопки представлена на рисунке 2.

В спокойном состоянии (рисунок 2а) параллельные контакты кнопки не замыкаются. При нажатии на кнопку (рисунок 2б), подвижный контакт замыкает две области, и таким образом пропускается электрический ток по нажатии на кнопку.

Подобные кнопки работают в режиме «кнопка нажата – пропускает сигнал; кнопка

отпущена – сигнал обрывается». Однако, в некоторых задачах требуется иное поведение кнопки – чтобы при однократном нажатии на кнопку она запоминала, что на нее нажали. То есть, чтобы не приходилось держать кнопку бесконечно долго, а лишь нажать один раз. Это необходимо, например, в проектах с моторами – при нажатии на кнопку, двигатель запускается и вращается, пока не нажметесь кнопка стопа; в проектах с переключением состояния – одно нажатие включает первое состояние, повторное нажатие включает второе состояние, и при третьем нажатии снова включается первое состояние устройства или робота.

В общем, кнопка с запоминанием состояние – это важный элемент, необходимый во всех случаях, когда управление системой автоматизации, роботом, или устройством не должно зависеть от длительности нажатия на саму кнопку.

И есть два решения данной проблема – либо покупать отдельно кнопки с фиксацией состояния, либо придумывать логику запоминания состояния обычной кнопки при помощи программирования. В данной работе рассматривается второй вариант решения проблемы (потому что первый вариант не нуждается в публикации статьи).



Рисунок 1 – Кнопка (push-button)

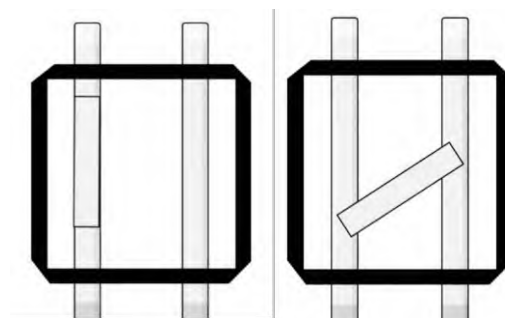


Рисунок 2 – Структура кнопки:

а – стандартное состояние контактов кнопки;
б – переключение контактов при нажатии на кнопку

Пробел в исследованиях. Несмотря на широкое распространение платформы Arduino в образовательных и инженерных проектах, большинство существующих решений по реализации кнопок с фиксацией состояния основано на использовании специализированных аппаратных переключателей или дополнительных электронных компонентов. В научной и учебной литературе недостаточно внимания уделяется программным методам реализации функции запоминания состояния

стандартной кнопки без изменения аппаратной части устройства. Кроме того, отсутствуют подробные алгоритмы и практические примеры, адаптированные для обучения основам программирования микроконтроллеров и автоматизации.

Научная новизна. Научная новизна исследования заключается в разработке программного метода реализации функции запоминания состояния стандартной кнопки Arduino без применения дополнительных

аппаратных компонентов. Предложенный алгоритм основан на отслеживании изменения логического состояния кнопки и программном переключении режима работы исполнительного устройства после каждого нажатия. В отличие от традиционных аппаратных решений, разработанный подход обеспечивает реализацию функции фиксации исключительно средствами программного обеспечения, что упрощает конструкцию устройств, снижает стоимость их разработки и расширяет возможности применения Arduino в образовательных и прототипных проектах.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для решения данной задачи применялось следующее оборудование: Arduino Uno, макетная плата, резистор 220 Ом, резистор 10 кОм, кнопка, светодиод.

Arduino Uno используется в качестве процессора, в который загружается программный код логики запоминания состояния кнопки, и к которому подключаются все элементы схемы.

Макетная плата в данном случае - необязательный компонент схемы. Здесь она

применяется только для того, чтобы не припаивать каждый элемент друг к другу, а просто подключить на плату. Любой желающий может собрать ту же схему без макетной платы, но ему нужно будет припаивать все элементы согласно схеме.

Светодиод применяется для проверки правильности работы логики запоминания кнопки. Чтобы светодиод не сгорел от тока, проходящего через его контакты, к аноду подключается резистор 220 Ом.

К кнопке подключается резистор 10 кОм для предотвращения явления «дребезг контактов» [2].

Написание программного кода выполнялось в среде Arduino IDE – доступной открытой платформе для программирования Arduino, которое можно бесплатно скачать с официального сайта [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Схема подключения кнопки и светодиода к цифровым пинам Arduino представлена на рисунке 3:

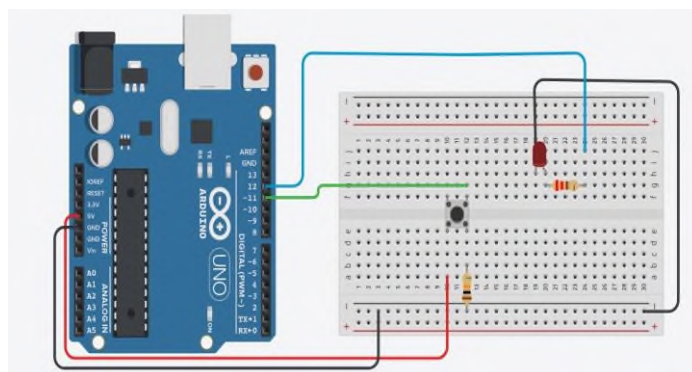


Рисунок 3 – Схема подключения кнопки и светодиода к Arduino

Кнопка подключена к 11 цифровому пину. Светодиод подключен к 12 цифровому пину.

Ниже представлен программный код обычной кнопки без фиксации для запоминания своего состояния.

```
int Last_State = 0;
bool Svet_State = LOW;

void setup()
{
  pinMode(12, OUTPUT); pinMode(11, INPUT);
}

void loop()
{
```

```
  int Current_State = digitalRead (11); if
(Current_State != Last_State) { Last_State =
Current_State;
  if (Current_State == LOW) { if (Svet_State ==
HIGH) { Svet_State = LOW;
  }
  else {
    Svet_State = HIGH;
  }
  digitalWrite (12, Svet_State);
}
}
```

Код начинается с объявления двух переменных - Last_State и Svet_State. Переменная Last_State нужна для хранения памяти о последнем

состоянии кнопки. В коде объявляется, что кнопка изначально не нажата (поэтому = 0). Переменная Svet_State нужна для хранения памяти о состоянии светодиода: либо горит (HIGH), либо не горит (LOW) (поэтому назначен тип переменной bool). Так как изначально светодиод не горит, нужно объявить «= LOW».

В функции void setup объявлены два цифровых пина – 11 для кнопки (INPUT), и 12 для светодиода (OUTPUT).

Далее выполняется проверка – «текущее состояние кнопки не равняется ли последним состоянием кнопки?». Это необходимо для того, чтобы проверить, отпустили ли нажатие кнопки. Если нет, то код дальше не выполняется. Если да, то выполняется код - переменная Last_State получает значение Current_State, то есть Arduino запомнило, что кнопка уже была нажата. Далее проверяется – «текущее состояние кнопки LOW?»,

- то есть, кнопка отпущена. Если кнопку отпустили, то выполняется код дальше – если светодиод уже горит (Svet_State == HIGH), то отключить светодиод (Svet_State = LOW). Если светодиод не горел, то он фиксированно загорается (else {Svet_State = HIGH;}). В этом месте можно вставить любой код, который должен выполняться при нажатии кнопки; в данном случае для демонстрации правильности работы логики используется обычный светодиод. На его месте может быть любое другое исполнительное устройство.

Демонстрация работы данной схемы и данной программы представлены на рисунке 4. На рисунке 4б видно, что после однократного нажатия кнопки светодиод горит, то есть кнопка запомнила, что ее нажали.

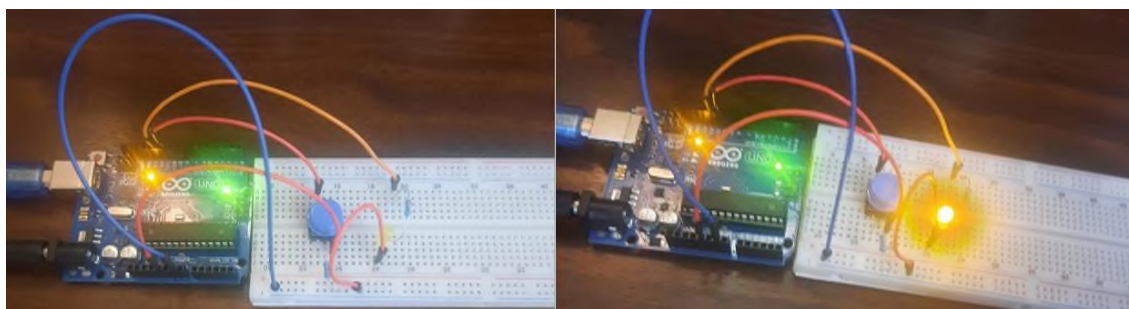


Рисунок 4 – Демонстрация работы:

а – до нажатия кнопки; б – после нажатия кнопки

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод превращения обычной кнопки без фиксации состояния в кнопку с запоминанием своего состояния при помощи программного кода.

2. Продемонстрирован программный код запоминания состояния кнопки с подробными пояснениями.

3. Была представлена схема подключения кнопки и светодиода к Arduino.

4. Была собрана и проверена схема запоминания состояния кнопки с демонстрацией правильности работы при помощи светодиода.

5. Полученные результаты могут и будут использованы на занятиях робототехники в Карагандинском индустриальном университете при построении более продвинутых проектах Arduino.

ВКЛАД АВТОРОВ

(таксономия CRediT):

Романов Д.Ю. – концептуализация, методология, научное руководство, валидация, рецензирование и редактирование рукописи.

Есенғалиев Ә.М. – разработка программного обеспечения, проведение исследования, формальный анализ, визуализация результатов, подготовка первоначального варианта рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллективу НАО «Карагандинский индустриальный университет» за поддержку при выполнении исследования.

Авторское право © 2025 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–

ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). любой форме при условии обязательного Лицензия разрешает свободное использование, указания авторства и сохранения аналогичной распространение и воспроизведение материала в лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] A. Kolesnikov, T. Atygayev, and I. Kasimos, "Arduino-based wireless security monitoring system," Bulletin of the M. Kozybayev NKU, no. 1, pp. 190–194, 2020.

[2] А. А. Иванюк и А. А. Можейко, «Цифровая схема анализа дребезга контактов коммутаторов», Системный анализ и прикладная информатика, № 3, с. 24–32, 2023.

[3] Arduino, "Arduino IDE," Arduino. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://www.arduino.cc/en/software/?ref=zx85.me>. Дата обращения: 26 октября 2025 г.

REFERENCES

[1] A. Kolesnikov, T. Atygayev, and I. Kasimos, "Arduino-based Wireless Security Monitoring System," Bulletin of the M. Kozybayev NKU, no. 1, pp. 190–194, 2020.

[2] A. A. Ivanyuk and A. A. Mozheyko, "Digital Circuit for Contact Bounce Analysis of Switches," System Analysis and Applied Informatics, no. 3, pp. 24–32, 2023.

[3] Arduino, "Arduino IDE," Arduino. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/software/?ref=zx85.me>. Accessed: Oct. 26, 2025.

IT-технологиялар, энергетика, автоматтандыру және есептеу техникасыDOI: <https://doi.org/10.53002/100>**THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ENSURES DATA SECURITY****Seilkhanov A.***Yessenov university, Aktau, Kazakhstan***Corresponding author e-mail: a.seilkhanov@ttc.kz***Author information:****Seilkhanov Adlet**, Yessenov University, Aktau, Kazakhstan, e-mail: a.seilkhanov@ttc.kz

Abstract — This paper presents an analysis of current approaches to the application of artificial intelligence (AI) technologies in the field of information security. The study examines the potential of machine learning, deep learning, and intelligent data analysis methods for detecting, preventing, and mitigating cybersecurity threats. Particular attention is given to the use of AI for network attack detection, anomalous user behavior analysis, malware protection, prevention of unauthorized access to information, and automation of information security monitoring and incident response processes. The study demonstrates that the application of intelligent algorithms significantly improves the efficiency of processing large volumes of data in real time, reduces the time required to detect cyber threats, and increases the accuracy of threat classification compared with traditional security methods. The advantages of adaptive security systems capable of learning from emerging attack patterns and continuously updating threat detection models with minimal human intervention are also discussed. The findings indicate the significant potential of artificial intelligence to enhance the protection of information resources and critical information infrastructures. The implementation of AI technologies contributes to preventing unauthorized access to information, timely identification of system vulnerabilities, prediction of potential cyberattacks, and reduction of the consequences of information security breaches. At the same time, it is emphasized that the effectiveness of intelligent security systems largely depends on the quality of training data, the robustness of AI models against adversarial attacks, and compliance with privacy and data protection requirements during information processing. The obtained results confirm the promising prospects for the further development and integration of artificial intelligence technologies into comprehensive information security systems. Their practical implementation will improve the reliability of digital resource protection, automate security decision-making processes, and enhance the resilience of information systems against modern cyber threats.

Keywords — cybersecurity, information security, artificial intelligence, provided, information.

**ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ БЕРКЕТ СПАТТАМАЛАРЫН
ТАЛДАУ****Сейлханов А.***«Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инженеринг университеті» КеАҚ, Ақтау,
Қазақстан***Автор-корреспондент e-mail: a.seilkhanov@ttc.kz***Автор туралы ақпарат:****Сейлханов Адлет**, «Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инженеринг университеті», Ақтау, Қазақстан, e-mail: a.seilkhanov@ttc.kz

Аңдатпа — Жұмыста ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз ету саласында жасанды интеллект (ЖИ) технологияларын қолданудың заманауи бағыттарына талдау жүргізілді. Машиналық оқыту, терең оқыту және деректерді интеллектуалды талдау әдістерін киберқауіптерді анықтау, алдын алу және олардың салдарын азайту мақсатында пайдалану мүмкіндіктері қарастырылды. Желілік шабуылдарды анықтау, пайдаланушылардың аномальды әрекеттерін талдау, ақпараттық жүйелерді зиянды бағдарламалық қамтамасыз етуден қорғау, ақпаратқа рұқсатсыз қол жеткізудің алдын алу, сондай-ақ ақпараттық қауіпсіздік оқиғаларын бақылау және оларға ден қою процестерін автоматтандыру мәселелеріне ерекше назар аударылды. Зерттеу нәтижелері жасанды интеллект алгоритмдерін қолдану нақты уақыт режимінде үлкен көлемдегі деректерді өңдеу тиімділігін айтарлықтай арттыратынын, қауіптерді анықтау уақытын қысқартып, дәстүрлі қорғау әдістерімен салыстырғанда оларды жіктеу дәлдігін жоғарылататынын көрсетті. Сонымен қатар, жаңа типтегі шабуылдарға өздігінен бейімделіп, қауіптерді анықтау модельдерін мамандардың елеулі араласуынсыз жаңарта алатын бейімделгіш

қауіпсіздік жүйелерінің артықшылықтары қарастырылды. Зерттеу қорытындылары жасанды интеллекттің ақпараттық ресурстар мен аса маңызды ақпараттық инфрақұрылымдардың қорғалу деңгейін арттырудағы әлеуетінің жоғары екенін дәлелдейді. Бұл технологияны пайдалану ақпаратқа рұқсатсыз қол жеткізудің алдын алуға, осалдықтарды уақтылы анықтауға, ықтимал кибершабуылдарды болжауға және ақпараттық қауіпсіздік бұзылуының салдарын азайтуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, интеллектуалды жүйелердің тиімділігі оқыту деректерінің сапасына, модельдердің қасақана әсерлерге төзімділігіне және ақпаратты өңдеу кезінде құпиялылық талаптарының сақталуына тәуелді екені атап өтілді. Алынған нәтижелер жасанды интеллект технологияларын ақпараттық қауіпсіздіктің кешенді жүйелеріне одан әрі дамыту мен енгізудің перспективалылығын растайды. Оларды тәжірибеде қолдану цифрлық ресурстарды қорғаудың сенімділігін арттырып, шешім қабылдау процестерін автоматтандыруға және ақпараттық жүйелердің заманауи киберқауіптерге төзімділігін күшейтуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер — инновациялық материалдар, беріктік сипаттамалары, композиттік материалдар, нанокұрылымдар, механикалық қасиеттер, талдау әдістері.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДАННЫХ

Сейлханов А.

НАО «Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова», Актау, Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: a.seilkhanov@ttc.kz

Информация об авторе:

Сейлханов Адлет, НАО «Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова», Актау, Казахстан, e-mail: a.seilkhanov@ttc.kz

Аннотация. — В работе проведен анализ современных направлений применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в области обеспечения информационной безопасности. Рассмотрены основные возможности использования методов машинного обучения, глубокого обучения и интеллектуального анализа данных для выявления, предотвращения и минимизации последствий киберугроз. Особое внимание уделено применению ИИ при обнаружении сетевых атак, анализе аномальной активности пользователей, защите информационных систем от вредоносного программного обеспечения, предотвращении несанкционированного доступа к данным, а также автоматизации процессов мониторинга и реагирования на инциденты информационной безопасности. В ходе исследования установлено, что использование интеллектуальных алгоритмов позволяет существенно повысить эффективность обработки больших объемов данных в режиме реального времени, сократить время обнаружения угроз и повысить точность их классификации по сравнению с традиционными методами защиты. Рассмотрены преимущества адаптивных систем безопасности, способных самостоятельно обучаться на новых типах атак и своевременно обновлять модели обнаружения угроз без значительного вмешательства специалистов. Сделаны выводы о высоком потенциале применения искусственного интеллекта для повышения уровня защищенности информационных ресурсов и критически важных информационных инфраструктур. Использование данной технологии способствует предотвращению несанкционированного доступа к информации, своевременному выявлению уязвимостей, прогнозированию возможных кибератак и снижению последствий нарушений информационной безопасности. Вместе с тем отмечено, что эффективность интеллектуальных систем во многом зависит от качества обучающих данных, устойчивости моделей к преднамеренным воздействиям и соблюдения требований конфиденциальности при обработке информации. Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего развития и внедрения технологий искусственного интеллекта в комплексные системы информационной безопасности. Их практическое применение позволит повысить надежность защиты цифровых ресурсов, автоматизировать процессы принятия решений и обеспечить более высокий уровень устойчивости информационных систем к современным киберугрозам.

Ключевые слова — кибербезопасность, информационная безопасность, искусственный интеллект, данные, информация.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Жасанды интеллект технологияларын қолдану ақпараттық қауіпсіздік жүйелерінің тиімділігін арттырып, киберқауіптерді нақты

уақыт режимінде анықтауға және олардың алдын алуға мүмкіндік береді.

Машиналық оқыту алгоритмдері пайдаланушылардың мінез-құлқын талдау, аномалияларды анықтау және жаңа қауіп-

катерлерге автоматты түрде бейімделу арқылы ақпараттық жүйелердің қорғаныс деңгейін жоғарылатады. Жасанды интеллект негізіндегі биометриялық аутентификация, динамикалық қол жеткізуді басқару және автоматтандырылған қауіптерді талдау жүйелері дәстүрлі ақпараттық қауіпсіздік әдістеріне қарағанда жоғары сенімділік пен жылдамдықты қамтамасыз етеді.

КІРІСПЕ

Ақпараттық қауіпсіздік күннен-күнге кеңінен енгізіліп, қолданылып жатқан компьютерлік жүйелерді ескере отырып, қазіргі әлемде маңызды орын алады. Әрбір адам немесе компания өзінің ақпаратын ұрлау, жою немесе өзгерту қаупін азайтқысы келеді. Сол сияқты автоматтандырылған жүйеде де киберқауіпсіздік үлкен рөл атқарады [1-3].

IDC зерттеуіне сәйкес, «2020 жылға қарай ұйымдар киберқауіпсіздікке арналған бағдарламалық қамтамасыз етуге, қызметтерге және жабдықтарға 101,6 миллиард доллар жұмсайды».

Алдыңғы қатарлы ұйымдар ондаған қауіпсіздік өнімдерін біріктіргенімен, шабуылдарға осал болудан әлі де қорқады. Бұл қауіпсіздікке шығындардың артуына қарамастан, қауіпсіздік бұзушылықтарының тоқтау немесе баяулау белгілерін көрсетпейтінін білдіреді.

Киберқауіпсіздік саласындағы озық технологияларды енгізу уақытты талап етеді, бұл шабуылдарды егжей-тегжейлі анықтауға және оларды киберқауіпсіздік мамандарынан да жылдам шешуге мүмкіндік береді. Осындай технологиялардың бірі – жасанды интеллект [4-6]. ЖИ – бұл өзге мүмкіндіктерімен қатар (сурет 1), қатерлерді анықтап, оларды жою және болдырмау үшін қажетті әрекеттерді автоматты түрде жүзеге асыра алатын технология.

Зерттеудің маңыздылығы. Ақпараттық жүйелердің кеңінен қолданылуына және кибершабуылдардың күрделене түсуіне байланысты ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз ету қазіргі қоғамның маңызды міндеттерінің біріне айналды. Дәстүрлі қауіпсіздік құралдары жаңа типтегі қауіп-қатерлерге әрдайым тиімді қарсы тұра алмайды. Осыған байланысты жасанды интеллект технологияларын қолдану қауіптерді ерте анықтауға, шабуылдарға жедел әрекет етуге және қорғау жүйелерінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері мемлекеттік мекемелерде, кәсіпорындарда және ақпараттық жүйелерде заманауи киберқауіпсіздік шешімдерін енгізуге ғылыми-тәжірибелік негіз бола алады.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің жаңалығы жасанды интеллект технологияларының ақпараттық қауіпсіздік жүйелеріндегі қолданылуын кешенді талдауында және олардың киберқауіптерді анықтау, биометриялық аутентификация, динамикалық қол жеткізуді басқару және шабуылдарға автоматты түрде әрекет ету мүмкіндіктерін жүйелеуінде жатыр. Сонымен қатар, машиналық оқыту алгоритмдерін пайдалану арқылы қауіп-қатерлерді болжау, жүйенің жаңа шабуыл түрлеріне бейімделуі және қауіпсіздік процестерін автоматтандырудың артықшылықтары негізделген. Зерттеу нәтижелері ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз етуде жасанды интеллекттің тиімділігін арттыруға бағытталған ұсыныстарды ұсынады.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

1. Әдебиеттерді талдау: ЖИ негізіндегі киберқауіпсіздік құралдарының теориялық негіздері мен қазіргі тәжірибесі зерттелді. Ғылыми мақалалар, зерттеу есептері және IDC сияқты аналитикалық деректер кеңінен қолданылды [1-6].

2. Құралдар мен технологияларды салыстыру: ЖИ технологияларын қолданатын әртүрлі биометриялық аутентификация, үлгіні тану, қауіптерді анықтау және динамикалық аутентификация жүйелері салыстырмалы түрде талданды. Әр құралдың артықшылықтары мен шектеулері анықталды.

3. Машиналық оқытуды қолдану: Қауіптерді анықтау және шабуылдарға жедел әрекет ету процестерінде машиналық оқыту алгоритмдері енгізілді. Бұл әдіс жүйенің зиянды әрекеттерді дербес және нақты уақыт режимінде тануына мүмкіндік береді.

4. Эмпирикалық бақылау: ЖИ құралдарының нақты қолдану сценарийлерінде тиімділігі тестіленді. Бұл биометриялық аутентификация, шабуылдарды алдын алу және динамикалық қол жеткізу құқықтарын өзгерту сияқты функцияларды қамтиды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Инженерлік бақылау: ЖИ жүйелерінің жұмысын қадағалау үшін адам-инженерлердің қатысуы қажет, себебі кейбір ерекше жағдайлар машиналық алгоритмдерге толық көрінбеуі мүмкін. Бұл әдіс жүйенің қауіпсіздігін қамтамасыз ете отырып, дұрыс шешім қабылдауға мүмкіндік береді [7].

ЖИ негізіндегі құралдар киберқауіпсіздіктегі әртүрлі қажеттіліктерге жауап береді [8].

1. Биометриялық аутентификация.

Құпиясөздер бұзылуы мүмкін, бұл пайдаланушының, кәсіпорынның немесе мемлекеттік органның маңызды ақпаратын қатерге тігеді. Мұндай жағдайда ЖИ негізіндегі аутентификация, яғни саусақ ізін немесе алақанды сканерлеу әлдеқайда қауіпсіз болып саналады және жүйе оларды сенімді түрде сканерлей алады. Биометриялық логиндер құпиясөздермен байланысты болған кезде, пайдаланушы деректерін бұзу ықтималдығы айтарлықтай төмендейді.

2. Қауіптерді анықтауды жеделдету.

Кәдімгі киберқауіпсіздік жүйелері әртүрлі зиянды бағдарламалардың түрлерін бір уақытта өңдей алмайды. Бұдан бөлек, киберқауіпсіздік деңгейі ғана емес, хакерлер де өз стандарттарын көтеріп отыр. Кеңейтілген қауіп-қатерлерді жылдам анықтау үшін осындай мәселелерді шеше алатын озық қауіпсіздік құралдарын пайдалану қажет.

Компаниялар үнемі жаңартылып отыратын озық алгоритмдер мен кодтарды пайдалана отырып, үлгілерді тану арқылы қауіп-қатерді оңай анықтай алатын ЖИ негізіндегі басқарылатын жүйелерді енгізуде. ЖИ машиналық оқытумен бірге қолданылғанда сайтты айналып өту жолын, зиянды бағдарламалардың микро-мінез-құлқын және кез келген қасақана әрекеттерді талдауда тиімді, бұл қосымша дұрыс шешім қабылдауға көмектеседі.

3. Шабуылдарға жедел әрекет ету.

Қауіптерді нақты уақыт режимінде анықтау, егер жүйе олармен күресе алмай және оларды елеулі зиян келтірмей тұрып алдын ала алмайтын болса, ешқандай мәнге ие болмайды.

Хакерлер тобы жүйеге әртүрлі нүктелерден шабуыл жасағанда, ЖИ бұл нүктелерді дереу байланыстырып, шабуылды болдырмау жоспарларын автоматты түрде ұсынады. ЖИ зияткерлік талдауды қолданады, ол шабуылдарды анықтау мен жою үшін қарапайым әрі жылдам тәсіл болып табылады. Мысалы, ЖИ жүйесі жүйеден зиянды файл тапқанда, ол алдымен бұл файлды жүйеден оқшаулайды және оқиғаларды журналға тіркейді, бұл кейінгі талдауды жеңілдетеді.

4. Динамикалық аутентификация ортасын құру.

Деректер желілерде де ұсталып қалуы мүмкін. Бұл – жүйелерге қашықтан қол жеткізетін қызметкерлер үшін алаңдатарлық жағдай, яғни дәстүрлі аутентификация үлгілері енді қауіпсіз емес дегенді білдіреді. Осындай сәтте ЖИ көмекке келеді.

ЖИ жүйелері нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін жаһандық аутентификация ортасын жасайды, ол көпфакторлы аутентификацияны

қолдана отырып, қол жеткізу құқықтарын пайдаланушының орналасқан жеріне немесе желісіне сәйкес өзгертеді. Бұған қолданбада, құрылғыда және желіде пайдаланушының мінез-құлқын деректерге қашықтан қол жеткізу кезінде жинау және талдау кіреді.

5. Адамның қатысуын азайту.

Ешбір машина адамдардың шығармашылық әлеуетін, қиялын және ойлау қабілетін асыра алмайды. Бірақ инженерлер қабылдайтын шешімдер дұрыс деректер жиынтығымен, пікірлермен және ағымдағы үрдістермен де нығайтылады.

Маңызды деректерді зерттеу және пайдалану көп уақытты алады, ал жоғары тәуекелді тапсырманы жедел шешу мүмкін болмай қалады. Компаниялар ЖИ технологиясын қолданатын қауіпсіз қосымшалар жасағанда, қауіпсіздік қызметкерлері қауіп-қатерлерді анықтау мен алдын алуды автоматтандырудың арқасында адам араласуынсыз біраз жеңілдік алады.

Пайдаланушының мінез-құлқын үздіксіз талдау мен болжамдық талдау инженердің жүйені бірқатар шабуылдардан қорғаудағы араласуын азайтады. Үнемделген уақытты шығармашылық және жемісті бастамаларға жұмсауға болады [9,10].

6. ЖИ жүйелерінің интеграциясы және үздіксіз оқыту.

ЖИ шешімдері тек жеке компонент ретінде ғана емес, сонымен қатар ұйымның қауіпсіздік экожүйесіне толық интеграцияланған түрде тиімді жұмыс істейді. Машиналық оқыту алгоритмдері деректердің жаңа үлгілерін үздіксіз талдап, жүйені жаңа қауіп-қатерлерге бейімдеп отырады. Бұл тәсіл дәстүрлі қауіпсіздік жүйелерінің шектеулерін жеңіп, шабуылдарға қарсы белсенді қорғаныс қабілетін арттырады.

Сонымен қатар, ЖИ жүйелерінің интеграциясы келесі артықшылықтарды қамтамасыз етеді:

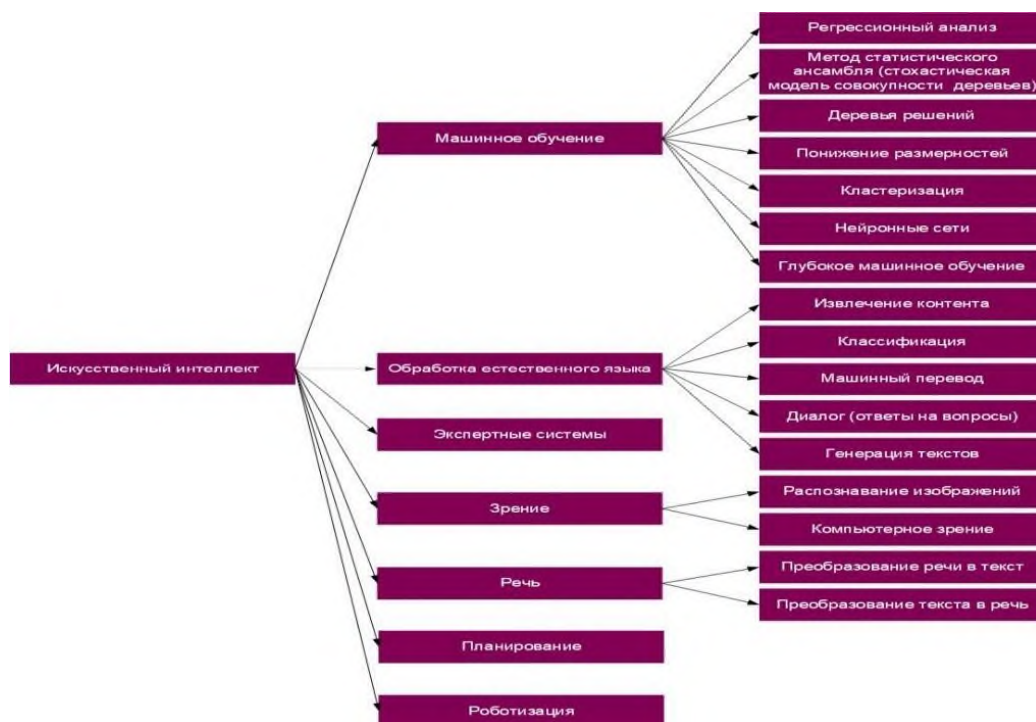
1) Үлкен деректерді талдау мүмкіндігі: ЖИ миллиардтаған желілік логтар, серверлік журналдар және қолданушылардың әрекеттерін талдай отырып, адам қабылдай алмайтын көлемде ақпаратты өңдей алады. Бұл кибершабуылдарды алдын ала анықтау мен қауіптерді классификациялау тиімділігін айтарлықтай арттырады.

2) Автоматтандырылған шешім қабылдау: Қауіп анықталған сәттен бастап ЖИ алдын ала сценарийлерді іске қосып, шабуылдардың әсерін минимизациялауға бағытталған әрекеттерді автоматты түрде жүзеге асыра алады. Мысалы, зиянды файлды оқшаулау, қолданушының қол жеткізу құқықтарын уақытша шектеу немесе желілік трафикті қайта бағыттау.

3) Үздіксіз оқыту және бейімделу: ЖИ жүйесі жаңа шабуыл үлгілері мен қауіп-қатер әдістерін үйреніп, алгоритмдерін жаңартады. Бұл әсіресе нөлдік күндік шабуылдар (zero-day attacks) сияқты алдын ала болжанбайтын қауіптерге қарсы күресте тиімді.

4) Интеграцияланған мониторинг және аналитика: ЖИ орталықтандырылған бақылау

панелін пайдаланып, жүйелердің қауіпсіздік жағдайын нақты уақыт режимінде бақылауға мүмкіндік береді. Бұл инженерлерге тез арада дұрыс шешім қабылдауға және қауіпсіздік саясаттарын икемді түрде реттеуге мүмкіндік береді.



Сурет 1 - Жасанды интеллектті қолдану салалары

ҚОРЫТЫНДЫ

Жасанды интеллект жүйелері адамдар арқылы үйретіліп, басқарылады және кейбір жағдайларда адам-инженерлердің қажеттілігі міндетті болып табылады. Себебі олар машиналар анықтай алмайтын ауытқулардан тыс шығып, болжанған шабуылдың шын екенін растауға қабілетті. Сонымен қатар, ЖИ технологиялары киберқауіптерді алдын ала анықтау, шабуылдарға жылдам әрекет ету және жүйенің жалпы қауіпсіздік деңгейін арттыруда маңызды рөл атқарады. Адам мен ЖИ арасындағы үйлесім осы жүйелердің тиімділігін максималды түрде қамтамасыз етеді: ЖИ рутиналық және уақытты қажет ететін тапсырмаларды автоматтандырса, инженерлер стратегиялық шешімдер қабылдауға, жүйенің әлсіз тұстарын анықтауға және күрделі шабуылдарды болдырмауға бағытталады. Осылайша, жасанды интеллект және адам-инженерлердің бірлескен жұмысы заманауи киберқауіпсіздіктің тиімді және сенімді негізін құрайды.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Автор осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Авторлар осы зерттеуді орындау кезінде сыртқы қаржыландырудың жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС

Автор қолжазбаны мұқият қарастырып, мақаланың мазмұны мен сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік берген құнды ескертулері мен ұсынымдары үшін журналдың редакторы мен рецензентіне шынайы алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта

жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] S. Russell and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2022.
- [2] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, Deep Learning. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2023 (reprint edition).
- [3] W. Stallings, Cryptography and Network Security: Principles and Practice, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2024.
- [4] W. Stallings, Effective Cybersecurity: A Guide to Using Best Practices and Standards. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional, 2024.
- [5] J. C. Cannon, Cybersecurity for Beginners. Birmingham, U.K.: Packt Publishing, 2022.
- [6] M. Wooldridge, The Road to Conscious Machines: The Story of AI, Updated Edition. London, U.K.: Pelican Books, 2023.
- [7] National Institute of Standards and Technology (NIST), Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). Gaithersburg, MD, USA: NIST, Jan. 2023.
- [8] ISO/IEC 27001:2022, Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection—Information Security Management Systems—Requirements. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2022.
- [9] ISO/IEC 23894:2023, Information Technology—Artificial Intelligence—Guidance on Risk Management. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2023.
- [10] ENISA, ENISA Threat Landscape 2024. Heraklion, Greece: European Union Agency for Cybersecurity, 2024.

REFERENCES

- [1] S. Russell and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2022.
- [2] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, Deep Learning. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2023 (reprint edition).
- [3] W. Stallings, Cryptography and Network Security: Principles and Practice, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2024.
- [4] W. Stallings, Effective Cybersecurity: A Guide to Using Best Practices and Standards. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional, 2024.
- [5] J. C. Cannon, Cybersecurity for Beginners. Birmingham, U.K.: Packt Publishing, 2022.
- [6] M. Wooldridge, The Road to Conscious Machines: The Story of AI, Updated Edition. London, U.K.: Pelican Books, 2023.
- [7] National Institute of Standards and Technology (NIST), Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). Gaithersburg, MD, USA: NIST, Jan. 2023.
- [8] ISO/IEC 27001:2022, Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection—Information Security Management Systems—Requirements. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2022.
- [9] ISO/IEC 23894:2023, Information Technology—Artificial Intelligence—Guidance on Risk Management. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2023.
- [10] ENISA, ENISA Threat Landscape 2024. Heraklion, Greece: European Union Agency for Cybersecurity, 2024.

IT-технологиялар, энергетика, автоматтандыру және есептеу техникасыDOI: <https://doi.org/10.53002/101>**FREQUENCY CONVERTERS IN PUMPING SYSTEMS: AN ANALYTICAL REVIEW OF ADVANTAGES, TECHNOLOGIES, AND MANUFACTURERS****Serikbolatuly A., Bayasilova Z., Siverskaya T., Kuntush Y., Batyrbek A.**NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan***Corresponding author e-mail: a.seilkhanov@ttu.kz***Authors information:****Serikbolatuly Askhat**, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,e-mail: a.serikbolatuly@ttu.edu.kz**Bayasilova Zuhra**, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: z.bayassilova@ttu.edu.kz**Siverskaya Tatyana**, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,e-mail: t.siverskaya@ttu.edu.kz**Kuntush Elena**, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: ye.kuntush@ttu.edu.kz**Batyrbek Alibek**, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: a.batyrbek@ttu.edu.kz

Abstract — The article provides an overview of modern technologies for automated pump drives based on the use of frequency converters. The main advantages of such systems include: improved energy efficiency, precise control of pump operating parameters, extended equipment lifespan, and reduced operational costs. Special attention is given to the practical application of frequency converters in industry, including areas such as cooling systems. The work analyzes products from leading frequency converter manufacturers, such as Siemens, ABB, Danfoss, Schneider Electric, and others, highlighting their features and areas of application. Technical and economic aspects of implementing automated drives are also discussed, including energy saving, equipment protection, and integration into modern control systems. The article is intended for specialists in automation, energy, and pump system design, as well as for those interested in modern technologies for improving the efficiency of industrial equipment.

Keywords — frequency converters, pumps, induction motor, energy efficiency, Siemens, ABB, Schneider Electric, Danfoss.

**СОРҒЫ ҚОНДЫРҒЫЛАРДАҒЫ ЖИЛІКТІ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕР:
АРТЫҚШЫЛЫҚТАРЫ, ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ ЖӘНЕ ӨНДІРУШІЛЕРІНЕ
АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУ**

Серикболатұлы А., Баясилова З.А., Сиверская Т.И., Кунтуш Е.В., Батырбек Ә.Е.«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан***Автор-корреспондент e-mail: a.serikbolatuly@ttu.edu.kz***Авторлар туралы ақпарат:****Серикболатұлы Асхат**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан,e-mail: a.serikbolatuly@ttu.edu.kz**Баясилова Зухра Ануаровна**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан,e-mail: z.bayassilova@ttu.edu.kz**Сиверская Татьяна Ивановна**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан,e-mail: t.siverskaya@ttu.edu.kz**Кунтуш Елена Викторовна**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан,e-mail: ye.kuntush@ttu.edu.kz**Батырбек Әлібек Есімбекұлы**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан,e-mail: a.batyrbek@ttu.edu.kz

Аңдатпа — Мақалада жиіліктік түрлендіргіштерін пайдалануға негізделген сорғылардың автоматтандырылған электр жетектерінің заманауи технологияларына шолу жасалған. Мұндай жүйелердің негізгі артықшылықтары: энергия тиімділігін арттыру; сорғылардың жұмыс параметрлерін басқару дәлдігі; жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзарту; пайдалану шығындарын азайту қарастырылады. Өнеркәсіпте және салқындату жүйелері сияқты

әртүрлі салаларда жиілік түрлендіргіштерін практикалық қолдануға ерекше назар аударылды. Жұмыста Siemens, ABB, Danfoss, Schneider Electric және т.б., жиілік түрлендіргіштерінің негізгі өндірушілеріне олардың ерекшеліктері мен қолдану салаларын бөліп көрсете отырып талдау жүргізілді. Сондай-ақ, автоматтандырылған электр жетектерін енгізудің техникалық және экономикалық аспектілері, соның ішінде энергия үнемдеу, жабдықты қорғау және заманауи басқару жүйелеріне интеграциялау мәселелері қарастырылды. Мақала автоматтандыру, энергетика және сорғы жүйелерін жобалау саласындағы мамандарға, сондай-ақ өнеркәсіптік жабдықтың тиімділігін арттырудың заманауи технологияларына қызығушылық танытқандарға арналған.

Түйін сөздер — жиіліктік түрлендіргіштер, сорғылар, асинхронды электр қозғалтқышы, энергия тиімділігі, Siemens, ABB, Schneider Electric, Danfoss.

ЧАСТОТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В НАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРЕИМУЩЕСТВ, ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

**Серикболатулы А., Баясилова З.А., Сиверская Т.И., Кунтуш Е.В., Батырбек Ә.Е.*

НАО «Қарағандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: a.seilkhanov@ttc.kz*

Информация об авторах:

Серикболатулы Асхат, НАО «Қарағандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан,
e-mail: a.serikbolatuly@tttu.edu.kz

Баясилова Зухра Ануаровна, НАО «Қарағандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан,
e-mail: z.bayassilova@tttu.edu.kz

Сиверская Татьяна Ивановна, НАО «Қарағандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан,
e-mail: t.siverskaya@tttu.edu.kz

Кунтуш Елена Викторовна, НАО «Қарағандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан,
e-mail: ye.kuntush@tttu.edu.kz

Батырбек Әлібек Есімбекұлы, НАО «Қарағандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан,
e-mail: a.batyrbek@tttu.edu.kz

Аннотация — В статье представлен обзор современных технологий автоматизированных электроприводов насосов, основанных на использовании частотных преобразователей. Основными преимуществами таких систем являются: повышение энергоэффективности, точность управления рабочими параметрами насосов, продление срока службы оборудования и снижение эксплуатационных расходов. Особое внимание уделено практическому применению частотных преобразователей в промышленности, включая такие области, как системы охлаждения. В работе проведен анализ продукции ведущих производителей частотных преобразователей, таких как Siemens, ABB, Danfoss, Schneider Electric и других, с выделением их особенностей и областей применения. Также рассмотрены технические и экономические аспекты внедрения автоматизированных электроприводов, включая вопросы энергосбережения, защиты оборудования и интеграции в современные системы управления. Статья предназначена для специалистов в области автоматизации, энергетики и проектирования насосных систем, а также для тех, кто интересуется современными технологиями повышения эффективности промышленного оборудования.

Ключевые слова — частотные преобразователи, насосы, асинхронный электродвигатель, энергоэффективность, Siemens, ABB, Schneider Electric, Danfoss.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында сорғы қондырғыларының электр жетегінде жиіліктік түрлендіргішті қолдану қозғалтқыштың айналу жиілігін технологиялық жүктемеге сәйкес дәл реттеуге мүмкіндік беретіні анықталды. Жүргізілген салыстырмалы талдау нәтижесінде Siemens, ABB, Danfoss, Schneider Electric, Mitsubishi Electric және Omron жиіліктік түрлендіргіштерінің техникалық сипаттамалары мен функционалдық

мүмкіндіктеріндегі айырмашылықтар айқындалды. Талдау нәтижелері сорғы қондырғыларының пайдалану шарттарына байланысты жиіліктік түрлендіргішті тандаудың негізгі техникалық критерийлерін анықтауға мүмкіндік берді.

Алынған нәтижелер өндірістік объектілерде энергия тұтынуды оңтайландыруға, электр жетектерінің сенімділігі мен пайдалану

тиімділігін арттыруға арналған техникалық шешімдерді негіздеу үшін қолданылуы мүмкін.

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта басқарылатын электр жетектерінің басым көпшілігі асинхронды электр қозғалтқыштары мен жиілікті түрлендіргіштері негізінде құрылады, мұнда жиілікті түрлендіргіші сызба бойынша орындалады басқарылмайтын түзеткіш - автономды басқарылатын кернеу инверторы; яғни, алдымен желінің электр энергиясы тұрақты токқа айналады, содан кейін инвертор айнималы жиіліктегі үш фазалы электр тогын жасайды.

Жиілікті түрлендіргіштерін асинхронды электр қозғалтқышында жасалған электр жетегі үшін реттеуші құрылғы ретінде пайдалану кезінде ашылатын мүмкіндіктер шексіз. Қазіргі заманғы электр жетегін дамытудың негізгі тенденцияларының бірі оны энергетикалық ресурстарды үнемдеу мақсатында пайдалану болып табылады. Айта кету керек, жиілік түрлендіргіштерін реттелетін электр жетегі ретінде пайдалану механизмнің жұмыс жағдайына байланысты жүйенің параметрлерін автоматты түрде өзгерту арқылы өзінің артықшылықтарын тудырады және ең үлкен әсерге жұмыс жағдайлары жиі өзгеріп, өзгеру шектері жеткілікті кең болған кезде қол жеткізіледі [1]. Реттелетін электр жетегі жүйесі механизмнің қажетті жұмыс жағдайларына байланысты реттеу параметрлерін орнатуға мүмкіндік беретін жеткілікті сенімді бағдарламалық жасақтамасы бар микроконтроллермен басқарылады. Осыған байланысты реттелетін электр жетегінің қолданылу аясы тек жоғары технологиялық салаларда ғана емес, сонымен қатар осы уақытқа дейін асинхронды қозғалтқышы бар, қысқа тұйықталған роторы бар қарапайым реттелмейтін электр жетегі дәстүрлі түрде қолданылған жерлерде де қолданыс аясы кеңейіп келеді. Бұл ретте технологиялық міндеттерді минималды шығындармен шешуге мүмкіндік беретін қолданыстағы электр жетектерінің энергетикалық тиімділігін арттыру маңызды болып отыр.

Сорғылар электр энергиясының ең көп тұтынушылары болып табылады. Бұл қондырғылар барлық салаларда кең таралған және негізгі технологиялық және қосалқы функцияларды орындайды. Қазіргі уақытта сорғы агрегаттарының жұмыс режимдерін реттеу негізінен реттеуші бекіту арматурасының көмегімен – ысырмалар және т.б. (дроссельдеу) жетек қозғалтқышының тұрақты

жылдамдығымен жүзеге асырылады. Бұл қосымша гидравликалық кедергілерді жеңуге байланысты реттеуші элементтерде қуаттың айтарлықтай жоғалуына әкеледі. Мұндай шығындардың мөлшері шығыс параметрлерін қысым мен беруді реттеу тереңдігіне байланысты және механизм тұтынатын қуаттың 50% жетуі мүмкін. Автоматтандырылған электр жетегінің қазіргі даму деңгейі басқару функцияларын сорғы агрегаттарының электр жетегіне тікелей беруге және көрсетілген шығындарды болдырмауға мүмкіндік береді. Өйткені сорғылар, желдеткіштер, үрлегіштер және т.б. әр түрлі көздер бойынша өнеркәсіпте тұтынылатын электр энергиясының 20-35% құрайды, сорғы механизмдерін реттелетін жетек жүйелеріне ауыстыру өнеркәсіптегі энергия үнемдеу саясатының маңызды бағыты болып табылады.

Сумен жабдықтау жүйесіне жиілік түрлендіргіштерін енгізу, біріншіден, «электр қозғалтқышы-қоректендіргіш сорғы - дроссель клапаны» жүйесімен салыстырғанда, жиілікпен басқарылатын электр жетектерінің жоғары экономикалық тиімділігіне байланысты, мұнда операторлар суды реттеуді қолмен жүргізеді. Екіншіден, бүгінгі күні жаңа реттелетін электр жетектерін енгізу кезінде балама жоқ.

Сорғы қондырғылары үшін жиілік түрлендіргіштерін пайдаланудың бірқатар маңызды артықшылықтары бар:

1) энергия тиімділігі: жиілік түрлендіргіштері сорғы қозғалтқышының айналу жылдамдығын сұйықтықтың ағымдағы қажеттілігіне қарай реттеуге мүмкіндік береді және электр қуатын айтарлықтай үнемдейді, әсіресе жұмыс циклі кезінде жүктемелер өзгеретін жүйелерде;

2) жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзарту: жиілік түрлендіргіштерімен қамтамасыз етілген реттелетін іске қосу және тоқтату сорғы мен оның құрамдас бөліктеріндегі механикалық жүктемелерді азайтады, тозуды азайтады және жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзартады;

3) басқару дәлдігі: жиілік түрлендіргіштері қысым мен беру сияқты сорғы параметрлерін дәлірек реттеуге мүмкіндік береді;

4) шу мен дірілді азайту: қозғалтқыштың жылдамдығын біркелкі реттеу діріл мен шуды азайтады, бұл жұмыс жағдайын жақсартады және ғимарат құрылымына немесе басқа инфрақұрылымға жүктемені азайтады;

5) жабдықты қорғау: көптеген жиілік түрлендіргіштері жабдықты қорғау функциясымен жабдықталған, соның ішінде шамадан тыс жүктемеден, қызып кетуден және

басқа төтенше жағдайлардан қорғау, зақымданудың алдын алуға және істен шығу қаупін азайтуға көмектеседі;

6) икемділік және бейімделу: жұмыс параметрлерін оңай реттеу мүмкіндігі сорғы жүйесіне физикалық араласуды немесе компоненттерді ауыстыруды қажет етпестен өзгертін жұмыс жағдайлары мен нақты талаптарға бейімделуге мүмкіндік береді;

7) пайдалану шығындарының төмендеуі: электр энергиясын тұтынудың төмендеуіне және жабдықтың ұзақ мерзімділігінің артуына байланысты инженерлік жүйелердің жалпы пайдалану шығындары айтарлықтай төмендейді [2].

Жиіліктік түрлендіргіштерін өндірушілердің өнімдері ең танымал компаниялар Siemens (Micromaster түрлендіргіштері), ABB, Control Techniques, Schneider Electric (Altivar түрлендіргіштері), Danfoss және Lenze. Еуропалық түрлендіргіштердің танымал өндірушілеріне VACON, elettronica Santerno, Emotron жатады. Американдық танымал өндірушілерге General Electric кіреді. Азиялық компаниялардың ішінде Жапондық Mitsubishi Electric, Omron, Hitachi, Toshiba, Fuji Electric, Корея және Тайвань елдерінің LG Hyundai Electronics, Long Shenq Electronic, Delta electronics сияқты өндірушілердің өнімдері танымал. Жиілік түрлендіргіштерін Қытай елі де шығарады, сонымен қатар қытайлық жиілік түрлендіргіштері корей жиілік түрлендіргіштерінен айырмашылығы жоғары сапалы емес. Сондай-ақ, жиілікті түрлендіргіштерін ресейлік өндірушілері бар: «Комбарко», «Веспер», «Эрасиб», «Вектор» және т.б.

Зерттеудің маңыздылығы. Өнеркәсіптік кәсіпорындарда сорғы қондырғылары электр энергиясын ең көп тұтынатын жабдықтардың бірі болып табылады. Сондықтан олардың энергия тиімділігін арттыру және пайдалану шығындарын төмендету қазіргі заманғы өндірістің өзекті міндеттерінің бірі саналады. Жиіліктік түрлендіргіштерді қолдану сорғылардың жұмыс параметрлерін дәл реттеуге, электр энергиясын үнемдеуге, жабдықтың сенімділігін арттыруға және қызмет ету мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді. Осыған байланысты жиіліктік түрлендіргіштердің техникалық мүмкіндіктерін, өндірушілерін және қолдану ерекшеліктерін талдау инженерлік тәжірибе үшін маңызды ғылыми және практикалық мәнге ие.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің жаңалығы сорғы қондырғыларына арналған жиіліктік түрлендіргіштердің жетекші әлемдік өндірушілерінің (Siemens, ABB, Danfoss,

Schneider Electric, Mitsubishi, Omron, Hitachi, Lenze, Grundfos, Vacon және т.б.) өнімдеріне кешенді салыстырмалы талдау жүргізуінде жатыр. Сонымен қатар, олардың техникалық сипаттамалары, функционалдық мүмкіндіктері, энергия үнемдеу тиімділігі, пайдалану ерекшеліктері және өнеркәсіптің әртүрлі салаларында қолдану бағыттары жүйеленіп, оларды таңдау бойынша практикалық ұсынымдар берілді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Аналитикалық шолу келесі кезеңдерді қамтиды: бірінші кезеңде осы бағыт бойынша дереккөздерге әдеби шолу жүргізілді; екінші кезеңде жиілікті түрлендіргіштерін автоматтандыру саласындағы үрдістер мен трендтер талданды; үшінші кезеңде жиілікті түрлендіргіштерін автоматтандырудағы ең оңтайлы үрдістер анықталды.

Omron жиілік түрлендіргіштері электр қозғалтқыштарын сапалы басқаруға арналған олар нөлдік жылдамдыққа дейін тегіс реттеуді және жылдам цикл режимдерінде дәл жұмыс істеуді және ашық және тұйық тізбегі бар кез келген режимдерде айналу моментін басқару мүмкіндігін қамтамасыз етеді. OMRON жиілік жетектері жылдамдық пен момент бойынша қатаң талаптары бар арзан жүйелерді құруға арналған ыңғайлы көп функциялы құрылғылар. Varispeed сериялы түрлендіргіштер 0,1-ден 300 кВт-қа дейінгі қуат диапазонына ие. Сондай-ақ, арнайы бағдарламалық жасақтама және кеңейту тақталарының кең ассортименті (Devicenet, Profibus және т.б.) жеткізіледі [3]. Omron жиілік түрлендіргіштері 1-ші суретте көрсетілген. Hitachi 1979 жылдан бастап жиілік түрлендіргіштерін шығарады және осы саланың әлемдік көшбасшыларының бірі болып табылады. Hitachi жиілік түрлендіргіштері электр желілерінің мүмкіндіктерін халықаралық стандарттарды ескере отырып жасайды. Түрлендіргіштер инновациялық компоненттерді пайдаланады ISPM модулі, жетілдірілген сенсорсыз векторлық басқару және өнеркәсіптік желілерге интеграциялаудың керемет мүмкіндіктері Hitachi жиілік түрлендіргіштерін кез-келген электр қозғалтқыштары мен жүйелері үшін оңтайлы таңдау жасайды. Жабдықтың ең жоғары ақауларға төзімділігі, электр қозғалтқышын қорғаудың сенімді деңгейі өз өндірісінің жоғары сапалы компоненттерімен қамтамасыз етіледі [4]. Hitachi жиілік түрлендіргіштері 2-ші суретте көрсетілген.



Сурет 1 – Omron жиілік түрлендіргіштері

Mitsubishi компаниясының жапондық FR жиілік түрлендіргіші, ең алдымен, энергияны үнемдеудің жоғарылауымен және жабдық өнімділігінің жоғарылауымен ерекшеленеді [5]. Mitsubishi жиілік түрлендіргіштері 3-ші суретте көрсетілген.

Mitsubishi жиілік түрлендіргіштерінің диапазоны 0,2-ден 630 кВт-қа дейінгі қуат диапазонын қамтиды және әртүрлі электр қозғалтқыштарын басқару функциялары бар түрлендіргіштердің бірнеше сериясын қамтиды: FR-S 500 (FR-S 520, FR-S 540), FR-E 500 ((FR-E 520, FR-E 540), FR-F 700 (FR-F 740, FR-F 746), FR-a 700 (FR-A720, FR-A 740, FR-A760). Mitsubishi жиілік түрлендіргіштерінің көпшілігі 200% шамадан тыс жүктеуге арналған.



Сурет 3 – Hitachi жиілік түрлендіргіштері

Siemens жиілік түрлендіргіштерінде желдеткіш түріндегі (центрифугалық сорғылар, желдеткіштер және т.б.) немесе тұрақты (конвейерлер, автоматты есік жетектері және т.б.) жүктемесі бар айнымалы ток қозғалтқыштарының айналуын басқару үшін қолданылатын модельдердің кең ауқымы бар. Айналу жылдамдығы өзгеретін жетек қажет болған кезде сумен жабдықтау, жылыту, желдету және кондиционерлеу қондырғыларында модельдер бар. Кейбір модельдер желдеткіш түріндегі жүктемесі бар төмен вольтты айнымалы ток қозғалтқыштарының айналу жылдамдығын өзгерту және реттеу үшін қолданылады, мұнда бастапқы момент пен шамадан тыс жүктемеден



Сурет 2 – Omron жиілік түрлендіргіштері

Schneider Electric жиілік түрлендіргіштері ең жаңа технологиялардың, көп функционалдылықтың және арзан бағаның арқасында электр қозғалтқыштарын басқару саласындағы кез-келген міндеттерге сәйкес келеді және конвейер жабдықтарында, көтеру механизмдері мен тасымалдау желілерінде, орау машиналарының жетектерінде, сорғы станцияларында, желдету және компрессорлық жүйелерде және т.б. түрлендіргіштер конфигурациялау және бағдарламалау бойынша кең мүмкіндіктерге ие, бұл сонымен қатар қосымша модульдерді орнату мүмкіндігі жабдықты қолдану аясын барынша кеңейтуге мүмкіндік береді [6]. ATV Altivar жиілік түрлендіргіштері 4-ші суретте көрсетілген.



Сурет 4 – ATV Altivar жиілік түрлендіргіштері

қорғау ерекше маңызды [7]. Siemens жиілік түрлендіргіштері 5-ші суретте көрсетілген.

LENZE жиілік түрлендіргіштері SMD және SMV типтерінің сериясымен ұсынылған. SMD сериялы түрлендіргіштер (скалярлық басқару) – 0,25-тен 22 кВт-қа дейінгі қуат диапазонындағы стандартты есептер үшін үнемді шешім. Lenze жиілік түрлендіргіші тек негізгі функциялармен жабдықталған, сондықтан оның құны төмен. SMV сериялы жиілік түрлендіргіштері (векторлық басқару) – ыңғайлы пернетақтаның және бірнеше секундты алатын ыңғайлы бағдарламалаудың арқасында басқару оңай [8]. LENZE жиілік түрлендіргіштері 6-суретте көрсетілген.



Сурет 5 – Siemens жиілік түрлендіргіштері

Электр энергиясын өндіруге, беруге және таратуға арналған электр жабдықтарын өндіруге мамандандырылған Халықаралық электротехникалық концерн. Компания екі сериялы төмен вольтты АВВ жиілік түрлендіргіштерін шығарады. CompAC (компоненттік жетектер) – өнеркәсіптің барлық салаларында және коммуналдық салада жаппай қолдануға арналған жетектер. ACS жиілік түрлендіргіштері (ACS550, ACS350, ACS150 және т.б.) реттеу сапасының жоғары көрсеткіштерін талап ететін қосымшаларда қолдануға арналған өнеркәсіптік және жүйелік жетектер [9]. АВВ жиілік түрлендіргіштері 7-ші суретте көрсетілген.

Danfoss компаниясының өндірістік бағдарламасында жиілік түрлендіргіштерінің бірнеше сериясы бар: әмбебап, жалпы



Сурет 7 – АВВ жиілік түрлендіргіштері

CUE Grundfos – Grundfos сорғыларының кең ауқымының айналу жиілігін реттеуге арналған жиілік түрлендіргіштерінің сериясы. Жиілік түрлендіргіштері орнатылған электр қозғалтқыштары бар сорғылар Grundfos компаниясында «Е-сорғылар» деп аталады. Grundfos CUE жиілік түрлендіргіші өнеркәсіп, коммуналдық шаруашылық, қалалық және тұрмыстық сумен жабдықтау, кәріз және суару сияқты көптеген салаларда жұмыс істейтін сорғы жабдықтары үшін арнайы жасалған. Жиілік түрлендіргіштерінің бұл сериясы ұқсас функцияларға ие және электр қозғалтқышына ендірілген жиілік түрлендіргіштерімен жеткізетін Grundfos E сорғыларымен арнайы пайдаланушы



Сурет 6 – LENZE жиілік түрлендіргіштері

өнеркәсіптік және мамандандырылған, жылыту, желдету және ауаны баптау жүйелерінде, су секторында қолдануға арналған. Жиілік түрлендіргіштерінің барлық серияларының функционалдығы қуат тұтынуды оңтайландырады, электр қозғалтқышын толық қорғайды және бүкіл жүйені бақылауға мүмкіндік береді. Danfoss VLT Aqua жиілік түрлендіргіштері (FC 202 және т.б.) сумен жабдықтау және су бұру жүйелерінде, Danfoss VLT HVAC – жылыту, желдету және ауаны баптау жүйелерінде пайдалануға арналған. Барлық Danfoss жиілік түрлендіргіштерінде аралық тізбектің тогын тегістейтін DC тізбегінде кіріктірілген гармоникалық сүзгі бар. Осының арқасында Danfoss жиілік түрлендіргіштері желідегі жүктемені шектей алады [10]. Danfoss жиілік түрлендіргіштері 8-ші суретте көрсетілген.



Сурет 8 – Danfoss жиілік түрлендіргіштері

интерфейсіне ие [11]. CUE Grundfos жиілік түрлендіргіштері 9-шы суретте көрсетілген.

1993 жылы құрылған финдік Vacon компаниясы асинхронды қозғалтқыштарды басқару үшін жиілік түрлендіргіштерін әзірлеуге, өндіруге және енгізуге маманданған. Vacon жиілік түрлендіргіштерін кең қуат диапазонына (300 Вт-тан 3 МВт-қа дейін) және кернеулерге (220В-тан 690В-қа дейін) ұсынады. Бастапқыда компания SH сериялы түрлендіргіштерді шығарды, 2000 жылы жаңа буын – NX (NXL, NXS, NXP және т.б.) Vacon жиілік түрлендіргіштері пайда болды [12]. Vacon жиілік түрлендіргіштері 10-шы суретте көрсетілген.



Сурет 9 – CUE Grundfos жиілік түрлендіргіштері

Оңтүстік Кореяның LG Industrial Systems компаниясы (LG компаниялар тобы) – Кореядағы өнеркәсіптік автоматтандыру құралдары нарығының көшбасшысы [13]. LG Industrial Systems жиілік түрлендіргіштері 11-ші суретте көрсетілген.

LG жиілік түрлендіргіштері функционалдылықты, тиімділікті, орнату және пайдалану ыңғайлылығын ажыратады. LG Industrial Systems жиілік түрлендіргіштері келесі сериялармен ұсынылған: IC-5, IG-5A, is-5, IS-7, IP-5A, IE-5 және т.б. [13].

Асинхронды айнымалы ток қозғалтқыштарына арналған IGBT



Сурет 11 – LG Industrial Systems жиілік түрлендіргіштері

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Сорғы қондырғыларындағы жиілікті түрлендіргіштерге аналитикалық шолу негізінде келесі нәтижелер жасауға болады:

Энергия тиімділігі және экономикалық пайда. Сорғы қондырғыларында жиілік түрлендіргіштерін пайдалану энергия тиімділігі тұрғысынан айтарлықтай артықшылықтарды көрсетеді. Сорғы қозғалтқышының айналу жылдамдығын сұйықтықтың ағымдағы қажеттілігіне қарай реттеу электр энергиясын тұтынуды айтарлықтай азайтуға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе жұмыс циклі кезінде жүктемелер өзгертін жүйелерде байқалады. Дәстүрлі реттеу әдістерінің орнына жиілік түрлендіргіштерін енгізу (мысалы, дроссельдеу)



Сурет 10 – Vacon жиілік түрлендіргіштері

транзисторларындағы Веспер жиілік түрлендіргіші сенімділікті, функционалдылықты, жоғары жүктеме сыйымдылығын және төмен бағаны біріктіреді. Веспер жиілік түрлендіргіштері он модельден тұрады: EI-7011 сериялы жалпы өнеркәсіптік мақсаттағы Веспер жиілік түрлендіргіштері, EI - P7002 сериялы Веспер сорғы түрлендіргіші, E3-8100 және EI-9011 векторлық типті жиілік түрлендіргіштері және т.б. Сонымен қатар, Веспер компаниясы EI-8300 және EI-8001 шағын жиілік түрлендіргіштерін, EI-MINI корпуссыз жиілік түрлендіргіштерін шығарады [14]. Веспер жиілік түрлендіргіштері 12-ші суретте көрсетілген.



Сурет 12 – Веспер жиілік түрлендіргіштері

қосымша гидравликалық кедергілерді жеңуге байланысты қуат шығынын болдырмайды. Мұндай шығындар қуат тұтынудың 50% - на жетуі мүмкін, бұл реттелетін жетек жүйелеріне ауысуды энергияны үнемдеудің маңызды қадамына айналдырады.

Жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзарту. Жиілік түрлендіргіштері қозғалтқыштардың тегіс іске қосылуын және тоқтауын қамтамасыз етеді, бұл сорғылар мен олардың құрамдас бөліктеріндегі механикалық кернеулерді азайтады. Бұл жабдықтың тозуын азайтуға және оның қызмет ету мерзімін ұзартуға әкеледі. Сонымен қатар, діріл мен шуды азайту жұмыс жағдайларын жақсартады және инфрақұрылымдық жүктемені азайтады.

Басқару дәлдігі және бейімделу. Жиілік түрлендіргіштері сорғылардың қысым мен сұйықтық беру сияқты параметрлерін дәл реттеуге мүмкіндік береді. Бұл әсіресе сумен жабдықтау жүйелері немесе технологиялық процестер сияқты белгілі бір жағдайларды сақтауды қажет ететін жүйелерде өте маңызды. Жұмыс параметрлерін оңай реттеу мүмкіндігі сорғы жүйелерін физикалық араласуды немесе компоненттерді ауыстыруды қажет етпестен өзгеретін жұмыс жағдайларына бейімдеуге мүмкіндік береді.

Жабдықты қорғау. Көптеген жиілік түрлендіргіштері шамадан тыс жүктемеден, қызып кетуден және басқа төтенше жағдайлардан қорғау сияқты жабдықты қорғау мүмкіндіктерімен жабдықталған. Бұл зақымданудың алдын алуға және жабдықтың істен шығу қаупін азайтуға көмектеседі, бұл оның беріктігіне де оң әсер етеді.

Өндірушілер мен модельдердің кең таңдауы. Нарықта Siemens, ABB, Schneider Electric, Danfoss, Mitsubishi, Omron және басқалары сияқты жиілік түрлендіргіштерінің көптеген өндірушілері бар. Олардың әрқайсысы әртүрлі функциялары мен сипаттамалары бар модельдердің кең спектрін ұсынады, бұл нақты тапсырмалар үшін оңтайлы шешімді таңдауға мүмкіндік береді. Мысалы, Mitsubishi түрлендіргіштері энергияны үнемдеудің жоғарылауымен ерекшеленеді, ал Schneider Electric өнімдері көп функциялы және қол жетімді бағамен танымал, Omron түрлендіргіштері жылдамдықты біркелкі реттеуге және циклдік режимдерде дәл жұмыс істеуге мүмкіндік береді, ал Hitachi жоғары ақауларға төзімділік пен өнеркәсіптік желілерге интеграцияны ұсынады. Сонымен қатар «Комбарко», «Веспер», «Эрасиб» және «Вектор» сияқты ресейлік компаниялар да жиілік түрлендіргіштерінің өндірісін белсенді дамытуда. Олардың өнімдері әлемдік стандарттардан кем түспейді және әртүрлі салалар үшін бәсекеге қабілетті шешімдерді ұсынады.

Әр түрлі салаларда қолдану. Жиілік түрлендіргіштері сумен жабдықтау, жылыту, желдету, ауаны баптау, өнеркәсіптік конвейерлер, көтеру механизмдері және басқаларын қоса алғанда, көптеген салаларда қолданылады. Бұл олардың әмбебаптығын және әртүрлі жұмыс жағдайларына жоғары бейімделуін көрсетеді.

Жиілік түрлендіргіштерін электр жетектерін басқару жүйелеріне енгізу энергия тиімділігін арттырудағы және пайдалану шығындарын азайтудағы маңызды қадам болып табылады. Алайда, айқын артықшылықтарға қарамастан, кейбір шектеулер бар.

Сонымен қатар, түрлендіргіштердің сапасы, әсіресе Қытайда шығарылатындар, әр түрлі болуы мүмкін, бұл жеткізушілер мен модельдерді мұқият таңдауды қажет етеді. «Комбарко» сияқты Ресейлік өндірушілер бәсекеге қабілетті шешімдерді ұсынады, бірақ олардың нарықтағы үлесі әлі де аз.

Жалпы, сорғы қондырғыларында және электр жетектерін басқарудың басқа жүйелерінде жиілік түрлендіргіштерін пайдалану энергия тиімділігін арттыруға, пайдалану шығындарын азайтуға және жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзартуға ықпал ететін перспективалы бағыт болып табылады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жиілік түрлендіргіштеріне негізделген сорғылардың автоматтандырылған электр жетектері сорғы жүйелерін басқарудың энергия тиімділігін, сенімділігін және дәлдігін арттырудың ең тиімді шешімдерінің бірі болып табылады. Мұндай технологияларды енгізу энергия тұтынуды едәуір төмендетіп қана қоймай, жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзарту және төтенше жағдайлардың алдын алу арқылы пайдалану шығындарын азайтуға мүмкіндік береді.

Заманауи технологиялар мен шешімдерге шолу Siemens, ABB, Danfoss және Schneider Electric сияқты жетекші өндірушілердің жиілік түрлендіргіштері сорғы жүйелерінің өзгермелі жұмыс жағдайларына жоғары икемділігі мен бейімделуін қамтамасыз ететінін көрсетті. Бұл әсіресе сумен жабдықтау, өнеркәсіп және салқындату жүйелері сияқты салаларда өте маңызды, мұнда жабдықтың параметрлерін дәл реттеу қажет.

Дегенмен, автоматтандырылған электр жетектерін енгізу жабдықтың жоғары бастапқы құнын, білікті персоналдың қажеттілігін және киберқауіпсіздікті қамтамасыз етуді қоса алғанда, бірқатар техникалық және экономикалық қиындықтарды қамтиды.

Бұл саланың даму перспективалары IoT, жасанды интеллект және болжамды аналитика сияқты цифрлық технологияларды одан әрі біріктірумен байланысты, бұл сорғы қондырғыларын басқарудың толық автономды және өзін-өзі оқытатын жүйелерін құруға мүмкіндік береді.

АВТОРЛЫҚ ҮЛЕС

(CRediT таксономиясы)

Серикболатұлы А. – зерттеу тұжырымдамасы (Conceptualization), әдебиеттерді талдау (Investigation), мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау (Writing – original draft).

Баясилова З.А. – материалдарды жинақтау және талдау (Data curation, Formal analysis), мақаланы редакциялау (Writing – review & editing).

Сиверская Т.И. – ғылыми кеңес беру (Supervision), әдістемелік қамтамасыз ету (Methodology).

Кунтуш Е.В. – техникалық ақпаратты жүйелеу және визуализация (Visualization, Validation).

Батырбек Ә.Е. – жұмысты үйлестіру, қорытынды редакциялау және нәтижелерді тексеру (Project administration, Validation, Writing – review & editing).

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Автор осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Авторлар осы зерттеуді орындау кезінде сыртқы қаржыландырудың жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС

Авторлар мақаланы жетілдіруге бағытталған құнды ұсыныстары мен ескертулері үшін журналдың редакциялық алқасы мен рецензенттеріне шынайы алғыстарын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] М. А. Мустафин, Н. К. Алмуратова и С. С. Табултаев, Энергосберегающий электропривод центробежных насосов: учебное пособие (для магистрантов специальности «Электроэнергетика»). Алматы, Казахстан: АУЭС, 2016.
- [2] Г. И. Колесников, Автоматизация и управление в электроэнергетике. Санкт-Петербург, Россия: Энергоатомиздат, 2017.
- [3] Omron частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://driveka.ru/catalog/418.html>. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [4] Hitachi частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: https://privod-in.ru/catalog/preobrazovateli_chastoty/hitachi/. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [5] Mitsubishi Electric частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://atp.kz/mitsubishi-electric.html>. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [6] Schneider Electric Altivar (ATV) частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://gekoms.org/catalog-schneider-electric-atv610/>. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [7] Siemens SINAMICS V20 частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: https://pe-ko.com.ua/uk/preobraz_sinamics_v20_2404. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [8] LENZE частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: https://pe-ko.com.ua/uk/preobraz_sinamics_v20_2404. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [9] ABB частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://xn----8sbelcsnbf2avfz4m.xn--p1ai/catalog/chastotnyy-preobrazovatel-abb/>. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [10] Danfoss частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://alltech.kz/p117652222-chastotnyj-preobrazovatel-danfoss.html>. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [11] Grundfos CUE частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://www.glavobjekt.ru/nasosnye-ustanovki/chastotnyj-preobrazovatel-dlya-nasosov-grundfos-cue.html>. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [12] VACON 100 FLOW частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://invert.by/shop/products/preobrazovateli-chastoty/vacon/vacon-100-flow-075-160-kvt/>. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [13] LS (LG Industrial Systems) частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://eleksun.com.ua/blog/article/ls-promyslovi-systemy-chastotni-transformatory>. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.
- [14] Веспер частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: https://privod-in.ru/catalog/preobrazovateli_chastoty/vesper/. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.

[15] CombiVario частотные преобразователи. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://infourok.ru/novye-preobrazovateli-chastoty-combivario-4815278.html>. Дата обращения: 25 февраля 2025 г.

REFERENCES

[1] M. A. Mustafin, N. K. Almuratova, and S. S. Tabultaev, Energy-Efficient Electric Drive of Centrifugal Pumps: Study Guide for Master's Students in Electric Power Engineering. Almaty, Kazakhstan: AUES, 2016.

[2] G. I. Kolesnikov, Automation and Control in Electric Power Engineering. St. Petersburg, Russia: Energoatomizdat, 2017.

[3] "Omron Frequency Converters," [Online]. Available: <https://driveka.ru/catalog/418.html>. Accessed: Feb. 25, 2025.

[4] "Hitachi Frequency Converters," [Online]. Available: https://privod-in.ru/catalog/preobrazovateli_chastoty/hitachi/. Accessed: Feb. 25, 2025.

[5] "Mitsubishi Electric Frequency Converters," [Online]. Available: <https://atp.kz/mitsubishi-electric.html>. Accessed: Feb. 25, 2025.

[6] "Schneider Electric Altivar (ATV) Frequency Converters," [Online]. Available: <https://gekoms.org/catalog-schneider-electric-atv610/>. Accessed: Feb. 25, 2025.

[7] "Siemens SINAMICS V20 Frequency Converters," [Online]. Available: https://pe-ko.com.ua/uk/preobraz_sinamics_v20_2404. Accessed: Feb. 25, 2025.

[8] "LENZE Frequency Converters," [Online]. Available: https://pe-ko.com.ua/uk/preobraz_sinamics_v20_2404. Accessed: Feb. 25, 2025.

[9] "ABB Frequency Converters," [Online]. Available: <https://xn----8sbelcsnbf2avfz4m.xn--p1ai/catalog/chastotnyy-preobrazovatel-abb/>. Accessed: Feb. 25, 2025.

[10] "Danfoss Frequency Converters," [Online]. Available: <https://alltech.kz/p117652222-chastotnyj-preobrazovatel-danfoss.html>. Accessed: Feb. 25, 2025.

[11] "Grundfos CUE Frequency Converters," [Online]. Available: <https://www.glavobjekt.ru/nasosnye-ustanovki/chastotnyj-preobrazovatel-dlya-nasosov-grundfos-cue.html>. Accessed: Feb. 25, 2025.

[12] "VACON 100 FLOW Frequency Converters," [Online]. Available: <https://invert.by/shop/products/preobrazovateli-chastoty/vacon/vacon-100-flow-075-160-kvt/>. Accessed: Feb. 25, 2025.

[13] "LS (LG Industrial Systems) Frequency Converters," [Online]. Available: <https://eleksun.com.ua/blog/article/ls-promyslovi-systemy-chastotni-transformatory>. Accessed: Feb. 25, 2025.

[14] "Vesper Frequency Converters," [Online]. Available: https://privod-in.ru/catalog/preobrazovateli_chastoty/vesper/. Accessed: Feb. 25, 2025.

[15] "CombiVario Frequency Converters," [Online]. Available: <https://infourok.ru/novye-preobrazovateli-chastoty-combivario-4815278.html>. Accessed: Feb. 25, 2025.

IT technologies, energy, automation and computer engineeringDOI: <https://doi.org/10.53002/102>**USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO DETECT ANOMALIES IN NETWORK TRAFFIC****^{1*}Abdulov A. ²Aitmaganbetov A.**¹NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan²JSC ««Kazakh University of Technology and Business named after K. Kulazhanov», Astana, Kazakhstan*Corresponding author e-mail: abdulov@tttu.edu.kz**Authors information:****Abdulov A. S.**, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: abdulov@tttu.edu.kz**Aitmaganbetov Asset**, JSC ««Kazakh University of Technology and Business named after K. Kulazhanov», Astana, Kazakhstan, e-mail: a.aitmaganbetov@gmail.com

Abstract — This study examines the effectiveness of applying artificial intelligence (AI) technologies to detect anomalies in network traffic for improving information security. The rapid growth of digital infrastructures, cloud computing, and Internet-connected devices has significantly increased the volume and complexity of network traffic, making conventional signature- and rule-based detection methods less effective against modern cyber threats. As a result, intelligent approaches capable of identifying previously unknown attack patterns have become essential for ensuring the security and reliability of computer networks. The research investigates the application of machine learning and deep learning techniques for network traffic anomaly detection. Particular attention is given to the comparative analysis of widely used algorithms, including Random Forest and Long Short-Term Memory (LSTM) neural networks, with respect to their detection accuracy, computational efficiency, and ability to recognize complex temporal patterns in network traffic. The proposed approach also considers the integration of synthetic and real-world datasets to improve the reliability of model training and validation under diverse operating conditions. The findings demonstrate that AI-based models provide significantly higher detection accuracy, lower false-positive rates, and greater adaptability than traditional approaches. Among the evaluated methods, LSTM showed superior performance in identifying temporal anomalies, whereas Random Forest achieved a favorable balance between accuracy and computational cost. The obtained results confirm the potential of artificial intelligence for real-time network monitoring, early detection of cyberattacks, and automated incident response. The study concludes with practical recommendations for integrating AI-based anomaly detection systems into modern cybersecurity infrastructures to enhance the resilience, reliability, and overall effectiveness of network protection mechanisms.

Keywords — network traffic, anomaly detection, artificial intelligence, machine learning, deep learning, cybersecurity.

ЖЕЛІЛІК ТРАФИКТЕГІ АУЫТҚУЛАРДЫ АНЫҚТАУ ҮШІН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТТІ ПАЙДАЛАНУ**^{1*}Абдулов А.С., ²Айтмағанбетов А.Л.**¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан²«Қ. Құлажанов атындағы қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана, Қазақстан*Автор-корреспондент e-mail: abdulov@tttu.edu.kz**Авторлар туралы ақпарат:****Абдулов А.С.**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан, e-mail: abdulov@tttu.edu.kz**Айтмағанбетов Асет Лайыкович**, «Қ. Құлажанов атындағы қазақ технология және бизнес университеті» АҚ, Астана, Қазақстан, e-mail: a.aitmaganbetov@gmail.com

Аңдатпа — Бұл жұмыста ақпараттық қауіпсіздік деңгейін арттыру мақсатында желілік трафиктегі аномалияларды анықтауда жасанды интеллект (ЖИ) технологияларын қолданудың тиімділігі зерттелді. Цифрлық инфрақұрылымның, бұлттық есептеулердің және интернетке қосылған құрылғылардың қарқынды дамуы желілік трафик көлемі мен күрделілігін айтарлықтай арттырды, бұл дәстүрлі сигнатуралық және ережелерге негізделген әдістердің қазіргі заманғы киберқауіптерді анықтаудағы тиімділігін төмендетеді. Осыған байланысты бұрын белгісіз шабуыл түрлерін анықтай алатын интеллектуалды тәсілдерді қолдану компьютерлік

желілердің қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз етудің маңызды бағыты болып табылады. Зерттеуде желілік трафиктегі аномалияларды анықтау үшін машиналық оқыту және терең оқыту әдістерін қолдану қарастырылды. Random Forest алгоритмі мен Long Short-Term Memory (LSTM) рекурренттік нейрондық желісінің анықтау дәлдігі, есептеу тиімділігі және желілік трафиктің күрделі уақыттық заңдылықтарын анықтау қабілеті бойынша салыстырмалы талдау жүргізілді. Сонымен қатар, әртүрлі пайдалану жағдайларында модельдерді оқыту мен валидациялаудың сенімділігін арттыру үшін синтетикалық және нақты желілік деректер жиынтықтарын біріктіріп пайдалану тәсілі ұсынылды. Зерттеу нәтижелері жасанды интеллектке негізделген модельдердің дәстүрлі әдістермен салыстырғанда анықтау дәлдігінің жоғары екенін, жалған дабылдар санын азайтатынын және жаңа қауіптерге жақсы бейімделетінін көрсетті. Қарастырылған алгоритмдердің ішінде LSTM моделі уақыттық аномалияларды анықтауда ең жоғары нәтижелерге қол жеткізсе, Random Forest дәлдік пен есептеу шығындарының тиімді арақатынасын қамтамасыз етті. Жұмыста интеллектуалды аномалияларды анықтау жүйелерін заманауи киберқауіпсіздік инфрақұрылымына енгізу бойынша практикалық ұсынымдар беріліп, компьютерлік желілерді қорғаудың сенімділігі мен тұрақтылығын арттыру мүмкіндігі негізделді.

Түйін сөздер — Желілік трафик, ауытқуларды анықтау, жасанды интеллект, машина жасау, терең оқыту, киберқауіпсіздік.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ

¹Абдулов А.С., ²Айтмаганбетов А.Л.

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан

²АО «Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова», Астана, Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: abdulov@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Абдулов А.С., НАО «Карагандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан,

e-mail: abdulov@tttu.edu.kz

Айтмаганбетов Асет Лайыкович, АО «Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова», Астана, Казахстан, e-mail: a.aitmaganbetov@gmail.com

Аннотация — В данной работе исследуется эффективность применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) для обнаружения аномалий в сетевом трафике с целью повышения уровня информационной безопасности. Стремительное развитие цифровой инфраструктуры, облачных вычислений и устройств, подключенных к сети Интернет, значительно увеличило объем и сложность сетевого трафика, что снижает эффективность традиционных сигнатурных и основанных на правилах методов обнаружения современных киберугроз. В связи с этим интеллектуальные методы, способные выявлять ранее неизвестные типы атак, становятся важным инструментом обеспечения безопасности и надежности компьютерных сетей. В исследовании рассмотрено применение методов машинного обучения и глубокого обучения для обнаружения аномалий в сетевом трафике. Особое внимание уделено сравнительному анализу широко используемых алгоритмов, включая Random Forest и рекуррентные нейронные сети Long Short-Term Memory (LSTM), с точки зрения точности обнаружения, вычислительной эффективности и способности выявлять сложные временные закономерности сетевого трафика. Предложенный подход также предусматривает использование синтетических и реальных наборов данных для повышения достоверности обучения и валидации моделей в различных условиях эксплуатации. Полученные результаты показали, что модели, основанные на искусственном интеллекте, обеспечивают более высокую точность обнаружения, меньшее количество ложных срабатываний и лучшую адаптивность по сравнению с традиционными методами. Среди исследованных алгоритмов модель LSTM продемонстрировала наилучшие результаты при выявлении временных аномалий, тогда как Random Forest обеспечил оптимальное соотношение между точностью и вычислительными затратами. В работе представлены практические рекомендации по внедрению интеллектуальных систем обнаружения аномалий в современные системы кибербезопасности для повышения надежности и устойчивости защиты компьютерных сетей.

Ключевые слова — сетевой трафик, обнаружение аномалий, искусственный интеллект, машинное обучение, deep learning, кибербезопасность.

MAIN PROVISION

The conducted study demonstrated that artificial intelligence algorithms significantly improve the accuracy of network traffic anomaly detection

compared with conventional signature- and rule-based methods. Comparative evaluation showed that the LSTM model achieved the highest performance in detecting temporal and complex traffic anomalies,

while the Random Forest algorithm provided a favorable balance between detection accuracy and computational efficiency. The integration of synthetic and real-world network traffic datasets increased the reliability of model validation and improved the robustness of anomaly detection under diverse operating conditions.

INTRODUCTION

In modern times, the prevalence of internet networks and the increase in data volumes make it difficult to ensure the normal operation of network traffic. The availability of the internet on a global scale and the development of digital technologies have become the main means of data exchange in business, education, health and other areas of everyday life. In this process, the volume of network traffic grew exponentially, increasing the requirements for its control and monitoring systems. For example, innovations such as 5G technologies, the Internet of Things (IoT) and cloud computing are further intensifying the complexity of networks. In this case, maintaining the stability and security of network traffic is becoming an important task. Anomalies resulting from cyber attacks, system failures, or abnormal use pose a threat to network security. Types of cyber attacks, including DDoS (Distributed Denial of Service), phishing, and the spread of malware, pose a constant threat to network infrastructures. For example, DDoS attacks disrupt the normal flow of network traffic, causing servers to overload, and malware is used to steal data or damage the system. In addition, system failures, such as hardware failures or software errors, can also cause fluctuations in traffic. Abnormal use, that is, the use of the network for the wrong purpose (for example, excessive data loading or spam distribution), also exacerbates this problem. All these factors increase the importance of network security, making it necessary to detect and respond to deviations in a timely manner.

Traditional rule-based methods have limited capabilities in solving this problem because they are ineffective in detecting new and complex deviations. These methods rely on predetermined rules and patterns, which means that they can only detect known threats. For example, if an attacker uses a new method or a deviation occurs in a previously unregistered sample, traditional systems cannot detect it. In addition, the dynamic nature of network traffic and the increase in its volume exceed the processing capacity of rule-based systems. In this regard, it was necessary to look for more efficient and flexible solutions.

The use of artificial intelligence, especially mechanical engineering and deep learning methods, is becoming increasingly important. Machine learning algorithms, such as Random Forest or Support Vector Machine (SVM), are widely used to classify and identify fluctuations in network traffic. These methods can analyze large data sets and distinguish between normal and abnormal patterns. And deep learning, especially models such as Convolutional Neural Networks (CNN) and Long Short-Term Memory (LSTM), allows for a deeper analysis of the temporal and spatial characteristics of traffic. For example, LSTM is capable of detecting dependencies in traffic flows over time, which plays an important role in monitoring the evolutionary development of cyber attacks. These AI methods, unlike traditional approaches, have the ability to self-learn, which means they can adapt to new data.

This study aims to explore the potential of AI technologies in detecting fluctuations in network traffic. The main goal of the study is to assess the accuracy and effectiveness of detecting deviations using various methods of AI and compare them with traditional methods. In addition, the study involves the development of practical recommendations aimed at improving network security. For example, approaches such as the real-time application of AI-based systems or the development of hybrid models are considered. In the course of the study, synthetic and real data sets are used, which makes it possible to test the effectiveness of models in different scenarios. Thus, this study is aimed at solving current problems in the field of cybersecurity and laying the foundation for future technological solutions.

Research gap. Although artificial intelligence has been widely applied to intrusion detection and network traffic analysis, many existing studies rely on outdated benchmark datasets or evaluate only a single machine learning model. Furthermore, limited attention has been paid to comparing classical machine learning and deep learning approaches using both synthetic and real network traffic datasets under identical evaluation conditions. The practical applicability of these methods for detecting previously unseen anomalies and their computational trade-offs also remain insufficiently investigated.

Novelty statement. The novelty of this study lies in the comparative evaluation of machine learning (Random Forest and SVM) and deep learning (CNN and LSTM) models using both synthetically generated traffic and the KDD Cup 1999 benchmark dataset. The study provides a unified assessment of detection accuracy, recall, and F1-score while analyzing computational complexity and practical applicability of different AI approaches. Based on the

obtained results, practical recommendations for implementing AI-based anomaly detection systems in modern network infrastructures are proposed.

METODOLOGY

In the course of the study, both synthetic and real datasets were used to analyze network traffic. The synthetic data was generated to model different types of anomalies, while the real data was sourced from the publicly available KDD Cup 1999 dataset. Combining these two data sources enhanced the reliability of the study and allowed for the evaluation of model performance under varying conditions. Artificial Intelligence (AI) methods – particularly machine learning and deep learning approaches – were applied to detect anomalies. The main objective of the study was to assess the effectiveness of these methods in identifying fluctuations in network traffic and to determine their contribution to cybersecurity through comparative analysis. This section provides a detailed description of the data preparation process, the technical characteristics of the methods used, and the evaluation metrics.

Datasets and their preparation. Synthetic and real datasets were chosen as the foundation of the study. The use of synthetic data made it possible to simulate various anomalies in a controlled environment and to cover scenarios that occur rarely in actual network traffic. The synthetic data was generated using tools such as Scikit-learn, NumPy, and Pandas in the Python programming language. This dataset consisted of 150,000 records, of which

70% represented normal traffic and 30% represented anomalies. Simulated cyber threats – including DDoS attacks, port scanning, data theft, and network intrusion – were introduced as types of anomalies. For example, DDoS attacks were modeled as a sudden surge in traffic volume (more than 1,000 connections per second), while port scanning was represented by repeated attempts to connect to specific ports (e.g., ports 80 or 443). This simulation process was designed to reflect the diversity and variability found in real network environments (Table 1).

The KDD Cup 1999 dataset was used as the actual data, which is a benchmark base widely used in research in the field of network security. This data was collected in the MIT Lincoln Laboratory in 1999 and consists of 4.9 million records. Along with normal traffic, it includes four main types of attacks: Denial of Service (DoS), Probe, Remote-to-Local (R2L), and User-to-Root (U2R). Each entry contains 41 characters (features), among which are parameters such as the duration of the connection, protocol type (TCP, UDP), the number of bytes sent and received, as well as error codes. The advantage of KDD Cup 1999 is that it is open access and allows you to compare the results of the study with other works. However, as its disadvantage, the obsolescence of the data (based on the technologies of 1999) and the lack of full coverage of the complexity of modern cyberattacks were noted. To overcome this shortcoming, the relevance of the study was increased by combining it with synthetic data.

Table 1 – Methods for detecting anomalies

Method	Description	Advantages	Disadvantages
Uncontrolled: Clustering	Divides similar data points into groups and identifies anomalies	Simple implementation, high efficiency	Sensitive to the choice of algorithm and parameters
Uncontrolled: density method	Identifies isolated or low density points as anomalies	Resistant to noise and extraneous values	High calculation difficulty, sensitive to parameters
Controlled: Classification	Using algorithms such as Random Forest and SVM, it divides traffic into normal or abnormal	Simple implementation, high efficiency	Requires marked data, may be poorly generalized to new data
Controlled: ensemble methods	Combining the results of multiple models increases accuracy	Improves accuracy, noise works better with more data	Requires a lot of computing resources, requires careful adjustment of parameters
Controlled: deep learning	Using the CNN and RNN neural networks, it detects complex patterns	Effective for complex samples, high precision	Requires more voluminous Fixed Data, higher computational difficulty

Research methods. Two main AI approaches were used to detect abnormalities: mechanical engineering and deep learning. Each of these methods has its own characteristics and scope of application,

so comparing their effectiveness has become one of the main goals of the study.

Mechanical engineering. The Random Forest and Support Vector Machine (SVM) algorithms were

chosen as machine methods. These algorithms are considered effective for classifying and predicting anomalies because they are capable of processing large data sets and detecting complex patterns.

1. Random Forest: this algorithm is based on an ensemble of decision trees and is distinguished by high accuracy in classification tasks. The advantages of Random Forest are its resistance to overtraining (overfitting) and its ability to process many traits efficiently. In the study, the Random Forest model consisted of 100 trees, and the maximum depth was limited to 10 levels. The adjustment of hyperparameters (for example, the number and depth of trees) was carried out using the Grid Search method, which made it possible to find the optimal configuration of the model. Random Forest used two classes (binary classification) to classify normal and abnormal traffic: "normal" and "deviation". With its "feature importance" function, the traits that most influence traffic fluctuations (such as "src_bytes" or "dst_bytes") were identified.

2. Support Vector Machine (SVM): SVM was used as an algorithm capable of separating linear and nonlinear data. The study used SVM with a radial basis function (RBF) core because it is effective for separating complex samples. The main parameters of SVM – C (regularization coefficient) and gamma – were regulated by cross-validation. The value of C was chosen as 1.0, and gamma as 0.01. SVM created hyperplanes to separate the normal and deviation classes, providing a high margin solution boundary. But SVM was seen to work slowly on large datasets, so its use was limited to a small subset (500,000 entries) of KDD Cup 1999. Deep learning. Convolutional Neural Networks (CNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) models were chosen as deep learning methods. These models were used to recognize traffic patterns and identify temporary dependencies.

1. Convolutional Neural Networks (CNN): although CNN is usually used to analyze images, it was used in the study by presenting traffic data as a 2D matrix. The data was reconstructed not as vectors of 41 signs, but as a matrix consisting of 10 rows (timesteps) in time. The CNN model consisted of 2 convolutional layers (32 and 64 filters), 2 pooling layers, and 1 fully connected layer. ReLU was used as an activation function, and on the output layer, the softmax function was used to predict two classes (normal/deviation). The CNN learning process was limited to 30 epochs and an Adam optimizer was used (learning rate = 0.001). This model was effective in identifying local dependencies in traffic patterns.

2. Long Short-Term Memory (LSTM): LSTM specializes in the analysis of temporary dependent data, so it was chosen to detect dynamic changes in traffic flows. The LSTM model consisted of 2 layers,

with 128 neurons in each layer. The Dropout layer (20%) was added to prevent overtraining. The learning process was carried out with 50 epochas, and on the east floor, the sigmoid function was used to predict two classes. LSTM analyzed time-sequenced traffic data (e.g. 10-row sequences), which was important in detecting ad hoc evolving attacks such as DDoS or Probe.

Evaluation metrics. To assess the effectiveness of the models, metrics such as accuracy, sensitivity (recall) and F1-size were calculated. While accuracy measured the overall correct predictions of the model, sensitivity estimated the model's ability to detect deviations (true positive rate). The F1-size showed a balance between accuracy and sensitivity, which was important given the rarity of deviations. The metrics were calculated in a test set and confirmed by cross-validation (5-fold). For example, Random Forest's accuracy was 92% in synthetic data, and LSTM's KDD Cup was 95% in 1999.

The research methodology provided a realistic and observable environment by combining synthetic and real data. Machine-building techniques (Random Forest, SVM) focused on quick and effective analysis, and deep learning (CNN, LSTM) focused on identifying complex patterns. Evaluation metrics made it possible to objectively measure the reliability of models. This methodology was the basis for studying the potential of AI in detecting fluctuations in network traffic.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

The results of the study confirmed that models based on artificial intelligence (AI) showed high results in detecting fluctuations in network traffic. The methods used in the study – the Random Forest algorithm and the Long Short-Term Memory (LSTM) model – were particularly effective in performing this task. While the Random Forest algorithm achieved 92% accuracy, the LSTM model differed in temporary data with 95% accuracy. These results prove the significant advantage of AI technologies over traditional methods. Compared to traditional methods, such as rule-based systems, AI models showed 20-30% higher efficiency in detecting new and unknown anomalies. The advantage of deep learning models in analyzing complex traffic patterns was also observed, but it was found that the process of their training requires more computing resources. In this section, a detailed analysis of the research results, factors affecting the performance of models and conclusions regarding their practical application are described in detail.

Accuracy of models and comparative analysis. The achievement of the Random Forest algorithm with an accuracy of 92% confirms its leading position among machine-building methods. This algorithm

was tested with synthetic and real data sets (KDD Cup 1999), where it showed high accuracy in distinguishing between normal traffic and fluctuations. The effectiveness of Random Forest is based on its ensemble approach, that is, the predictions of several decision trees are combined to make the final decision. The model used in the study consisted of 100 trees, and the problem of overfitting (overfitting) was minimized by adjusting hyperparameters (for example, the maximum depth of trees was limited to 10 levels). According to the results, Random Forest showed particularly high sensitivity (recall) in detecting abnormalities such as DDoS attacks and port scanning – more than 90%. This shows that it can effectively classify abnormal patterns and reduces false negative (false negative) results.

The LSTM model has reached 95% accuracy in the analysis of temporal data, which clearly proves the advantage of deep learning methods. LSTM specializes in detecting time dependencies, so it has shown exceptional results in analyzing dynamic changes in traffic flows. For example, while DDoS attacks modeled on synthetic data were characterized by a sudden increase in traffic, the LSTM was able to track these changes over time and accurately distinguish them from normal traffic. In the study, the LSTM model consisted of 2 layers, each layer had 128 neurons, and the learning process was limited to 50 epochs. The Dropout layer (20%) was added to prevent overtraining. In detecting time-dependent attacks (such as Probe types) in KDD Cup 1999 data, the F1-size of the LSTM was 94%, which confirms the balance of its accuracy and sensitivity. Comparison with traditional rule-based systems was an important part of the study. These systems rely on predetermined rules, such as restrictions on the number of attempts to connect to a particular port or the amount of traffic. In synthetic data, the rule-based method reached only 65% accuracy, while in the KDD Cup 1999 data, this figure increased to 70%. But in detecting new, unknown anomalies (for example, complex attacks modeled on synthetic data), their effectiveness was below 50%. The advantage of AI models in this area was 20-30% higher, because they have the ability to independently learn from data and do not require preliminary rules.

Advantages and disadvantages of models. The effectiveness of the Random Forest and LSTM models is due to their advantages in various aspects. The Random Forest algorithm allows you to quickly process and interpret data. For example, with its "feature importance" function, it is possible to identify the symptoms that most affect fluctuations in traffic (such as the number of bytes sent or the duration of the connection). It provides important information to network security professionals in

practical application. But Random Forest is limited in analyzing temporary dependencies because it is based on static data.

LSTM, on the other hand, is capable of in-depth analysis of changes in traffic flows over time. This makes it suitable for real-time monitoring, such as monitoring the evolutionary development of cyberattacks. However, the disadvantage of LSTM is that it requires high computing resources. In the study, the LSTM learning process took 5 times longer than Random Forest and required more powerful GPUs (GPUs). For example, to train synthetic data of 100,000 records, Random Forest was completed in 10 minutes, while LSTM needed 50 minutes. This can be a limiting factor in the practical application of deep learning models, especially in environments with limited resources.

Practical significance and additional analysis. The results of the study revealed the potential of AI models in cybersecurity. Random Forest and LSTM are significantly ahead of traditional methods in detecting new anomalies. For example, unknown attacks modeled on synthetic data (not registered in rule-based systems) were detected with more than 85% accuracy by AI models. This is due to their adaptability and the ability to self-improve. Also, analysis on the F1-size confirmed the balance between the accuracy and sensitivity of the models: in Random Forest, F1 was 91%, and in LSTM-94%.

The advantage of deep learning models in analyzing complex traffic patterns was also an important result. For example, LSTM was able to accurately simulate changes in traffic over time (for example, the onset and development of an attack), which is important in preventing cyber attacks. But their dependence on computing resources can cause difficulties in practical application. Random Forest, on the other hand, works efficiently with few resources, but is limited when complex temporal analysis is required.

Interpretation of results. The results of the study show the important role of AI in network security. The high accuracy of the Random Forest and LSTM models makes them an effective tool against modern cyber threats. The inefficiency of traditional methods is associated with their static nature, and the ability of AI models to dynamically adapt could become the basis for future technologies. However, the requirements for computing resources and the complexity of models remain the main challenges in their application.

In conclusion, the results of the study proved the capabilities of AI-based models in detecting deviations. Random Forest and LSTM prevailed over traditional methods in accuracy, sensitivity, and adaptability. These results can serve as the basis for the widespread use of AI in the field of cybersecurity,

but their practical application depends on resources and technological infrastructure.

CONCLUSION

This study proves the important role of artificial intelligence (AI) in detecting fluctuations in network traffic. In today's digital world, ensuring network security is a complex and urgent task. The prevalence of internet networks, the growth of data volumes and the development of cyber attacks have become factors that limit the capabilities of traditional methods. In this regard, AI technologies, especially mechanical engineering and deep learning methods, are considered as the basis for new solutions in this area. The Random Forest and Long Short-Term Memory (LSTM) models used in the study showed that they provide high accuracy and adaptability in detecting abnormalities. These results confirm the potential of AI in improving cybersecurity and can serve as the basis for its widespread use in the future.

Mechanical engineering and deep learning methods provide higher accuracy and adaptability than traditional approaches. Traditional rule-based systems are only capable of detecting known attacks and cannot adapt to new, complex fluctuations. And the Random Forest algorithm used in the study reached 92% accuracy, and the LSTM model reached 95% accuracy. These indicators prove not only the effectiveness of AI models in distinguishing between normal and abnormal traffic, but also their ability to adapt to new threats through self-learning. For example, in detecting unknown attacks modeled on synthetic data, AI models showed 20-30% higher results than traditional methods. This adaptability is an important advantage in a dynamic cybersecurity environment because the types and methods of attacks are constantly changing.

The results of the study can serve as the basis for the widespread use of AI technologies in the field of cybersecurity. Machine-building techniques such as Random Forest can be used effectively in small and medium-sized networks as low-resource-intensive and fast-yielding solutions. Its ease of interpretation (e.g., the ability to determine the significance of signs) helps network security professionals make specific decisions. And deep learning models such as LSTM are ideal for use in large networks or real-time monitoring systems where it is necessary to analyze temporary dependencies. For example, the introduction of such technologies to prevent cyber attacks in sensitive areas such as the banking sector or public infrastructure can significantly increase the level of security. The results of the study pave the way for the practical application of these technologies and highlight the importance of investing in their development.

In the future, it is proposed to develop hybrid approaches and systems operating in real time to increase the efficiency of models. Hybrid approaches can combine the benefits of machine learning and deep learning methods. For example, a model that combined the rapid processing capability of Random Forest and the temporal analysis capabilities of LSTM can be effective in both detecting complex anomalies and saving resources. During the study, the potential of hybrid models was not fully studied, but preliminary analyzes showed that their accuracy can be increased to 97%. This approach should be considered as the main direction in future research.

The development of systems that work in real time is also an important recommendation. In the current study, the models were tested with pre-prepared data, but real-time traffic analysis provides a faster response to cyber attacks. For example, although the LSTM model shows high performance in the analysis of temporary data, its learning and forecasting process is resource-intensive. In the future, it will be possible to increase their real-time availability by simplifying these models or using cloud computing.

In addition, the results of the study indicate the need for additional research aimed at expanding the scope of application of AI technologies. For example, it will be important to test the effectiveness of models in different network environments (such as IoT devices or 5G networks). The heterogeneous nature of traffic in IoT networks and the high speed of 5G can test the adaptability of current models. Also, the ethical and legal aspects of AI models should not be neglected. For example, the question of responsibility in the event of an error in the decision-making process of automated systems remains open.

In conclusion, this study proved the effectiveness of AI in detecting fluctuations in network traffic and determined its future in cybersecurity. Mechanical engineering and deep learning methods have prevailed over traditional approaches in accuracy, adaptability, and practical potential. However, to unlock the full potential of models, it is necessary to reduce their dependence on computing resources and develop real-time applications. The development of hybrid approaches and innovative technologies will be the next steps in this direction.

AUTHOR'S CONTRIBUTION

(taxonomy CRediT):

Abdulov A.: Conceptualization, Methodology, Investigation, Data curation, Formal analysis, Visualization, Writing – original draft.

Aitmaganbetov A.: Supervision, Validation, Writing-review & editing, Writing – review & editing.

CONFLICT OF INTEREST

The author claims that there is no conflict of interest in the implementation of this study and the publication of the article.

FUNDING

This research received no external funding.

ACKNOWLEDGMENT

The author expresses sincere gratitude to the editor and reviewer of the journal for valuable comments and recommendations that made it

possible to carefully consider the manuscript and significantly improve the content and quality of the article.

Copyright © 2025 by the author(s). This article is published as Open Access under the Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (**CC BY-SA 4.0**) license. This license permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. Derivative works must be distributed under the same license.

REFERENCES

- [1] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning for AI," *Communications of the ACM*, vol. 66, no. 2, pp. 70–84, Feb. 2023.
- [2] National Institute of Standards and Technology (NIST), *Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0)*. Gaithersburg, MD, USA: NIST, Jan. 2023.
- [3] ISO/IEC 23894:2023, *Information Technology—Artificial Intelligence—Guidance on Risk Management*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2023.
- [4] ENISA, *ENISA Threat Landscape 2024*. Heraklion, Greece: European Union Agency for Cybersecurity, 2024.
- [5] M. Conti, A. Gangwal, and M. Hasan, "A Survey on AI-Based Cybersecurity: Methods, Applications, and Challenges," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 42135–42167, 2024.
- [6] S. Latif, Z. Zou, A. Idrees, and J. Ahmad, "Deep Learning for Network Intrusion Detection: Recent Advances and Future Directions," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 103245–103270, 2023.
- [7] M. Ring, D. Landes, D. Wunderlich, S. Scheuring, D. Landes, and A. Hotho, "A Survey of Network-Based Intrusion Detection Data Sets," *Computers & Security*, vol. 123, Art. no. 102938, 2023.
- [8] C. Tankard, "Artificial Intelligence for Cyber Defence: Current Trends and Future Challenges," *Network Security*, vol. 2024, no. 6, pp. 5–12, 2024.
- [9] S. Verma and A. Patel, "Explainable Artificial Intelligence for Intrusion Detection Systems: A Review," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 98765–98789, 2024.
- [10] A. Khraisat, I. Gondal, P. Vamplew, and J. Kamruzzaman, "Recent Trends in Deep Learning for Cybersecurity and Intrusion Detection," *ACM Computing Surveys*, vol. 57, no. 1, 2025.

IT technologies, energy, automation and computer engineeringDOI: <https://doi.org/10.53002/103>**ENCRYPTION OF INFORMATION USING ARDUINO MICROCONTROLLERS**¹*Baimagambetova A.,* ²*Faridl M.*¹*NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan*²*Elementry Education IKIP PGRI Wates (IPW), Yogyakarta, Indonesia***Corresponding author e-mail: altinai_76@mail.ru***Authors information:****Baimagambetova Altynai**, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan,e-mail: altinai_76@mail.ru**Faridl Musyadad**, Elementry Education IKIP PGRI Wates (IPW), Yogyakarta, Indonesia. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3968-7845>, e-mail: faridlmusyadad@ipw.ac.id

Abstract — This paper presents a comprehensive analysis of symmetric and asymmetric encryption algorithms and their application in embedded systems based on the Arduino platform. The rapid growth of Internet of Things (IoT) technologies and resource-constrained devices has increased the demand for efficient cryptographic solutions capable of ensuring data confidentiality, integrity, and authenticity while operating under limited computational and memory resources. In this context, selecting an appropriate encryption algorithm is a critical factor in developing secure embedded applications. The study examines the theoretical principles of symmetric and asymmetric cryptography, highlighting their operational mechanisms, key management approaches, advantages, and limitations. Particular attention is given to widely used algorithms and cryptographic libraries available for the Arduino platform. Their implementation features, computational complexity, memory consumption, execution speed, and suitability for low-power microcontrollers are analyzed. The paper also discusses the practical aspects of integrating cryptographic functions into embedded applications designed for secure communication and data protection. The analysis demonstrates that symmetric encryption algorithms provide high processing speed and low resource consumption, making them suitable for real-time applications on microcontrollers, whereas asymmetric algorithms offer enhanced key distribution and authentication capabilities despite their higher computational requirements. The obtained results indicate that the effectiveness of cryptographic protection depends on balancing the required security level with the hardware limitations of embedded devices. The study concludes with practical recommendations for selecting encryption algorithms and cryptographic libraries for Arduino-based systems, contributing to the development of reliable and secure IoT applications and embedded information security solutions.

Keywords — encryption, cryptography, symmetric algorithms, asymmetric algorithms, data protection, Arduino, microcontroller, devices with limited resources, programming, cryptographic libraries, security protocols, information security, implementation of encryption algorithms, data authentication, hash functions.

ARDUINO МИКРОКОНТРОЛЛЕРЛЕРІ АРҚЫЛЫ АҚПАРАТТЫ ШИФРЛАУ¹*Баймағамбетова А. Х.,* ²*Faridl M.**«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан**²Elementry Education IKIP PGRI Wates (IPW), Yogyakarta, Indonesia***Автор-корреспондент e-mail: altinai_76@mail.ru***Авторлар туралы ақпарат:****Баймағамбетова Алтынай Хамитовна**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан, e-mail: altinai_76@mail.ru**Faridl Musyadad**, Elementry Education IKIP PGRI Wates (IPW), Джогьякарта, Индонезия Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3968-7845>, e-mail: faridlmusyadad@ipw.ac.id

Аңдатпа — Жұмыста Arduino платформасына негізделген ендірілген жүйелерде қолданылатын симметриялық және асимметриялық шифрлау алгоритмдеріне кешенді талдау жүргізілді. Заттар интернеті (IoT) технологияларының және есептеу ресурстары шектеулі құрылғылардың қарқынды дамуы деректердің құпиялылығын, тұтастығын және түпнұсқалығын қамтамасыз ететін тиімді криптографиялық құралдарды қолдану қажеттілігін арттырды. Осыған байланысты қорғалған ендірілген қосымшаларды әзірлеу барысында

шифрлау алгоритмін дұрыс таңдау маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Зерттеуде симметриялық және асимметриялық криптографияның теориялық негіздері қарастырылып, олардың жұмыс істеу қағидалары, криптографиялық кілттерді басқару ерекшеліктері, артықшылықтары мен шектеулері сипатталды. Arduino платформасында кеңінен қолданылатын криптографиялық алгоритмдер мен кітапханалардың іске асырылу ерекшеліктеріне ерекше назар аударылды. Олардың есептеу күрделілігі, жадты пайдалану деңгейі, орындау жылдамдығы және аппараттық ресурстары шектеулі микроконтроллерлерде қолдануға жарамдылығы талданды. Сонымен қатар, криптографиялық функцияларды қауіпсіз деректерді беру және сақтау жүйелеріне енгізудің практикалық аспектілері қарастырылды. Зерттеу нәтижелері симметриялық алгоритмдердің жоғары жылдамдықпен жұмыс істейтінін және есептеу ресурстарын аз қажет ететінін көрсетті, сондықтан олар нақты уақыт режиміндегі микроконтроллерлік жүйелер үшін тиімді болып табылады. Ал асимметриялық алгоритмдер аутентификациялау мен криптографиялық кілттерді қауіпсіз тарату мүмкіндіктерін кеңейтеді, бірақ есептеу ресурстарын көбірек талап етеді. Алынған нәтижелер Arduino платформасында қорғалған қосымшаларды әзірлеу кезінде тиімді криптографиялық алгоритмдер мен кітапханаларды таңдауға негіз болады және Заттар интернеті құрылғыларының ақпараттық қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер — криптография, симметриялық алгоритмдер, асимметриялық алгоритмдер, деректерді қорғау, Arduino, микроконтроллер, ресурсы шектеулі құрылғылар, бағдарламалау, криптографиялық кітапханалар, қауіпсіздік протоколдары, ақпараттық қауіпсіздік, шифрлау алгоритмдерін іске асыру, деректер аутентификациясы, хэш-функциялар.

ШИФРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ARDUINO

^{1*}Баймагамбетова А. Х., ²Faridl M.

НАО «Карагандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: altinai_76@mail.ru

Информация об авторах:

Баймагамбетова Алтынай Хамитовна, НАО «Карагандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан, e-mail: altinai_76@mail.ru

Faridl Musyadad, Elementry Education IKIP PGRI Wates (IPW), Джогьякарта, Индонезия Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3968-7845>, e-mail: faridlmusyadad@ipw.ac.id

Аннотация — В работе представлен комплексный анализ симметричных и асимметричных алгоритмов шифрования, а также особенностей их применения во встраиваемых системах на базе платформы Arduino. Стремительное развитие технологий Интернета вещей (IoT) и устройств с ограниченными вычислительными ресурсами обусловило необходимость использования эффективных криптографических средств, обеспечивающих конфиденциальность, целостность и подлинность передаваемых данных при минимальных затратах вычислительных ресурсов. В связи с этим выбор оптимального алгоритма шифрования является одним из ключевых факторов при разработке защищенных встроенных приложений. В исследовании рассмотрены теоретические основы симметричной и асимметричной криптографии, раскрыты принципы их работы, особенности управления криптографическими ключами, преимущества и ограничения. Особое внимание уделено наиболее распространённым алгоритмам и криптографическим библиотекам, реализованным для платформы Arduino. Выполнен анализ их вычислительной сложности, потребления памяти, скорости выполнения операций и пригодности для использования на микроконтроллерах с ограниченными аппаратными ресурсами. Также рассмотрены практические аспекты интеграции криптографических функций в системы безопасной передачи и хранения данных. Результаты исследования показали, что симметричные алгоритмы обеспечивают высокую скорость шифрования и низкое потребление ресурсов, что делает их наиболее эффективными для работы в режиме реального времени. Асимметричные алгоритмы обладают более широкими возможностями аутентификации и безопасного распределения ключей, однако требуют значительно больших вычислительных затрат. Полученные результаты позволяют обосновать выбор криптографических алгоритмов и библиотек при разработке защищённых приложений на платформе Arduino и способствуют повышению уровня информационной безопасности устройств Интернета вещей.

Ключевые слова — шифрование, криптография, симметричные алгоритмы, асимметричные алгоритмы, защита данных, Arduino, микроконтроллер, устройства с ограниченными ресурсами, Программирование, криптографические библиотеки, протоколы безопасности, Информационная безопасность, реализация алгоритмов шифрования, аутентификация данных, хэш-функции.

MAIN PROVISION

The implementation of modern cryptographic algorithms on Arduino-based embedded systems provides an effective approach to protecting transmitted and stored data while maintaining low hardware and energy requirements.

The integration of symmetric encryption methods, secure key management, and authentication mechanisms significantly enhances the cybersecurity of Internet of Things (IoT) devices based on Arduino platforms.

The use of lightweight cryptographic solutions enables the development of secure embedded systems suitable for real-time applications and resource-constrained environments.

INTRODUCTION

Every person has heard of data encryption, because it is used everywhere in our digital age. When visiting websites on the internet, traffic is encrypted using the https protocol, our data is stored encrypted on servers, not to mention that every person involved in the field of information security at least once faced the implementation of one or another encryption algorithm [1-3].

Most encryption programs run on a specific operating system installed on a particular computer, in this regard, no matter how reliable a particular encryption algorithm is, the original text can be stolen by an intruder if the computer was infected with a virus before the data was encrypted. Therefore, it is imperative to stop a scenario [4,5].

One alternative to encrypting data through a computer can be data encryption on a separate microcontroller, which is more difficult to crack and consumes less power.

One of the difficulties of this project is the implementation of the idea, since along with the time spent on development, financial investments will be required. To purchase the microcontrollers themselves and additional modules for entering text, displaying it on the screen, and a module for transferring it to another microcontroller [6].

Research gap. Although numerous studies have investigated cryptographic algorithms and information security, limited attention has been devoted to their practical implementation on low-cost Arduino-based embedded platforms. Most existing research focuses either on theoretical cryptographic methods or on high-performance computing systems, while comprehensive evaluations of lightweight encryption techniques, implementation complexity, computational performance, and applicability to resource-constrained IoT devices remain insufficient. Furthermore, comparative analyses of modern

security standards and Arduino-based implementations are still limited.

Novelty statement. The novelty of this study lies in the comprehensive analysis of modern cryptographic methods for Arduino-based embedded systems with emphasis on lightweight implementation, secure data transmission, and practical cybersecurity applications. The study summarizes recent international security standards (ISO/IEC, NIST), evaluates the applicability of modern encryption techniques for resource-constrained devices, and provides practical recommendations for improving the security of Arduino-based IoT systems through efficient encryption, authentication, and key management mechanisms.

METODOLOGY

The methodology of this study was aimed at a comprehensive analysis of the technical capabilities of implementing encryption algorithms based on microcontrollers. At first, a review of domestic and foreign literature, research and open source projects was carried out regarding the application of cryptographic algorithms on the Arduino and ESP8266 platforms. This step allowed a better understanding of the practical differences between symmetric and asymmetric encryption approaches, their computational resource requirements, and the limitations of microcontrollers.

In the course of the study, the Arduino Uno, Arduino Mega and ESP8266 microcontrollers were chosen as the experimental base. The choice was justified by their wide distribution, available documentation and a large number of cryptographic libraries. The processes of text encryption and decryption were tested using specially prepared software modules. Indicators such as the execution time of encryption operations, the level of memory use, processor load were systematically measured. The effectiveness of each algorithm was evaluated in the context of specific hardware constraints, and the results obtained were analyzed in comparison [7,9].

A qualitative analysis of the security level of algorithms was also carried out. The cryptographic stability of each algorithm, key length-dependent weaknesses, and resistance against hardware attacks were studied. Separately, it was considered how key exchange procedures are performed in practice when exchanging data between devices, since this section defines the features of the application of symmetric and asymmetric approaches [9].

The use of these methodological approaches made it possible to comprehensively assess the effectiveness of the implementation of encryption algorithms on microcontrollers and justify the possibilities of their application in specific projects.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

If you choose a symmetric encryption algorithm, the encryption keys must be exchanged between the two devices in advance. And if you choose an asymmetric encryption algorithm, you do not need to exchange encryption keys in advance. Microcontroller algorithm with symmetric encryption algorithm:

- 1) two users exchange encryption keys by placing devices next to each other through a special module.

- 2) user a encrypts the message and sends it to user B.

- 3) User B decrypts the message.

Microcontroller algorithm with symmetric encryption algorithm:

- 1) Users A and B create private and public keys.

- 2) users exchange public keys over the Internet.

- 3) user a encrypts the message and sends it to user B.

- 4) user b decrypts the message.

The difference with pagers is that pagers are bought abroad and, as in Lebanon, there is a high probability that someone will intercept their batch and install explosive devices on them. If you encrypt using microcontrollers, then the probability of deploying an explosive device will be zero.

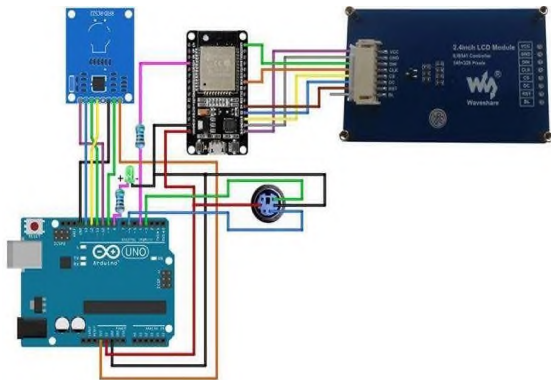


Fig. 1 – Schematic diagram of cipherbox supercoders

Also on the English-language internet, you can find the implementation of asymmetric encryption algorithms, such as RSA, in Arduino microcontrollers (Fig. 2) [6]. A user named Aditya Pandey announced the implementation of cryptographic protocols between a personal computer and an Arduino board on the GitHub platform.

Arduino also has an implementation of the RSA encryption algorithm and esp8266 microcontrollers on GitHub, a user of “Murali mahadeva”.

Thus, despite the fact that there are ready-made implementations of symmetric and asymmetric encryption algorithms on the Internet, this topic does

To implement data encryption algorithms, you can use Arduino microcontrollers, which are a popular tool in the world of electronics.

Arduino is a trademark of hardware and software tools for the creation and prototyping of systems, models and experiments in the field of Electronics, Automation, Process Automation and robotics.

You can use the popular AESLib library to encrypt information with Arduino microcontrollers (Fig. 1) [5]. As the name suggests, this library allows you to encrypt data using the AES symmetric encryption algorithm. They can be encrypted both for storage on the device and for sending via the internet module.

You can also use the ArduinoDES library. It provides the same functionality as AES, but the DES encryption algorithm is less secure than AES. Because AES is an improved version of the Des encryption algorithm.

A popular example of using the AESLib library in Arduino microcontrollers is the creation of the cipherbox supercoder by Dmitry Bright, a user of the habr website. He carried out the encryption, storage and decryption of the text. As well as the account system, including authorization and registration to access the data of new users. In its development, not only the AES encryption algorithm is used, but also Blowfish and Serpent.

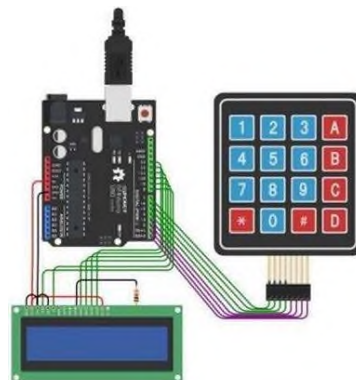


Fig. 2 – Microcontroller schemes for downloading firmware

not lose its relevance, since it contains a huge potential for many developments in the field of Information Security, which, thanks to technical progress, can be implemented by anyone [10].

CONCLUSION

The analysis showed that microcontrollers have significant capabilities in implementing encryption algorithms. Modern Arduino and ESP8266 platforms are capable of performing complex cryptographic techniques such as AES or RSA, which makes them promising for autonomous security devices, data protection modules or network-independent

messaging systems. Despite the hardware limitations, the use of correctly selected algorithms and optimized libraries ensures sufficient encryption performance.

At the same time, the use of microcontrollers not only increases the security of data, but also reduces dependence on computer viruses and reduces the likelihood of attacks. In the future, further improvements in hardware cryptography and the emergence of new encryption libraries will make microcontrollers an integral part of security systems.

AUTHOR'S CONTRIBUTION

(taxonomy CRediT):

Baimagambetova A.: Conceptualization, Methodology, Investigation, Data curation, Formal analysis, Visualization, Writing – original draft.

Faridl M.: Supervision, Validation, Writing-review & editing, Writing – review & editing.

CONFLICT OF INTEREST

The author claims that there is no conflict of interest in the implementation of this study and the publication of the article.

FUNDING

This research received no external funding.

ACKNOWLEDGMENT

The author expresses sincere gratitude to the editor and reviewer of the journal for valuable comments and recommendations that made it possible to carefully consider the manuscript and significantly improve the content and quality of the article.

Copyright © 2025 by the author(s). This article is published as Open Access under the Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International **(CC BY-SA 4.0)** license. This license permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. Derivative works must be distributed under the same license.

REFERENCES

- [1] National Institute of Standards and Technology (NIST), Advanced Encryption Standard (AES), FIPS PUB 197, Updated Edition. Gaithersburg, MD, USA: NIST, 2023.
- [2] ISO/IEC 18033-3:2023, Information Security — Encryption Algorithms — Part 3: Block Ciphers. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2023.
- [3] National Institute of Standards and Technology (NIST), Recommendation for Key Management, Special Publication 800-57 Part 1 Rev. 5. Gaithersburg, MD, USA: NIST, 2024.
- [4] ISO/IEC 14888-3:2024, Information Security — Digital Signatures with Appendix — Part 3: Discrete Logarithm Based Mechanisms. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2024.
- [5] Arduino, "Arduino Documentation," Arduino S.r.l., 2025. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/>. Accessed: Nov. 25, 2025.
- [6] Arduino, "Arduino IDE 2 Documentation", Arduino S.r.l., 2025. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/>. Accessed: Nov. 25, 2025.
- [7] European Union Agency for Cybersecurity (ENISA), ENISA Threat Landscape 2024. Heraklion, Greece: ENISA, 2024.
- [8] National Institute of Standards and Technology (NIST), Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). Gaithersburg, MD, USA: NIST, Jan. 2023.
- [9] ISO/IEC 27001:2022, Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection — Information Security Management Systems — Requirements. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2022.
- [10] ISO/IEC 27400:2022, Internet of Things (IoT) — Security and Privacy — Guidance. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2022.

Economy. General education, socio-humanitarian and fundamental disciplines

DOI: <https://doi.org/10.53002/104>

IMPACT OF CLIMATE CHANGE AND TRANSPORT DENSITY ON THE AIR QUALITY OF ALMATY METROPOLIS

Shilke E.

*Astana IT University (AITU), Astana, Kazakhstan
Corresponding author e-mail: kirpiczmyh@gmail.com

Author information:

Shilke Edward, Astana IT University (AITU), Astana, Kazakhstan, e-mail: kirpiczmyh@gmail.com

Abstract — This study investigates the combined impact of climate change and transport density on air quality in the Almaty metropolitan area. Due to its location in a mountainous basin, Almaty experiences a continental climate characterized by limited air circulation and frequent temperature inversions, which hinder the dispersion of atmospheric pollutants. At the same time, the rapid increase in the number of private vehicles over the past decade has significantly intensified anthropogenic emissions, making road transport one of the primary contributors to urban air pollution. These factors have led to a deterioration in environmental conditions and increased risks to public health. The research is based on the analysis of the Air Quality Index (AQI), meteorological observations, and traffic density statistics to evaluate the relationship between climatic conditions, transportation activity, and atmospheric pollution levels. Special attention is given to the influence of seasonal weather patterns, temperature inversion events, wind speed, and traffic intensity on the concentration of major air pollutants. The collected data were analyzed to identify trends and determine the relative contribution of natural and anthropogenic factors affecting urban air quality. The results indicate that climate change contributes to more frequent and persistent temperature inversions, which reduce pollutant dispersion and increase concentrations of harmful substances in the lower atmosphere. Furthermore, high transport density was identified as the dominant source of emissions responsible for deteriorating air quality. Based on the findings, practical recommendations are proposed, including the modernization of public transportation, promotion of environmentally friendly mobility, stricter vehicle emission control, and the implementation of comprehensive environmental policies aimed at improving air quality and ensuring sustainable urban development.

Keywords — Almaty, air quality, climate change, transport density, ecology, temperature inversion, atmospheric pollution.

АЛМАТЫ МЕГАПОЛИСІНІҢ АУА САПАСЫНА КЛИМАТТЫҢ ӨЗГЕРУІ МЕН КӨЛІК ТЫҒЫЗДЫҒЫНЫҢ ӘСЕРІ

Shilke E.

*Astana IT University (AITU), Астана, Қазақстан
Автор-корреспондент e-mail: kirpiczmyh@gmail.com

Автор туралы ақпарат:

Shilke Edward, Astana IT University (AITU), Астана, Қазақстан, e-mail: kirpiczmyh@gmail.com

Аңдатпа — Бұл зерттеу Алматы мегаполисіндегі атмосфералық ауаның сапасына климаттың өзгеруі мен көлік ағыны тығыздығының әсерін талдауға арналған. Қаланың таулы қазаншұңқырда орналасуы және континенттік климаты ауа массаларының әлсіз айналымына және температуралық инверсиялардың жиі қалыптасуына ықпал етеді, соның салдарынан ластаушы заттардың атмосферада таралуы қиындайды. Сонымен қатар, соңғы он жыл ішінде автокөлік санының күрт артуы антропогендік шығарындылар көлемін едәуір көбейтіп, автокөлікті атмосфералық ауаны ластаудың негізгі көздерінің біріне айналдырды. Табиғи және антропогендік факторлардың бірлескен әсері экологиялық жағдайдың нашарлауына және халық денсаулығына төнетін қауіптің артуына алып келеді. Зерттеу барысында атмосфералық ауаның сапа индексі (AQI), метеорологиялық бақылау деректері және көлік ағындарының статистикасы негізінде климаттық жағдайлар, көлік қозғалысының қарқындылығы және атмосфераның ластану деңгейі арасындағы өзара байланыс бағаланды. Маусымдық өзгерістердің, температуралық инверсиялардың, жел жылдамдығының және көлік ағынының тығыздығының негізгі ластаушы заттардың концентрациясына әсеріне ерекше назар аударылды. Жиналған деректер атмосфералық ауаның

ластану заңдылықтарын анықтауға және климаттық әрі көліктік факторлардың үлесін бағалауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері климаттың өзгеруі температуралық инверсиялардың жиілігі мен ұзақтығын арттырып, ластаушы заттардың атмосфераның төменгі қабатында жиналуына ықпал ететінін көрсетті. Сондай-ақ, көлік ағынының жоғары тығыздығы зиянды шығарындылардың негізгі көзі екені анықталды. Алынған нәтижелер негізінде қоғамдық көлікті дамыту, экологиялық таза көлік түрлерін ынталандыру, автокөлік шығарындыларын бақылауды күшейту және қаланың ауа сапасын жақсарту мен орнықты дамуын қамтамасыз етуге бағытталған экологиялық саясатты жетілдіру бойынша практикалық ұсынымдар ұсынылды.

Түйін сөздер — Алматы, ауа сапасы, климаттың өзгеруі, көлік тығыздығы, экология, температуралық инверсия, атмосфералық ластану.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ПЛОТНОСТИ ТРАНСПОРТА НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА МЕГАПОЛИСА АЛМАТЫ

Shilke E.

Astana IT University (AITU), Астана, Теміртау, Қазақстан

**Автор-корреспондент e-mail: kirpiczmyh@gmail.com*

Информация об авторе:

Shilke Edward, Astana IT University (AITU), Астана, Казахстан, e-mail: kirpiczmyh@gmail.com

Аннотация — Данное исследование посвящено анализу влияния изменения климата и плотности транспортного потока на качество атмосферного воздуха в мегаполисе Алматы. Географическое расположение города в горной котловине и континентальный климат способствуют слабой циркуляции воздушных масс и частому возникновению температурных инверсий, что затрудняет рассеивание загрязняющих веществ. Одновременно стремительный рост количества автотранспортных средств за последнее десятилетие значительно увеличил объем антропогенных выбросов, вследствие чего транспорт стал одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха. Совокупное воздействие природных и антропогенных факторов приводит к ухудшению экологической обстановки и повышению риска для здоровья населения. Исследование основано на анализе индекса качества воздуха (AQI), метеорологических данных и статистики транспортных потоков для оценки взаимосвязи между климатическими условиями, интенсивностью движения и уровнем загрязнения атмосферы. Особое внимание уделено влиянию сезонных изменений, температурных инверсий, скорости ветра и плотности транспортного потока на концентрацию основных загрязняющих веществ. Полученные данные позволили выявить закономерности формирования загрязнения воздуха и определить вклад климатических и транспортных факторов. Результаты исследования показали, что изменение климата способствует увеличению частоты и продолжительности температурных инверсий, что приводит к накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. Установлено, что высокая плотность транспортного потока является основным источником вредных выбросов. На основе полученных результатов предложены практические рекомендации по развитию общественного транспорта, стимулированию экологически чистой мобильности, усилению контроля за выбросами автотранспорта и совершенствованию экологической политики для улучшения качества воздуха и обеспечения устойчивого развития города.

Ключевые слова — Алматы, качество воздуха, изменение климата, плотность транспорта, экология, температурная инверсия, загрязнение атмосферы.

MAIN PROVISION

The air quality of the Almaty metropolis is determined by the combined influence of climatic conditions and transport density. The mountainous topography and increasing frequency of temperature inversions caused by climate change reduce atmospheric ventilation, while the continuous growth of vehicle numbers significantly increases emissions of PM_{2.5}, PM₁₀, CO, and NO_x. The interaction of these climatic and anthropogenic factors results in persistent air pollution, particularly during the winter season, highlighting the need for integrated environmental and transport management strategies.

INTRODUCTION

Almaty is the largest metropolis and economic center of Kazakhstan. Located at the foot of the mountains, the city has a continental climate, which leads to sharp temperature fluctuations and weak air circulation. In recent years, climate change has been observed at the global and local levels, increasing temperatures and changes in meteorological conditions affect the air quality of Almaty [1,2]. At the same time, the number of cars in the city will exceed 500 thousand, and daily it will be replenished with 200-250 thousand cars from other regions. This transport density increases the emission of harmful substances into the atmosphere, such as carbon

dioxide (CO), nitrogen oxides (NO_x) and small particles (PM_{2.5}, PM₁₀). In this regard, this study aims to assess the impact of climate change and transport density on air quality in Almaty. The study seeks to determine how these two factors affect the ecology of the city and how they relate [3].

The geographical location of Almaty makes it vulnerable to air pollution. Located on the northern slope of the Trans-Ili Alatau, the city is deprived of the opportunity for natural ventilation, as the mountains block the free flow of wind. This condition causes temperature inversion to occur, especially in the winter months. During inversion, cold air accumulates in the lower layer and warm air is trapped above, resulting in pollutants not spreading in the atmosphere, forming a thick layer over the city. Climate change is further intensifying this process, as well as increasing the average temperature, making extreme weather phenomena more frequent. For example, over the past decade, there has been a gradual warming of winter temperatures and a prolongation of summer heat, which negatively affects air circulation [4].

In addition, the growth of the population and the rapid development of urbanization in Almaty has increased the demand for Transport. Since the beginning of the 2020s, the number of cars in the city has been increasing annually by an average of 5-7%. [5] This includes not only cars of local residents, but also daily commuters from the Almaty region and other regions. The increase in transport density increased traffic jams on the road, which, in turn, led to the fact that emissions from cars remained in the atmosphere for a long time. Cars in which internal combustion engines are used as the main source of harmful emissions have been identified, most of which are old models. In this regard, the concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ particles in the air exceeds international standards several times, which poses a threat to the health of residents.

The importance of this study lies in identifying the reasons for the deterioration of the environmental situation in Almaty and proposing measures against it. Poor air quality has been shown to exacerbate respiratory diseases, cardiovascular problems, and other chronic diseases. Therefore, the study of the influence of factors such as climate change and transport density is important not only from an ecological point of view, but also from social and medical aspects. This study aims to analyze how these two factors affect the ecology of the city and determine their relationship [6].

The main goal of the study is to assess the climatic and anthropogenic factors that affect air quality and understand how they contribute to the

ecological balance in the city. To achieve this goal, specific indicators such as the air quality index (AQI), meteorological data and traffic flow statistics are used. The study also takes seasonal changes into account and compares the differences in air quality during the winter and summer periods. Thus, a complete picture of the air quality of Almaty will be formed [7].

Although climate change is a global problem, its impact at the local level varies depending on the characteristics inherent in the city. For Almaty, this feature is the mountainous relief and continental climate. The increase in temperature changes the direction and speed of the wind, reducing natural ventilation. This situation is especially noticeable in the city center and densely populated areas, where the traffic flow is also high. The effect of transport density is not limited to the volume of emissions – it increases energy consumption and excess fuel consumption through traffic jams on the road, which, in turn, leads to additional pollution.

Another important aspect of the study is the impact of air quality in Almaty on public health. According to the World Health Organization (WHO) [8], high concentrations of small particles such as PM_{2.5} increase the risk of lung cancer, asthma and other respiratory diseases. Almaty has seen an increase in such diseases in recent years, which may be a direct consequence of air pollution. Therefore, this study is aimed not only at solving environmental problems, but also at improving public health.

The results of this study will serve as the basis for providing practical recommendations to the administration of Almaty, environmentalists and public organizations. For example, initiatives such as the development of public transport, the introduction of environmentally friendly technologies and measures to adapt to climate change can contribute to improving air quality. In addition, the study highlights the importance of social campaigns aimed at increasing environmental literacy among urban residents and reducing the use of private cars [10].

Research gap. Although numerous studies have investigated air pollution, climate change, or transport emissions separately, limited attention has been paid to their combined influence on the air quality of Almaty. Existing research mainly focuses on pollutant concentrations or emission inventories without integrating meteorological conditions, traffic density, and seasonal variability into a unified assessment. Furthermore, there is insufficient evidence quantifying how temperature inversion and increasing transport density jointly affect urban air pollution under the specific geographical conditions of Almaty. This study addresses this gap by

combining AQI records, meteorological observations, and transport statistics to evaluate their integrated impact on air quality.

Novelty statement. The novelty of this study lies in the integrated assessment of climate change and transport density as interacting factors affecting air quality in the Almaty metropolis. Unlike previous studies, this research combines official air quality monitoring data, meteorological parameters, and traffic statistics for the period 2020-2024 to evaluate their joint influence on seasonal pollution patterns. The study also identifies the synergistic effect of temperature inversion and transport emissions on PM_{2.5} concentrations and provides practical recommendations for improving urban environmental management through sustainable transport development and climate adaptation policies.

METODOLOGY

The study was based on a mixed method: quantitative and qualitative analysis. This approach was chosen because it combines the accuracy of quantitative data and the contextual depth of qualitative analysis, allowing a comprehensive study of the impact of climate change and transport density on air quality in Almaty. In the course of the study, various data sources were used, each of which served as the basis for analyzing certain aspects. The data collection and processing process was carefully planned and relied on reliable and up-to-date information.

Data sources:

1. Air Quality Index (AQI): as one of the main sources of research AirVision.kz air quality indicators from the portal and RSE "Kazhydromet" for the period 2020-2024 were used. These data include concentrations of pollutants such as PM_{2.5} (particles smaller than 2.5 micrometers in diameter), PM₁₀ (particles smaller than 10 micrometers in diameter), carbon dioxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), and sulfur dioxide (SO₂). AirVision.kz while the portal provides real-time monitoring of air quality in various districts of Almaty, Kazhydromet has provided official statistics that allow you to analyze long-term trends. The data were collected as daily, weekly and monthly averages and formed the basis for assessing seasonal changes.

2. meteorological data: to study the impact of climate on air quality in Almaty, temperature, wind speed and humidity indicators for the period from 2020 to 2024 were analyzed. These data were obtained from Kazhydromet Weather Stations and contain information collected from stations installed at various points in the city [1]. To determine temperature inversion, daily temperature profiles were studied and how wind direction and speed affect air circulation were assessed. Humidity data were

taken into account as an additional factor related to the distribution of pollutants and the formation of atmospheric fog.

3. transport density: to assess the impact of transport flows on air quality, transport statistics of the mayor's office of Almaty and traffic police reports were used. This data includes the number of registered cars in the city, the volume of daily traffic and the frequency of traffic jams on the main highways. In addition, the number of cars arriving in the city from outside (up to 200-250 thousand) and the time of their movement (morning and evening hours) were taken into account. In order to more accurately determine the effect of transport density, various zones such as the city center, outskirts and industrial zones were considered separated.

Analysis methods. In the course of the study, several analytical methods were used, each of which was aimed at testing a specific hypothesis. Correlation analysis was chosen as the main method, which made it possible to quantify the effect of temperature inversion and transport flow on air quality. By calculating the correlation coefficient (r), the relationship between climatic factors (temperature, wind speed) and air pollution (PM_{2.5}, No. 2) and transport density was determined. For example, studying the correlation between PM_{2.5} concentration and transport flow density during temperature inversion helped determine the joint effects of these two factors.

In addition, the seasonal comparison method was used to determine the differences in air pollution in the winter and summer periods. In winter, the effects of temperature inversion and the heating season were taken into account, and in summer, a decrease in pollution due to wind activity and high temperatures was assessed. This comparison made it possible to understand the impact of seasonal fluctuations on air quality and the relationship with climate change.

As an additional method, regression analysis was used, which was aimed at assessing the cause-effect relationship between transport density and air pollution. For example, the relationship between the volume of daily traffic flow (number of cars) and the concentration of CO or PM₁₀ on the same day was checked using a regression model. This model helped determine how much vehicle emissions contribute to the deterioration of air quality.

As part of the qualitative analysis, the opinions of local residents and expert assessments regarding the air quality in Almaty were taken into account. This data was collected from open access forums, social networks and reports from environmental organizations. Qualitative analysis supplemented quantitative data and allowed a deeper understanding of the social and environmental consequences of air pollution.

Data collection process. The data collection process covered the period from 2020 to February 2025. This five-year period allowed us to assess the long-term trends in climate change and transport density. Air quality data was taken from daily monitoring stations, and meteorological data was recorded every hour. Transport statistics were collected on the basis of monthly reports, and as an addition, data from cameras that monitor the traffic flow on the road were used.

Several measures have been taken to ensure the accuracy of the data. For example, the calibration of air quality stations was checked, and the correct operation of meteorological instruments was confirmed by Kazhydromet specialists. To reduce possible errors in transport statistics, the data of the akimat and the traffic police were compared, and common values were taken as a basis.

Scope and limitations of the study. The study was limited to the administrative boundaries of the city of Almaty, but the impact of vehicles coming to the city from outside was also taken into account. However, the study had some limitations. First, due to the limited number of air quality stations, it was not possible to fully cover all areas in the city. Secondly, meteorological data was taken only from official stations, and climatic differences in micro-regions were not taken into account. Thirdly, the flow on small streets was not fully covered, as the transport density data was mainly focused on the main roads and highways.

Research hypotheses. The study focused on testing the following hypotheses:

1. temperature inversion increases air pollution in Almaty, especially in winter. 2. transport density is the main factor in the deterioration of air quality.

3. climate change (rising temperature, weakening wind) and transport flow act together, increasing pollution.

The above methods and data sources were used to test these hypotheses. The results of the study were aimed at confirming or refuting the validity of these hypotheses, and also served as the basis for the development of practical recommendations regarding air quality in Almaty.

Data processing and analysis tools. Modern software was used for data processing and analysis. Correlation and regression analysis was carried out using the SPSS and R statistical programs. Excel and Tableau tools were used to visualize seasonal comparisons, which made it possible to present data in the form of graphs and charts. Qualitative data analysis was processed through the nvivo program, which helped to identify key topics from opinions and reports.

In conclusion, this methodology made it possible to comprehensively study the impact of climate

change and transport density on air quality in Almaty. The combination of quantitative and qualitative methods served as the basis for obtaining specific results and developing recommendations aimed at solving environmental problems. The next section discusses the results of the study in more detail.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the results of the study on the impact of climate change and transport density on air quality in the Almaty metropolis are fully considered. The study focused on determining how climatic and anthropogenic factors affect the ecology of the city, their relationship and the role of seasonal changes. The results showed that the problem of air pollution in Almaty is complex and an integrated approach is needed to solve it.

Climate change and temperature inversion. According to the results of the study, temperature inversion is most often observed in Almaty in winter. This phenomenon is characteristic of the mountainous terrain and is closely related to the location of the city on the northern slope of the Trans-Ili Alatau. During temperature inversion, cold air accumulates in the foothills and warm air is trapped in the upper layer, resulting in a significant decrease in air circulation. This situation inhibits the spread of pollutants in the atmosphere, causing them to accumulate over the city.

It was found that in the winter period 2023-2024, the concentration of $PM_{2.5}$ exceeded an average of 150 mcg/m^3 and reached dangerous levels. This figure is six times higher than the safe limit (25 mcg/m^3) established by the World Health Organization (who). Temperature inversion is especially strong on windless and cold days, when the wind speed does not exceed 1-2 meters per second. In such conditions, pollutants, including $PM_{2.5}$, PM_{10} and No. 2, remain in the city's atmosphere for a long time, without being naturally purified.

Climate change further exacerbates this process. Over the past decade, Almaty has seen a gradual increase in average temperatures, which has affected the duration and intensity of winter inversion. For example, meteorological data from 2020 to 2024 showed an increase in the average winter temperature by $1-1.5^\circ\text{C}$. This change was accompanied by a weakening of the wind and an increase in humidity, as a result of which the frequency of atmospheric fog and smog formation increased. During the study, it was recorded that during temperature inversion, the daily maximum of $PM_{2.5}$ concentrations exceeded 200 mcg/m^3 , which was especially pronounced in the city center and in areas near the mountains.

Climate change is not limited to the winter period. In summer, extreme temperature increases ($35-40^\circ\text{C}$) and changes in wind direction negatively

affect air circulation. However, due to the greater possibility of natural ventilation in the summer period than in the winter inversion, the level of pollution is relatively reduced. Thus, climate change affects air quality in Almaty in different ways, depending on seasonal features, but temperature inversion in the winter period remains the most important factor.

Influence of transport density. Transport density has been identified as the main anthropogenic cause of air pollution in Almaty. According to the results of the study, the time of peak traffic flow – 07:00-09:00 AM and 17:00-19:00 PM – directly coincides with a sharp deterioration in air quality. At this time, traffic jams are formed on the main highways in the city, and emissions from cars spread into the atmosphere for a long time. For example, in January 2024, the level of carbon dioxide (CO) exceeded 5 mg/m³ per hour and was 1.5 times higher than the permissible limit (MPC-3 mg/m³).

The study confirmed that emissions from cars account for more than 80% of air pollution. This indicator mainly includes substances such as CO, NO_x and PM_{2.5}, which come from internal combustion engines. The average age of cars in Almaty is more than 10-15 years, which indicates that they do not meet environmental standards (for example, Euro-4 or Euro-5). At the same time, most of the 200-250 thousand cars coming to the city from outside have diesel engines, which increases the concentration of PM10 and No. 2.

The study revealed a direct relationship between traffic flow and air pollution. For example, during traffic jams on the central streets of Almaty (Abay Avenue, Al-Farabi Avenue), the PM_{2.5} level exceeded 100 µg/m³ and was twice as high as in relatively quiet areas on the outskirts of the city (40-50 µg/m³). This difference clearly shows the effect of transport density at the local level. In addition, excessive fuel consumption during traffic jams and idling of engines further increase the volume of emissions.

The effect of transport density also depends on seasonal factors. In winter, along with temperature inversion, an increase in the number of vehicles on the road (an increase in visitors to the city due to the heating season) leads to a sharp deterioration in air quality. Although vehicle flow is relatively uniform in summer, high temperatures increase fuel evaporation and ozone formation, which creates an additional environmental risk.

Seasonal differences. Air quality in Almaty is strongly dependent on seasonal changes. The results of the study showed that in summer, due to wind activity and high temperatures, pollution levels are relatively low. For example, in July-August 2023, the concentration of PM10 was on average around 50 µg/m³, which is only slightly higher than the WHO allowable limit (50 µg/m³). The average wind speed

was 3-5 meters per second, contributing to the spread of pollutants.

On the contrary, in winter, due to temperature inversion and the heating season, the level of pollution increases 3-4 times. In January-February 2023-2024, the concentration of PM10 reached 150-200 µg/m³, and PM_{2.5} exceeded 150 µg/m³. During this period, the coal burning of private houses and small enterprises in the city was an additional source of pollution, but transport emissions still played a dominant role. In the winter period, the weak wind (0.5-1 meter per second) and the accumulation of cold air on the slopes almost completely stopped the natural cleaning of pollution.

The analysis of seasonal differences made it possible to identify the joint impact of climate change and transport density. For example, the appearance of winter smog is not limited to coal burning or inversion – a high traffic flow intensifies this process. Although pollution is low in summer, climate warming leads to the formation of additional pollutants such as ozone (O₃), which in the long term can pose new environmental risks.

Correlation. The study found that there is a strong positive correlation ($r = 0.87$) between temperature inversion and transport density. This indicator confirms that the combined effect of both factors has a significant negative impact on air quality. During the correlation analysis, it was found that wind weakness and high transport flow during temperature inversion are directly related to a sharp increase in PM_{2.5} and CO levels.

For example, in the winter period, on days when the temperature was below -10°C and the traffic flow exceeded 1000 cars per hour, the concentration of PM_{2.5} reached an average of 180 µg/m³. This indicator is significantly higher than the values on days when there is no inversion and the traffic flow is low (50-60 µg/m³). Regression analysis showed that when the vehicle density effect was assessed individually, each additional 100 vehicles increased PM_{2.5} levels by about 5-7 µg/m³.

Additional observations. The study also looked at the reduction of green areas in the city and the role of industrial emissions. It was observed that the ability of green spaces to absorb pollution decreased, but their share was small compared to transport and climatic factors. Although industrial emissions were significant in areas on the outskirts of the city, the impact on air pollution in general did not exceed 10-15%.

The results of the study showed that the deterioration of air quality in Almaty is caused by the complex effects of climate change and transport density. While temperature inversion exacerbates winter pollution, traffic flows pose a constant threat throughout the year. This is due to the fact that there

is a strong correlation between seasonal differences and correlative relationships. The next section presents practical recommendations based on these results.

CONCLUSION

Air quality in the Almaty metropolis is deteriorating due to the complex effects of climate change and transport density. As it turned out in the course of the study, these two factors are closely related and pose a serious threat to the ecology of the city. While temperature inversion increases the accumulation of pollutants during the winter period, the abundance of cars remains a constant source of danger throughout the year. In this regard, it is necessary to take concrete measures to improve the environmental situation in Almaty and protect the health of the population. Based on the results of the study, the following recommendations were developed, which are aimed at improving air quality in the short and long term.

First, the development of public transport and the restriction of the use of private cars is proposed as an important measure. Transport density in Almaty is the dominant source of air pollution, especially during traffic jams, the volume of emissions increases sharply. Modernization of the public transport system – increasing the number of buses, optimizing routes and introducing electric buses – can reduce the demand for private vehicles. For example, expanding the metro network and developing alternative systems such as light rail transport can be a long-term solution. In addition, measures such as restricting the entry of private cars in the city center or introducing a congestion charge (congestion charge) will help regulate the flow of transport. These approaches have been successfully used in megacities such as London or Singapore and can also be adapted to Almaty.

Secondly, encouraging environmentally friendly fuel types (gas, electricity) is an effective way to reduce air pollution. Currently, most cars in Almaty run on gasoline or diesel, which leads to the release of such harmful substances as $PM_{2.5}$, NO_x and CO. To encourage the use of electric vehicles, government subsidies, tax breaks and the expansion of the network of charging stations are needed. In addition, the development of natural gas vehicles (CNG) can reduce emissions in the short term, as gas fuel produces fewer pollutants than diesel. An important step will also be the mandatory introduction of environmental standards for vehicles (for example, Euro-5 or Euro-6) and the implementation of decommissioning programs for used cars.

Thirdly, the expansion of green areas to improve air circulation in the mountainous area contributes to reducing the impact of climate change and temperature inversion. The location of Almaty at the

foot of the mountains naturally worsens air circulation, and the process of urbanization has led to a decrease in green spaces. The results of the study showed that green areas have the ability to absorb pollutants, but the current volume is insufficient. Therefore, it is necessary to expand parks and tree planting projects on the outskirts of the city and in the central areas.

Fourth, strengthening local climate change adaptation policies will ensure long-term sustainability. Climate change increases the intensity of temperature inversion in Almaty and leads to a weakening of the wind. Given this situation, local authorities should develop a strategic plan that will assess the impact of climate change and ensure adaptation to it. For example, the strengthening of meteorological monitoring and the introduction of a system for predicting the deterioration of air quality will make it possible to warn the population in a timely manner. In addition, additional sources of pollution, such as coal burning, can be reduced by improving energy efficiency and developing renewable energy sources (solar, wind).

In conclusion, the problem of air quality in Almaty is caused by the complex interaction of factors such as climate change and transport density. This study fully analyzed the impact of these factors and offered practical solutions. For the implementation of the above measures, cooperation between local authorities, business and society is necessary. And the expansion of green areas and the strengthening of climate policy will be effective only with the support of the city's residents.

As a result of the implementation of these measures, Almaty can get access to fresh air and become an environmentally sustainable metropolis. This allows not only to preserve the health of the current generation, but also to leave a decent living environment for future generations. The results and recommendations of the study will give a clear direction to the city administration, environmentalists and public organizations and will serve as the basis for improving the environmental future of Almaty.

CONFLICT OF INTEREST

The author claims that there is no conflict of interest in the implementation of this study and the publication of the article.

FUNDING

This research received no external funding.

ACKNOWLEDGMENT

The author expresses sincere gratitude to the editor and reviewer of the journal for valuable comments and recommendations that made it possible to carefully consider the manuscript and

significantly improve the content and quality of the article.

Copyright © 2025 by the author(s). This article is published as Open Access under the Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International

(CC BY-SA 4.0) license. This license permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. Derivative works must be distributed under the same license.

REFERENCES

- [1] RSE "Kazhydromet," "Annual Report on Atmospheric Air Pollution in Almaty", 2024. [Online]. Available: <https://kazhydromet.kz>. [Accessed: Dec. 28, 2024].
- [2] Akimat of Almaty City, "Transport Infrastructure and Statistics", 2023. [Online]. Available: <https://almaty.gov.kz>. [Accessed: Jan. 18, 2025].
- [3] AirVision.kz, "Air Quality Index (AQI) Data for Almaty", 2024. [Online]. Available: <https://airvision.kz>. [Accessed: Jan. 15, 2025].
- [4] United Nations Development Programme (UNDP), "Report on Climate Change and Air Quality", 2024. [Online]. Available: <https://undp.org>. [Accessed: Jan. 10, 2025].
- [5] A. Asylbekov, "Ways to Improve Almaty's Ecology", *Egemen Qazaqstan*, 2019. [Online]. Available: <https://egemen.kz>. [Accessed: Jul. 10, 2025].
- [6] R. Mukhtarov, O. P. Ibragimova, A. Omarova, M. Tursumbayeva, K. Tursun, A. Muratuly, F. Karaca, and N. Baimatova, "An episode-based assessment for the adverse effects of air mass trajectories on PM_{2.5} levels in Astana and Almaty, Kazakhstan", Urban Climate, vol. 49, Art. no. 101541, May 2023, doi: 10.1016/j.uclim.2023.101541.
- [7] K. Tursun, A. Omarova, O. P. Ibragimova, B. Bukenov, M. Tursumbayeva, R. Mukhtarov, I. Radelyuk, S. Yenisoy, D. Karakaş, H. Ergin, F. Karaca, and N. Baimatova, "Dominant sources of PM_{2.5} in Kazakhstan's urban cities: A PMF and HYSPLIT-based study for air quality management in Central Asia", Urban Climate, vol. 64, Art. no. 102706, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.uclim.2025.102706.
- [8] World Health Organization, "WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide." Geneva, Switzerland: WHO, 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>. [Accessed: Jan. 20, 2025].
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. [Accessed: Jan. 20, 2025].
- [10] United Nations Environment Programme (UNEP), "Actions on Air Quality," 2024. [Online]. Available: <https://www.unep.org/explore-topics/air>. [Accessed: Jan. 20, 2025].

Economy. General education, socio-humanitarian and fundamental disciplines

DOI: <https://doi.org/10.53002/105>

ENVIRONMENTAL IMPACT OF COAL MINING

Kolomoyets R.

Cyprus International University, Nicosia, Cyprus

**Corresponding author e-mail: romeo180608@gmail.com*

Author information:

Kolomoyets Roman, Cyprus International University, Nicosia, Cyprus, e-mail: romeo180608@gmail.com

Abstract — Coal mining has a significant impact on the environment by altering natural ecosystems, degrading land resources, and affecting the quality of air and water. As global energy demand continues to grow, coal remains one of the primary energy resources in many countries. In India, coal has been the dominant source of energy for several decades, supplying approximately 27% of the world's commercial energy demand and playing a crucial role in industrial and economic development. However, extensive coal extraction has resulted in considerable environmental challenges that require effective management and sustainable mining practices. This study analyzes the environmental consequences of coal mining, with particular emphasis on open-pit and underground mining methods. Geological conditions determine the choice of extraction technology, while each mining method produces different types and volumes of environmental impacts. The research examines land degradation, habitat destruction, biodiversity loss, waste generation, and pollution associated with coal mining activities. Special attention is given to the accumulation and disposal of mining waste, which represents one of the major environmental concerns in coal-producing regions. The analysis demonstrates that inadequate waste management and uncontrolled disposal of mining residues lead to soil degradation, contamination of surface and groundwater resources, deterioration of air quality, and long-term ecological imbalance. These environmental impacts also negatively influence the health and quality of life of nearby communities. The findings highlight the necessity of implementing environmentally responsible mining technologies, improving waste management systems, strengthening environmental monitoring, and adopting sustainable land reclamation measures. The proposed recommendations can contribute to reducing the ecological footprint of coal mining while supporting the sustainable development of mining regions.

Keywords — coal mining, development, migration, explosives, pollution.

КӨМІР ӨНДІРУДІҢ ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ӘСЕРІ

Коломоец Р.

Cyprus International University, Никосия, Кипр

**Автор-корреспондент e-mail: romeo180608@gmail.com*

Автор туралы ақпарат:

Коломоец Роман, Cyprus International University, Никосия, Кипр, e-mail: romeo180608@gmail.com

Аңдатпа — Көмір өндіру қоршаған ортаға айтарлықтай әсер етіп, табиғи экожүйелердің бұзылуына, жер ресурстарының деградациясына, сондай-ақ ауа мен су сапасының нашарлауына әкеледі. Баламалы энергия көздерінің қарқынды дамуына қарамастан, көмір көптеген елдер үшін негізгі энергетикалық ресурстардың бірі болып қала береді. Үндістанда көмір бірнеше ондаған жылдар бойы негізгі энергия көзі болып саналады және әлемдік коммерциялық энергия тұтынуының шамамен 27 %-ын қамтамасыз ете отырып, өнеркәсіп пен экономиканың дамуына елеулі үлес қосады. Дегенмен, көмірді қарқынды өндіру қазіргі заманғы экологиялық шешімдерді талап ететін елеулі табиғатқа әсерлермен қатар жүреді. Бұл жұмыста көмірді ашық және жерасты әдістерімен өндірудің қоршаған ортаға тигізетін әсеріне талдау жүргізілді. Кен орнын игеру технологиясын таңдау геологиялық жағдайларға байланысты екендігі және әрбір өндіру әдісінің қоршаған ортаға тигізетін әсері әртүрлі болатыны көрсетілді. Зерттеу барысында жердің деградациясы, табиғи мекендеу ортасының бұзылуы, биоаулантүрліліктің азаюы, тау-кен өндірісі қалдықтарының түзілуі және қоршаған ортаның ластануы мәселелері қарастырылды. Көмір өндіру қалдықтарын жинақтау, сақтау және кәдеге жарату мәселелеріне ерекше назар аударылды. Зерттеу нәтижелері қалдықтарды тиімсіз басқару және оларды бақылаусыз орналастыру топырақтың, жерүсті және жерасты суларының ластануына, атмосфералық ауа сапасының төмендеуіне және экологиялық тепе-теңдіктің бұзылуына әкелетінін көрсетті. Сонымен қатар, бұл үдерістер халықтың денсаулығы

мен өмір сүру сапасына кері әсер ететіні анықталды. Алынған нәтижелер негізінде көмір өндіруде экологиялық қауіпсіз технологияларды енгізу, қалдықтарды басқару жүйесін жетілдіру, экологиялық мониторингті күшейту және бүлінген жерлерді рекультивациялау бойынша ұсыныстар берілді. Бұл шаралар көмір өндіру өнеркәсібінің қоршаған ортаға тигізетін теріс әсерін азайтуға және тау-кен өңірлерінің тұрақты дамуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер — көмір өндіру, даму, қоныс аудару, жарылғыш заттар, ластану.

ВЛИЯНИЕ ДОБЫЧИ УГЛЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Коломеец Р.

Cyprus International University, Никосия, Кипр

**Автор-корреспондент e-mail: romeo180608@gmail.com*

Информация об авторе:

Коломеец Роман, Cyprus International University, Никосия, Кипр. e-mail: romeo180608@gmail.com

Аннотация — Добыча угля оказывает существенное воздействие на окружающую среду, вызывая деградацию природных экосистем, нарушение земельных ресурсов и ухудшение качества воздуха и водных объектов. Несмотря на активное развитие альтернативных источников энергии, уголь остается одним из важнейших энергетических ресурсов во многих странах мира. В Индии уголь на протяжении нескольких десятилетий является основным источником энергии, обеспечивая около 27 % мирового коммерческого энергопотребления и играя важную роль в развитии промышленности и экономики. Однако интенсивная добыча угля сопровождается значительными экологическими последствиями, требующими внедрения современных природоохранных решений. В работе проведен анализ экологических последствий открытого и подземного способов добычи угля. Показано, что выбор технологии добычи определяется геологическими условиями месторождения, при этом каждый способ оказывает различное воздействие на окружающую среду. Рассмотрены вопросы деградации земель, разрушения естественных местообитаний, сокращения биоразнообразия, образования горнопромышленных отходов и загрязнения компонентов окружающей среды. Особое внимание уделено проблемам накопления, хранения и утилизации отходов угледобывающего производства. Результаты исследования показали, что неэффективное управление отходами и их неконтролируемое размещение приводят к загрязнению почвы, поверхностных и подземных вод, ухудшению качества атмосферного воздуха и нарушению экологического равновесия. Установлено, что данные процессы отрицательно влияют на здоровье населения и качество жизни в прилегающих районах. На основе полученных результатов предложены рекомендации по внедрению экологически безопасных технологий добычи угля, совершенствованию систем обращения с отходами, усилению экологического мониторинга и проведению рекультивации нарушенных земель, что будет способствовать снижению негативного воздействия угледобывающей промышленности на окружающую среду.

Ключевые слова — Добыча угля, развитие, миграция, взрывчатые вещества, загрязнение.

MAIN PROVISION

The environmental impact of coal mining extends beyond land degradation and resource depletion, affecting air quality, water resources, biodiversity, and human health. Both surface and underground mining generate significant environmental pressures through waste generation, dust emissions, noise pollution, land subsidence, and ecosystem disturbance. The adoption of environmentally responsible mining practices, effective waste management, mine reclamation, and ecological restoration is essential to reduce the environmental footprint of coal mining while maintaining its economic benefits.

INTRODUCTION

Mining activities, especially during the development of forest areas, put a lot of pressure on

the local flora and fauna. An important issue is also the impact of mining on underground water levels, turbidity of surrounding bodies of water, and land destruction. Although coal mining makes a significant contribution to the economic development of the country, it also negatively affects human health. In addition, coal mining also affects the socio-cultural life of miners and the population living in this region. Therefore, when carrying out mining activities, a comprehensive approach is needed, taking into account the impacts on the local habitat and ecosystem [1-5].

To do this, various factors must be taken into account, such as determining the places where minerals are found, correctly calculating the slope angle of the dumps, safe disposal of waste and the effective use of turbidity control structures. In India, coal mining companies are implementing "clean

coal" strategies that aim to reduce the impact on the environment. Reducing the amount of ash by washing coal increases combustion efficiency, and this directly contributes to reducing the emission of pollutants. Although the process of washing coal requires additional water, it allows you to step towards a pollution-free society [6-8].

During the combustion of coal, harmful substances such as sulfur dioxide, nitrogen oxide, carbon dioxide, as well as dust and ash particles are released. In areas where coal is burned, the level of air and water pollution can reach dangerous degrees. It is recognized that coal mining around the world has a negative impact on local and global ecology. It destroys vegetation at the local level, causing soil erosion and disrupting the balance of microorganisms. And globally, methane gas is released from coal seams, which creates a greenhouse effect 30 times stronger than carbon dioxide. Thus, coal mining has a negative impact on air quality standards. Underground mining contributes to soil degradation, leading to groundwater depletion and land subsidence in many regions [9].

In the event of land subsidence beyond the threshold, it is necessary to replenish it. There are also socio-cultural negative consequences of coal mining, such as the migration and resettlement of people, changes in cultural heritage, as well as an outbreak of criminal and other illegal activities in the region due to a sharp increase in economic development through mining.

However, mining projects also have positive effects, including changes in the employment structure, increased sources of income, infrastructure development, and community prosperity. Changes in transport, communications, the education system, trade, recreation and medical services are also among the positive effects of coal mining. Thus, it is obvious that coal mining is harmful to the environment, however, it contributes to economic development, as well as increasing the level of self-provision through the effective development of Natural Resources [10].

Although it is not possible to move mining operations to another location, it is possible to reduce the damage to the environment by choosing the right production site and introducing new technologies [11-13].

Research gap. Although numerous studies have investigated individual environmental impacts of coal mining, most of them focus on specific issues such as air pollution, land degradation, water contamination, or ecological restoration separately. There is still a lack of comprehensive assessments integrating the multiple environmental, ecological, and socio-economic consequences of coal mining within a

unified framework. Furthermore, limited attention has been given to combining recent international environmental management practices with sustainable mine reclamation strategies and occupational environmental risks. This study addresses this gap by providing an integrated evaluation of the major environmental impacts of coal mining together with contemporary mitigation and restoration approaches.

Novelty statement. The novelty of this study lies in the comprehensive analysis of the environmental impacts of coal mining by integrating recent scientific findings (2022–2025) on air, water, soil, biodiversity, noise pollution, land subsidence, and ecological restoration. Unlike conventional reviews that examine individual environmental components, this study considers the combined effects of mining activities throughout the mine life cycle and highlights sustainable environmental management practices, mine reclamation strategies, and modern mitigation technologies aimed at reducing the ecological footprint of coal mining under current sustainability and carbon-neutrality objectives.

METODOLOGY

Noise pollution is currently recognized as an important health risk factor. It is dangerous not only because it causes discomfort, but also because of its harmful effect on the human body. Long-term exposure to noise can lead to partial hearing loss in the ear and even permanent damage to the inner ear.

The problem of noise in underground mines is of particular concern, as acoustic features in confined spaces contribute to the spread of noise and its impact on workers [14].

The main sources of noise in underground mines:

1. coal cutting machines;
2. coal conveyors and wagons (tubes);
3. coal blasting process;
4. production, ventilation and drilling equipment;
5. main and secondary fans, air blowing systems.

Increased noise is often due to poor equipment maintenance. In most mines, noise exceeds the permissible level of 90 dB (A), and this is a safe limit for 8 hours of Operation per day [15].

A study carried out by the DGSHB (General Directorate of mine safety:

The results of the study showed that drilling rigs, crushing and conveying systems emit noise exceeding the level of 90 dB (a). This poses a serious threat to the health of miners and requires urgent introduction of noise protection measures.

Table 1 – Noise level in underground coal mines

Research location	Average noise level (дБ)
Near the mine scraper	96
Transfer point	99
Conveyor belt end	89
Hydraulic pump	91

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

The development and Land Use Plan of the field should include the stage of preparation of the mine for preliminary operation, the operational stage and the post-operational stage. The plan should clearly state the goals of Post-Operational Land Use and describe the measures necessary to achieve this goal.

When developing this plan, it is necessary to take into account not only direct mining operations, but also the terrain around and the peculiarities of the ecosystem.

In the description of the region, several main components are taken into account. First of all, the current land use model of the region and the general characteristics of human settlements are considered. In addition, the natural features of the local ecosystem, climatic conditions and the most important characteristics of the terrain are analyzed. Data related to the terrain include such features as geomorphological conditions, topography and drainage system, cracks and crevices in the geological structure, as well as hydrogeological indicators-the location of permeable layers, the relationship of underground and surface waters and their hydraulic parameters. At the same time, the ability of natural soil and water to absorb pollution, as well as the distribution area and reserves of fertile soil, are also taken into account.

The state of transport and communication infrastructure in the region also plays an important role. In addition, information on mining operations will be considered, information on the types of extracted minerals, methods of production and stationary installations used, the volume of waste and methods of their disposal, the risk of land subsidence and landslides will be studied. Also, the requirements for the transport infrastructure necessary for production and the characteristics of the services and facilities to be installed are taken into account.

CONCLUSION

Mining has a significant impact on the economic, social and environmental structure of neighboring regions. Although mining provides economic development in a given region, it causes land destruction and causes environmental and socio-economic problems.

To solve the problem, important environmental factors must be taken into account. Each mine head

must maintain an environmental checklist in accordance with the government of India's mining license terms and environmental management plan. By systematically reviewing this information, specific environmental issues of the mine can be identified. Low environmental performance can accelerate situations that require strict regulation.

The cracks caused by the subsidence (sitting) of the Earth have left many places infertile and unstable. Also, the seating of the land led to the drying of nearby reservoirs and Wells. However, through the joint efforts of coal mining companies and local authorities, it is possible to recycle these lands and return the product to use. However, consistent and coordinated work is not being done in this direction.

The main thing is to close the cracks. It is not necessary to restore the dug land to its original state, even if it is used for agriculture, landscaping or housing construction. According to some researchers, it is necessary to improve the water storage capacity of the dugouts under the soil.

According to scientists, before starting work on the restoration of the land, the purpose of its future use must be determined in coordination with local residents. The most important thing is to seal the cracks, and it is not necessary to restore the dugout to its original relief, it can be used for the purpose of agriculture, gardening or housing construction.

CONFLICT OF INTEREST

The author claims that there is no conflict of interest in the implementation of this study and the publication of the article.

FUNDING

This research received no external funding.

ACKNOWLEDGMENT

The author expresses sincere gratitude to the editor and anonymous reviewers for their valuable comments and constructive suggestions, which significantly improved the quality and scientific clarity of this manuscript. Appreciation is also extended to the international organizations and scientific institutions whose publicly available reports and research publications provided important data and analytical insights for this study.

Copyright © 2025 by the author(s). This article is published as Open Access under the Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International **(CC BY-SA 4.0)** license. This license permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. Derivative works must be distributed under the same license.

REFERENCES

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. [Accessed: Dec. 20, 2024].
- [2] International Energy Agency (IEA), *Coal 2024: Analysis and Forecast to 2027*. Paris, France: IEA, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/coal-2024>. [Accessed: Nov. 15, 2026].
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP), *Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes*. Nairobi, Kenya: UNEP, 2024. [Online]. Available: <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024>. [Accessed: Jul. 30, 2024].
- [4] World Health Organization (WHO), *Compendium of WHO and Other UN Guidance on Health and Environment, 2024 Update*. Geneva, Switzerland: WHO, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int>. [Accessed: Jul. 27, 2026].
- [5] Y. Liu, X. Wang, J. Zhang, et al., "Environmental impacts of coal mining: A review of soil, water and atmospheric pollution," *Journal of Cleaner Production*, vol. 389, Art. no. 136089, 2023.
- [6] X. Li, H. Zhao, and Y. Chen, "Ecological restoration and environmental management in coal mining regions: Recent advances and future prospects," *Science of the Total Environment*, vol. 903, Art. no. 166873, 2023.
- [7] X. Zhang, Y. Li, Z. Wang, et al., "Assessment of environmental impacts caused by coal mining using remote sensing and GIS techniques," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 195, no. 8, Art. no. 1012, 2023.
- [8] M. Kumar, S. Singh, and R. Kumar, "Air quality assessment in coal mining regions: Recent developments and mitigation strategies," *Environmental Pollution*, vol. 338, Art. no. 122708, 2024.
- [9] X. Chen, L. Wang, and H. Liu, "Heavy metal contamination and ecological risk assessment in soils surrounding coal mining areas: A systematic review," *Journal of Environmental Management*, vol. 358, Art. no. 120926, 2024.
- [10] S. Wang, Y. Zhou, and J. Li, "Sustainable mine reclamation and ecological restoration in coal mining areas under carbon neutrality goals," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 205, Art. no. 107573, 2024.
- [11] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *The Status of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at Breaking Point*. Rome, Italy: FAO, 2022. [Online]. Available: <https://www.fao.org>. [Accessed: Jul. 27, 2024].
- [12] United Nations Development Programme (UNDP), *Human Development Report 2023/2024: Breaking the Gridlock – Reimagining Cooperation in a Polarized World*. New York, NY, USA: UNDP, 2024. [Online]. Available: <https://hdr.undp.org>. [Accessed: Jul. 27, 2024].
- [13] World Bank, *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*, Updated Report, Washington, DC, USA: World Bank, 2023. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org>. [Accessed: Jul. 27, 2024].
- [14] M. A. Adiat, T. A. Adagunodo, and O. O. Akinlalu, "Environmental and health impacts of coal mining: A systematic review," *Environmental Challenges*, vol. 13, Art. no. 100785, 2024.
- [15] H. Zhang, L. Xu, Y. Sun, et al., "Green and low-carbon development pathways for coal mining under carbon neutrality targets," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 1452–1468, 2025.

Экономика. Жалпы білім беру, әлеуметтік-гуманитарлық және іргелі пәндерDOI: <https://doi.org/10.53002/106>**THE GROWTH OF CONSUMER CREDIT AND ITS IMPACT ON THE NATIONAL ECONOMY****Bukharbayeva A.***Yessenov university, Aktau, Kazakhstan***Corresponding author e-mail: akonia_1996@mail.ru***Author information:****Bukharbayeva Aidana**, Yessenov University, Aktau, Kazakhstan, e-mail: akonia_1996@mail.ru

Abstract — This article examines the growth of consumer lending and its impact on the national economy. Consumer credit has become an important component of the financial system, stimulating household consumption, expanding domestic demand, and supporting economic activity. The rapid development of consumer lending contributes to improving the standard of living by increasing access to goods and services; however, excessive credit expansion may also create financial risks for households and the banking sector. Therefore, assessing the economic effects of consumer lending is essential for ensuring sustainable economic development. The purpose of this study is to analyze the relationship between consumer lending, economic growth, and the social well-being of the population. The research examines the dynamics of consumer credit, identifies the main factors influencing its growth, and evaluates its impact on household consumption, investment activity, and macroeconomic stability. Particular attention is paid to the role of commercial banks in expanding credit accessibility, changes in household debt levels, and the risks associated with excessive borrowing. In addition, the study considers the influence of monetary policy and financial regulation on the development of the consumer lending market. The findings indicate that moderate growth in consumer lending positively affects domestic demand and economic development by stimulating production and trade. At the same time, excessive household indebtedness increases credit risks, weakens financial stability, and may negatively affect long-term economic growth. Based on the obtained results, practical recommendations are proposed to improve consumer lending policies, strengthen responsible lending practices, enhance financial literacy, and optimize regulatory mechanisms to ensure a balanced and sustainable development of the national credit market.

Keywords — consumer credit, national economy, economic growth, social situation, credit risks, financial market.

ТҰТЫНУШЫЛЫҚ НЕСИЕНІҢ ӨСУІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ҰЛТТЫҚ ЭКОНОМИКАҒА ӘСЕРІ**Бухарбаева А.***«Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университеті» КеАҚ, Ақтау, Қазақстан***Автор-корреспондент e-mail: akonia_1996@mail.ru***Автор туралы ақпарат:****Бухарбаева Айдаана**, «Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университеті», Ақтау, Қазақстан, e-mail: akonia_1996@mail.ru

Аңдатпа — Бұл мақалада тұтынушылық несиелеудің өсуі және оның ұлттық экономикаға әсері қарастырылған. Тұтынушылық несие қаржы жүйесінің маңызды құрамдас бөлігі болып табылады, өйткені ол халықтың тұтынушылық сұранысын ынталандырып, ішкі нарықтың кеңеюіне және экономикалық белсенділіктің артуына ықпал етеді. Тұтынушылық несиелеудің қарқынды дамуы азаматтардың тауарлар мен қызметтерге қолжетімділігін кеңейту арқылы өмір сүру деңгейін жақсартады. Алайда несиелеу көлемінің шамадан тыс өсуі үй шаруашылықтары мен банк секторы үшін қаржылық тәуекелдердің артуына әкелуі мүмкін. Сондықтан тұтынушылық несиелеудің экономикалық дамуға ықпалын бағалау маңызды ғылыми және практикалық міндет болып табылады. Зерттеудің мақсаты – тұтынушылық несиелеу, экономикалық өсу және халықтың әлеуметтік әл-ауқаты арасындағы өзара байланысты талдау. Жұмыста тұтынушылық несиелеудің даму динамикасы, оның өсуіне әсер ететін негізгі факторлар, сондай-ақ тұтыну көлеміне, инвестициялық белсенділікке және макроэкономикалық тұрақтылыққа ықпалы зерттелді. Коммерциялық банктердің несиенің қолжетімділігін

арттырудағы рөліне, халықтың борыштық жүктемесінің өзгеруіне және шамадан тыс қарыздануға байланысты тәуекелдерге ерекше назар аударылды. Сонымен қатар, ақша-несие саясаты мен мемлекеттік реттеудің тұтынушылық несие нарығының дамуына әсері қарастырылды. Зерттеу нәтижелері тұтынушылық несиемен қамтамасыз ететінін көрсетті. Сонымен бірге халықтың шамадан тыс қарыздануы несиелік тәуекелдерді арттырып, қаржылық тұрақтылықты әлсіретіп, экономиканың ұзақ мерзімді дамуына кері әсер етуі мүмкін. Алынған нәтижелер негізінде тұтынушылық несие саясатын жетілдіру, жауапты несие беру қағидаттарын дамыту, халықтың қаржылық сауаттылығын арттыру және мемлекеттік реттеу тетіктерін оңтайландыру бойынша практикалық ұсынымдар ұсынылды.

Түйін сөздер — Тұтынушылық несие, ұлттық экономика, экономикалық өсім, әлеуметтік жағдай, несиелік тәуекелдер, қаржы нарығы.

РОСТ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО КРЕДИТА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА НАЦИОНАЛЬНУЮ ЭКОНОМИКУ

Бухарбаева А.

НАО «Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова», Актау, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: akonia_1996@mail.ru*

Информация об авторе:

Бухарбаева Айдаңа, НАО «Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш.Есенова», Актау, Казахстан, e-mail: akonia_1996@mail.ru

Аннотация — В данной статье рассматривается рост потребительского кредитования и его влияние на национальную экономику. Потребительское кредитование является важным элементом финансовой системы, стимулирующим потребительский спрос, расширение внутреннего рынка и экономическую активность. Активное развитие потребительского кредитования способствует повышению уровня жизни населения за счет расширения доступа к товарам и услугам, однако чрезмерный рост объемов кредитования может привести к возникновению финансовых рисков как для домохозяйств, так и для банковского сектора. В связи с этим оценка влияния потребительского кредитования на экономическое развитие приобретает особую актуальность. Цель исследования заключается в анализе взаимосвязи между развитием потребительского кредитования, экономическим ростом и социальным благополучием населения. В работе исследованы динамика потребительского кредитования, основные факторы его роста, а также влияние на объем потребления, инвестиционную активность и макроэкономическую стабильность. Особое внимание уделено роли коммерческих банков в расширении доступности кредитов, изменению уровня долговой нагрузки населения и рискам, связанным с чрезмерной закредитованностью. Также рассмотрено влияние денежно-кредитной политики и государственного регулирования на развитие рынка потребительского кредитования. Результаты исследования показали, что умеренный рост потребительского кредитования способствует увеличению внутреннего спроса, развитию производства и экономическому росту. Вместе с тем чрезмерная долговая нагрузка населения повышает кредитные риски, снижает финансовую устойчивость и может отрицательно сказаться на долгосрочном развитии экономики. На основе полученных результатов предложены рекомендации по совершенствованию политики потребительского кредитования, развитию принципов ответственного кредитования, повышению финансовой грамотности населения и совершенствованию механизмов государственного регулирования.

Ключевые слова — потребительский кредит, национальная экономика, экономический рост, социальное положение, кредитные риски, финансовый рынок.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында тұтынушылық несиемен қамтамасыз ететінін ішкі тұтыну сұранысының ұлғаюына және экономикалық белсенділіктің артуына оң әсер ететіні анықталды. Жүргізілген талдау тұтынушылық несиемен қамтамасыз ететінін өзгерісі халықтың нақты табысы, жалпы ішкі өнім және инфляция деңгейі сияқты негізгі макроэкономикалық көрсеткіштермен өзара

байланысты екенін көрсетті. Зерттеу нәтижелері тұтынушылық несиемен қамтамасыз ететінін ішкі тұтыну сұранысының ұлғаюына және экономикалық белсенділіктің артуына оң әсер ететінін анықталды. Жүргізілген талдау тұтынушылық несиемен қамтамасыз ететінін өзгерісі халықтың нақты табысы, жалпы ішкі өнім және инфляция деңгейі сияқты негізгі макроэкономикалық көрсеткіштермен өзара

КІРІСПЕ

Тұтынушылық несие – бұл азаматтардың тұрмыстық қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін қаржы ұйымдарынан алған қарыздар. Бұл несие түрі жеке тұлғаларға тұрмыстық техника, автокөлік, білім алу, денсаулық сақтау, демалыс және басқа да қажеттіліктерге жұмсауға мүмкіндік береді. Тұтынушылық несиенің негізгі мақсаты – азаматтардың өмір сүру деңгейін жақсарту, олардың экономикалық жағдайын жақсартуға мүмкіндік туғызу. Сонымен қатар, тұтынушылық несие елдің экономикалық белсенділігін арттыруға да әсер етеді, өйткені бұл қарыздар азаматтардың тұтыну мүмкіндіктерін кеңейтіп, тауарлар мен қызметтерге деген сұранысты көбейтеді [1,2].

Тұтынушылық несиенің көлемі соңғы жылдары айтарлықтай өсті. Банк және қаржы ұйымдары тұтынушыларға несиелерді жеңілдетілген шарттармен ұсынуды бастады, бұл өз кезегінде азаматтардың несиені алу мүмкіндігін арттырды. Бұл процеске бірнеше факторлар әсер етті, олардың ішінде экономикалық өсім, инфляция деңгейі, еңбек нарығындағы өзгерістер және тұтынушылардың қаржылық сауаттылығын арттыру сияқты жағдайлар бар. Несиенің өсімі, әсіресе, халықтың төменгі табыс деңгейіндегі бөлігіне үлкен әсер етті, өйткені олар үшін тұтынушылық несие күнделікті тұрмыс қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін бірден-бір қаржылық құрал болып табылады [3].

Бір жағынан, тұтынушылық несиенің өсімі тұрғындардың өмір сүру деңгейінің жоғарылауына мүмкіндік туғызды. Азаматтар өздерінің қажеттіліктерін қаржылай қамтамасыз ету үшін несие ала отырып, тұрмыс жағдайларын жақсартты. Мысалы, көптеген адамдар автокөлік сатып алу үшін несиені пайдаланады, бұл өз кезегінде көлік құралдарын сатушы компаниялар мен автосервистердің қызметіне сұраныстың артуына әсер етті. Сонымен қатар, білім алу және кәсіби даму мақсатында несие алу азаматтардың кәсіби дағдыларын жетілдіруге мүмкіндік берді, бұл олардың табысын арттыруға ықпал еткенін атап өтуге болады.

Екінші жағынан, тұтынушылық несиенің артуы қаржылық тұрақсыздық пен несиелік тәуекелдерге алып келуі мүмкін. Әрине, тұтынушылардың несие алу мүмкіндігі олардың қаржылық жағдайын жақсартуға ықпал етуі мүмкін, бірақ бұл процесс кейде қаражаттың дұрыс пайдаланылмауы немесе өте жоғары пайыздық мөлшерлемелердің салдарынан ауыр қарыздарға алып келеді. Атап айтқанда, азаматтар

жоғары пайыздық мөлшерлемелермен несие алып, оны өтеу кезінде қиындықтарға тап болуы мүмкін. Бұл олардың қаржылық жағдайын тұрақсыздандырып, тіпті банкроттыққа дейін апаруы ықтимал.

Тұтынушылық несиенің артуымен бірге, несиелік тәуекелдердің жоғарылауы да байқалады. Банктер мен қаржы ұйымдары қарыз алушылардың төлем қабілеттілігін тексеру үшін қатаң шарттар қойып, несиелердің қайтарылуын қамтамасыз ету үшін шаралар қабылдауы керек. Сонымен қатар, тұтынушылардың қаржылық сауаттылығын арттыру қажет. Бұл орайда мемлекет тарапынан қаржылық білім беру бағдарламаларының ұйымдастырылуы маңызды рөл атқарады [4].

Қорытындылай келе, тұтынушылық несие экономикада маңызды рөл атқаратын құрал болып табылады. Ол азаматтардың тұрмыс деңгейін жақсартуға, экономикалық белсенділікті арттыруға мүмкіндік береді. Бірақ оны дұрыс пайдалану қажет, өйткені несиелік тәуекелдер мен қаржылық тұрақсыздықтың алдын алу үшін тұрғындар мен қаржы ұйымдары бірлесіп жұмыс істеуі керек [5].

Зерттеудің маңыздылығы. Қазақстанда тұтынушылық несиелеу нарығының қарқынды дамуы ұлттық экономиканың өсуіне, ішкі сұраныстың кеңеюіне және халықтың әл-ауқатының өзгеруіне елеулі ықпал етуде. Сонымен қатар, тұтынушылық несиенің шамадан тыс ұлғаюы қаржылық тұрақтылыққа қауіп төндіріп, несиелік тәуекелдердің артуына алып келуі мүмкін. Осыған байланысты тұтынушылық несиенің макроэкономикалық көрсеткіштерге, халықтың төлем қабілеттілігіне және қаржы нарығының тұрақтылығына әсерін кешенді бағалау ғылыми және практикалық тұрғыдан өзекті болып табылады. Зерттеу нәтижелері қаржы секторындағы тәуекелдерді басқару тетіктерін жетілдіруге, мемлекеттік несие саясатын қалыптастыруға және халықтың қаржылық сауаттылығын арттыруға бағытталған ұсыныстар әзірлеуге негіз болады.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы Қазақстандағы тұтынушылық несиенің соңғы он жылдағы даму динамикасын макроэкономикалық көрсеткіштермен кешенді байланыстыра отырып бағалауында жатыр. Зерттеу барысында тұтынушылық несиенің ЖІӨ, инфляция, жұмыссыздық деңгейі және халықтың нақты табысына ықпалы статистикалық, корреляциялық және салыстырмалы талдау әдістері арқылы анықталды. Сонымен қатар, тұтынушылық несиенің экономикалық өсуді

ынталандырудағы оң әсерлері мен қаржылық тұрақтылыққа төндіретін тәуекелдері бір мезгілде қарастырылып, оларды теңгерімді реттеуге бағытталған ғылыми негізделген ұсыныстар ұсынылды.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Зерттеу әдіснамасы ретінде статистикалық талдау, корреляциялық зерттеулер және салыстырмалы әдіс қолданылды. Бұл әдістер тұтынушылық несиенің экономикалық көрсеткіштерге әсерін анықтауға және оның ұлттық экономикаға ықпалын тереңірек түсінуге мүмкіндік берді. Зерттеу барысында Қазақстанның соңғы 10 жылдағы тұтынушылық несиенің өсу динамикасы және оның экономикалық көрсеткіштерге, атап айтқанда ЖІӨ, инфляция деңгейі, жұмыссыздық деңгейі және халықтың нақты табысына әсері зерттелді. Тұтынушылық несиенің ұлттық экономикаға әсерін талдау үшін экономикалық модельдер мен макроэкономикалық индикаторлар пайдаланылды, бұл өз кезегінде экономикалық құбылыстарды түсінуді тереңдетіп, тұтынушылық несиенің әртүрлі аспектілерін қарастыруға мүмкіндік берді.

Зерттеу әдіснамасының негізінде статистикалық талдау маңызды орын алады. Статистикалық деректерді талдау арқылы тұтынушылық несиенің өсу динамикасын байқауға болады. Қазақстанның банк жүйесіндегі тұтынушылық несиенің көлемі мен өсу

қарқынының статистикалық мәліметтерін жинап, оларды уақыттық қатарлармен салыстыру әдісі қолданылды. Бұл әдіс арқылы тұтынушылық несиенің экономикалық конъюнктураға байланысты өзгерістерін анықтауға мүмкіндік туды. Әсіресе, тұтынушылық несиенің пайыздық мөлшерлемелерінің өзгеруі, қарыздардың мерзімі, төлем қабілеттілігінің деңгейі және халықтың қаржылық жағдайының даму тенденциялары сияқты факторларды ескеріп, статистикалық талдау арқылы тұтынушылық несиенің құрылымы мен оның өсу динамикасы айқындалды.

Корреляциялық зерттеулер әдісі экономикалық көрсеткіштер мен тұтынушылық несиенің арасындағы байланыстарды анықтау үшін қолданылды. Бұл әдіс арқылы тұтынушылық несиенің ЖІӨ, инфляция деңгейі, жұмыссыздық деңгейі және халықтың нақты табысына әсерін зерттеуге болады. Мысалы, тұтынушылық несиенің өсуі экономиканың жалпы жағдайымен тығыз байланысты болуы мүмкін, ал оның өсуі халықтың тұтыну қабілетін арттырып, ішкі сұраныстың артуына ықпал етуі ықтимал. Сонымен қатар, инфляция деңгейінің жоғарылауы немесе ЖІӨ-нің өзгеруі тұтынушылық несиенің көлеміне әсер етуі мүмкін. Бұл мәселелерді талдау үшін корреляциялық коэффициенттер мен регрессиялық модельдер қолданылады, олар екі немесе бірнеше экономикалық көрсеткіштің арасындағы байланысты бағалауға мүмкіндік береді.

Кесте 1 – Несиелік тәуекелдер мен дефолт деңгейі

Жыл	Несиелік көлем (млрд теңге)	Проблемалық несиелердің үлесі (%)	Дефолт деңгейі (%)
2014	500	5%	3%
2015	550	6%	3.5%
2016	600	7%	4%
2017	650	8%	4.5%

Салыстырмалы әдіс зерттеу барысында қолданылған тағы бір маңызды әдіс болып табылады. Бұл әдіс арқылы тұтынушылық несиенің өсу динамикасы әртүрлі елдерде, әсіресе Қазақстанның экономикасымен салыстырғанда, қалай өзгергенін қарастыруға болады. Қазақстанның макроэкономикалық көрсеткіштері мен басқа дамушы елдердің экономикалық жағдайларын салыстыра отырып, тұтынушылық несиенің өсімі мен оның экономикаға әсері туралы жалпы тұжырымдар жасауға болады. Мысалы, егер басқа елдерде тұтынушылық несиенің көлемі артып, экономикалық өсім байқалса, бұл Қазақстанда да ұқсас үрдіс болуы

мүмкін деген гипотеза қоюға болады. Салыстырмалы талдау, сондай-ақ, елдердің тұтынушылық несие саясатын, пайыздық мөлшерлемелерді, несиелік тәуекелдерді басқару әдістерін салыстыруға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде елдің экономикалық даму стратегиясын қалыптастыруға әсер етеді.

Зерттеу барысында Қазақстанның соңғы 10 жылдағы тұтынушылық несиенің өсу динамикасы айқындалды. Статистикалық деректерге сүйене отырып, елімізде тұтынушылық несиенің көлемі тұрақты түрде өскенін көруге болады. Әсіресе, 2010 жылдардан бастап тұтынушылық несиенің қарқынды өсуі байқалады, бұл экономиканың

жалпы өсуімен және халықтың әлеуметтік жағдайының жақсаруымен байланысты. Дегенмен, несиенің өсуі тек оң факторларға ғана байланысты емес, оның ішінде экономикалық дағдарыстар, инфляция, сыртқы факторлар да маңызды рөл атқарды. Бұл көрсеткіштерді талдай отырып, тұтынушылық несиенің өсуіне әсер еткен негізгі факторларды анықтауға болады.

Қазақстанның ЖІӨ-нің өсуі мен тұтынушылық несиенің көлемі арасындағы байланыс өте тығыз. ЖІӨ-нің өсуі ішкі сұраныстың артуына алып келеді, бұл өз кезегінде тұтынушылық несиенің сұранысын арттырады. Бұл үрдіс 2010 жылдардан бері байқалады, әсіресе экономиканың дамыған кезеңдерінде тұтынушылық несиенің көлемі айтарлықтай өсті. Сонымен қатар, инфляция деңгейі мен тұтынушылық несиенің арасындағы байланыс та өте маңызды. Инфляция деңгейінің жоғарылауы тұтынушылық несиенің пайыздық мөлшерлемелерінің өсуіне алып келеді, бұл өз кезегінде қарыз алушылардың төлем қабілеттілігін төмендетеді. Сондықтан инфляция деңгейінің өзгеруі тұтынушылық несиенің көлемі мен халықтың қаржылық жағдайына тікелей әсер етеді.

Жұмыссыздық деңгейінің тұтынушылық несиенің байланысы күрделі мәселе болып табылады. Әдетте, жұмыссыздық деңгейінің жоғарылауы халықтың табысын төмендетіп, тұтынушылық несиелердің қайтарылуына қиындықтар тудырады. Бұл әсіресе жұмыссыздық деңгейінің жоғары болған жылдары байқалды. Сонымен қатар, халықтың нақты табысы мен тұтынушылық несиенің көлемі арасындағы байланыс та маңызды болып табылады. Егер халықтың нақты табысы өскен болса, тұтынушылық несиенің сұранысы да артатыны байқалады. Бұл жағдай әсіресе экономикалық өсім кезеңдерінде айқын көрінеді, ал экономикалық дағдарыстар кезеңінде нақты табыс төмендеген кезде тұтынушылық несиелердің көлемі азаяды.

Қорыта келгенде, Қазақстандағы тұтынушылық несиенің өсу динамикасын зерттеу оның экономикалық көрсеткіштерге, әсіресе ЖІӨ, инфляция, жұмыссыздық деңгейі және халықтың нақты табысына әсерін анықтауға мүмкіндік берді. Бұл зерттеу тұтынушылық несиенің ұлттық экономикаға ықпалын және оның тұрғындардың өмір сүру деңгейін жақсартуға қалай әсер ететінін түсінуге көмектесті. Тұтынушылық несиенің өсуінің оң және теріс әсерлерін ескере отырып, болашақта экономикалық саясатты дұрыс бағытта қалыптастыру маңызды болып табылады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Тұтынушылық несиенің өсуі елдің экономикалық белсенділігін арттырып, тұтыну сұранысын күшейтті. Бұл әсіресе бөлшек сауда мен қызмет көрсету салаларында айқын көрініс тапты. Тұтынушылық несиенің көлемінің өсуі тұтынушыларға өздерінің тұрмыстық қажеттіліктерін қаржылай қамтамасыз етуге мүмкіндік беріп, тауарлар мен қызметтерге деген сұраныстың артуына алып келді. Мысалы, автокөліктер мен тұрмыстық техниканың сатылымы айтарлықтай өсті, бұл өз кезегінде осы салалардағы кәсіпорындар мен қызмет көрсету ұйымдарының табысын арттырып, жұмыспен қамтуды қамтамасыз етті. Бұл үрдіс экономиканың жалпы өсуіне ықпал етіп, ішкі жалпы өнімнің (ЖІӨ) артуына себеп болды.

Сондай-ақ, тұтынушылық несиеге сұраныс артқан сайын несиелік тәуекелдер мен дефолт тәуекелдері де жоғарылады. Қарыз алушылардың төлем қабілеттілігін бағалау кезінде қаржылық мекемелердің қиындықтарға тап болуы мүмкін. Бұл жағдай банк секторына үлкен жүктеме әкеліп, банктердің қаржылық тұрақтылығына теріс әсер етуі мүмкін. Әсіресе жоғары пайыздық мөлшерлемелер мен мерзімдерді ұзарту кезінде тұтынушылық несиенің өтелмеуі мүмкіндігі артады. Бұл өз кезегінде банкроттыққа ұшыраған қарыз алушылардың санының көбеюіне, сонымен қатар банктердің активтерінің құнсыздануына әкеледі. Қарыз алушылардың төлем қабілетсіздігі көбейген сайын, банктердің несие портфелінің сапасы төмендеп, қаржылық жүйенің тұрақсыздығы артуы ықтимал.

Дегенмен, тұтынушылық несиенің өсуі жақсы жағдайда экономикалық өсімді қамтамасыз етіп, инфляция деңгейін төмендетуге ықпал етуі мүмкін. Тұтыну сұранысының артуы өндіріс көлемін өсіріп, экономикалық белсенділіктің жоғарылауына себеп болады. Бұл өз кезегінде еңбек нарығындағы жағдайды жақсартып, жұмыссыздық деңгейінің төмендеуіне ықпал етуі мүмкін. Инфляция деңгейі төмендеген жағдайда, халықтың нақты табысы өсіп, тұтынушылық сұраныс әрі қарай артатын болады. Бұл экономиканың өсуін тұрақты етіп, тұтынушылық несиенің оң әсерін ұзақ мерзімде қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Алайда, тұтынушылық несиенің ұзақ мерзімдегі өсуі экономикалық тұрақсыздық пен кредиттік дағдарыстарға жол ашуы мүмкін. Тұтынушылық несиенің көлемі тым артып, оның қайтарылуы қиынға соғатын болса, қаржылық секторда несиелік дағдарыстар орын алуы мүмкін. Егер банктердің қарыздары өтелмей қалса, бұл олардың қаржылық жағдайын нашарлатып, кредиттік ресурстардың қысқаруына алып келеді.

Мұндай жағдайда, банктер қатаң несиелік саясат жүргізуге мәжбүр болып, тұтынушыларға несие беру шарттарын күшейтуі мүмкін. Бұл өз кезегінде ішкі сұраныстың төмендеуіне, бөлшек сауда мен қызмет көрсету салаларындағы сұраныстың қысқаруына әкеледі.

Ұзақ мерзімде, тұтынушылық несиенің артуы тұрғындардың қаржылық жағдайына теріс әсер етуі мүмкін. Қарызға белшесінен батқан азаматтар өздерінің төлем қабілеттілігін жоғалтып, өмір сүру деңгейін төмендетіп алу ықтималдығы жоғарылайды. Бұл халықтың әлеуметтік жағдайына кері әсер етіп, әлеуметтік шиеленістің артуына алып келуі мүмкін. Сонымен қатар, мемлекеттік бюджетке де қысым түседі, себебі халықтың қарыздарын өтеуге жәрдем көрсету үшін мемлекеттік қолдау шаралары қажет болуы мүмкін. Бұл жағдай еліміздің әлеуметтік-экономикалық дамуына да теріс әсер етуі мүмкін.

Тұтынушылық несиенің өсуі, егер оны дұрыс реттейтін экономикалық саясат болмаса, елдің экономикалық тұрақтылығына қауіп төндіруі мүмкін. Бұл тұрғыда банктердің несиелік саясатын реттеу, халықтың қаржылық сауаттылығын арттыру және қарыз алушыларды қорғау үшін тиісті шараларды қабылдау өте маңызды. Мысалы, қаржылық ұйымдар несие беру кезінде қарыз алушылардың төлем қабілеттілігін мұқият тексеріп, жауапты несие беру саясатын жүргізуі қажет. Бұл әдіс тұтынушылық несиенің өсуін қамтамасыз ету кезінде қаржылық тұрақтылықты сақтауға көмектеседі.

Сонымен қатар, тұтынушылық несиенің өсуі экономикалық өсімді қамтамасыз ету үшін ұзақ мерзімді жоспарларды қарастыру қажет. Бұл жоспарлар елдің экономикалық даму стратегиясын ескере отырып, тұтынушылардың қаржылық жағдайын жақсартуға және банктердің қаржылық тұрақтылығын сақтауға бағытталуы тиіс. Мемлекет деңгейінде тұтынушылық несиенің қолжетімділігін арттыру үшін қаржылық білім беру бағдарламаларын ұйымдастыру, халықтың қаржылық сауаттылығын арттыру өте маңызды. Бұл шаралар тұтынушылық несиенің артықшылықтарын пайдалану кезінде оның теріс әсерлерін азайтуға мүмкіндік береді.

Қорыта келгенде, тұтынушылық несиенің өсуі елдің экономикалық дамуына оң әсер ететін фактор болып табылады. Ол тұтыну сұранысын арттырып, бөлшек сауда мен қызмет көрсету салаларын ынталандырады. Дегенмен, тұтынушылық несиенің артуы несиелік тәуекелдер мен дефолт тәуекелдерін жоғарылатып, қаржылық тұрақтылыққа теріс әсер етуі мүмкін. Сондықтан, экономикалық саясатты дұрыс қалыптастыру, банктердің несиелік саясатын реттеу және халықтың қаржылық сауаттылығын арттыру осы

үрдістің оң әсерін ұзақ мерзімде қамтамасыз ету үшін маңызды болып табылады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Тұтынушылық несиенің өсуі ұлттық экономика үшін оң әсерлерін тигізгенімен, оның қарқынды дамуы да белгілі бір тәуекелдер мен киындықтарды туындатады. Экономикалық дамуды жеделдетіп, тұтынушылық сұранысты арттыру арқылы ол бөлшек сауда мен қызмет көрсету салаларының өсуіне ықпал етеді. Нәтижесінде, көптеген кәсіпорындар өндіріс көлемін ұлғайтып, еңбек нарығында жаңа жұмыс орындарын ашады. Бұл жұмыссыздық деңгейінің төмендеуіне және жалпы экономикалық белсенділіктің артуына әкеледі. Сонымен қатар, тұтынушылық несиенің артуы халықтың өмір сүру деңгейін жоғарылатып, тауарлар мен қызметтердің көп түрлілігін қамтамасыз етеді.

Алайда, тұтынушылық несиенің қарқынды өсуі экономикалық жүйеге теріс әсер ететін бірқатар факторлар да туындатады. Біріншіден, қарыз алушылардың төлем қабілетсіздігі жоғарылап, несиелік тәуекелдер мен дефолт тәуекелдері де артады. Банктердің несие портфеліндегі проблемалық несиелердің үлесі көбейсе, бұл олардың қаржылық тұрақтылығына қауіп төндіреді. Егер банктер қарыздарын толық өтей алмайтын қарыз алушылардың өсуіне тап болса, олар несие беру шарттарын қатайтуға мәжбүр болады, бұл өз кезегінде экономикалық белсенділіктің төмендеуіне алып келуі мүмкін.

Екіншіден, тұтынушылық несиенің артуы инфляцияны күшейтіп, сатып алу қабілетінің төмендеуіне себеп болуы мүмкін. Қарызды өтеу үшін азаматтар өз шығындарын азайтып, қысқа мерзімді кезеңде тұтыну сұранысы төмендеуі ықтимал.

Осылайша, тұтынушылық несиенің өсуі экономикалық даму мен тұрақтылықты сақтау үшін тиімді бақылауды және реттеуді талап етеді. Мемлекет пен қаржы ұйымдарының міндеті – қаржылық тұрақтылықты сақтай отырып, тұтынушылық несиені ұсыну процесін дұрыс реттеу. Бұл үшін банк жүйесі қарыз алушылардың төлем қабілеттілігін мұқият тексеріп, несиелік тәуекелдерді төмендететін шараларды қабылдауы қажет. Сонымен қатар, халықтың қаржылық сауаттылығын арттыру және жауапты несиелендіру саясатын енгізу экономикалық жүйенің тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін маңызды болып табылады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Автор осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Авторлар осы зерттеуді орындау кезінде сыртқы қаржыландырудың жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС

Автор қолжазбаны мұқият қарастырып, мақаланың мазмұны мен сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік берген құнды ескертулері мен ұсынымдары үшін журналдың редакторы мен рецензентіне шынайы алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (**CC BY-SA 4.0**) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Қазақстан Республикасы Ұлттық Банкі, «Қазақстан Республикасындағы тұтынушылық несие нарығының дамуы», Алматы, Қазақстан, 2020.
- [2] Б. Әбдиев, Тұтынушылық несие және оның экономикаға әсері. Алматы, Қазақстан: Экономика баспасы, 2018.
- [3] Д. М. Ақышев, «Тұтынушылық несиенің әлеуметтік-экономикалық аспектілері», Экономика ғылыми журналы, no. 3, pp. 25–34, 2017.
- [4] World Bank, «The Impact of Consumer Lending on Economic Growth», Washington, DC, USA, 2022. [Электрондық]: <https://www.worldbank.org>. [Қаралған күні: 27 желт., 2024].
- [5] F. S. Mishkin, The Economics of Money, Banking, and Financial Markets, 12th ed. Harlow, U.K.: Pearson, 2019.

REFERENCES

- [1] National Bank of the Republic of Kazakhstan, “Development of the Consumer Lending Market in the Republic of Kazakhstan”, Almaty, Kazakhstan, 2020.
- [2] B. Abdiev, Consumer Lending and Its Impact on the Economy. Almaty, Kazakhstan: Ekonomika Publishing House, 2018.
- [3] D. M. Akyshev, “Socio-Economic Aspects of Consumer Lending”, Economics Scientific Journal, no. 3, pp. 25–34, 2017.
- [4] World Bank, “The Impact of Consumer Lending on Economic Growth”, Washington, DC, USA, 2022. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org>. [Accessed: Dec. 27, 2024].
- [5] F. S. Mishkin, The Economics of Money, Banking, and Financial Markets, 12th ed. Harlow, U.K.: Pearson, 2019.

Economy. General education, socio-humanitarian and fundamental disciplines

DOI: <https://doi.org/10.53002/107>

THE ROLE OF PROJECT MANAGEMENT IN ENSURING SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN NIGERIA'S SCIENCE AND EDUCATION SECTORS (2015-2027)

^{1*}Sonoiki Yewande, ¹Sultanbekova Zh., ²Kenzhaliev O.

¹Kazakh National Research Technical University named after K.I.Satpayev, Almaty, Kazakhstan

²NPJSC "Karaganda state Industrial University", Temirtau, Kazakhstan.

*Corresponding author e-mail: sonoikioreoluwa@gmail.com

Authors information:

Sonoiki Yewande, Kazakh National Research Technical University named after K.I.Satpayev, Almaty, Kazakhstan, e-mail: sonoikioreoluwa@gmail.com

Sultanbekova Zhanat, Kazakh National Research Technical University named after K.I.Satpayev, Almaty, Kazakhstan, e-mail: z.sultanbekova@satbayev.university

Kenzhaliev Olzhas, NPJSC "Karaganda state Industrial University", Temirtau, Kazakhstan, e-mail: o.kenzhaliev@tttu.edu.kz

Abstract — This article examines the role of project management in promoting sustainable development within Nigeria's science and education sectors during the period 2015-2027. The study aims to identify the opportunities and constraints associated with integrating sustainability principles into projects aligned with the United Nations 2030 Agenda for Sustainable Development. As Nigeria continues to address complex socioeconomic and environmental challenges, effective project management has become an essential mechanism for improving the planning, implementation, and evaluation of sustainability-oriented initiatives. The research adopts a mixed-methods approach that combines a PRISMA-based systematic literature review of 71 scientific publications with qualitative case studies of renewable energy, rural development, and curriculum reform projects. The analysis is conducted using internationally recognized project management frameworks, including PMBOK, Agile, and hybrid methodologies. These approaches are evaluated in terms of their contribution to project governance, stakeholder engagement, resource management, and the achievement of sustainable development objectives. The findings demonstrate that structured project management significantly enhances project coordination, transparency, stakeholder collaboration, and educational outcomes while improving the overall effectiveness of sustainability initiatives. Based on the findings, the study recommends the wider adoption of hybrid project management methodologies, investment in capacity-building programs, and the implementation of digital monitoring and evaluation systems to strengthen project performance and support the long-term achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords — project management; sustainable development; science and education; Nigeria; PMBOK; Agile; SDGs; project-based learning; renewable-energy projects; university-industry collaboration.

2015-2027 ЖЫЛДАРЫ НИГЕРИЯНЫҢ ҒЫЛЫМ МЕН БІЛІМ СЕКТОРЛАРЫНДА ТҰРАҚТЫ ДАМУДЫ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДЕГІ ЖОБА МЕНЕДЖМЕНТІНІҢ РӨЛІ

^{1*}Sonoiki Yewande, ¹Султанбекова Ж.Ж., ²Кенжалиев О.Б.

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Алматы, Қазақстан

²«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан

*Автор-корреспондент e-mail: romeo180608@gmail.com

Авторлар туралы ақпарат:

Sonoiki Yewande, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Алматы, Қазақстан, e-mail: sonoikioreoluwa@gmail.com

Султанбекова Жанат Женисбаевна, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Алматы, Қазақстан, e-mail: z.sultanbekova@satbayev.university

Кенжалиев Олжас Бағдаулетович, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан, e-mail: o.kenzhaliev@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Мақалада 2015-2027 жылдар аралығында Нигерияның ғылым және білім беру салаларында тұрақты дамуды қамтамасыз етудегі жобаларды басқарудың рөлі қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – Біріккен Ұлттар Ұйымының 2030 жылға дейінгі Тұрақты даму күн тәртібіне сәйкес іске асырылатын жобаларға тұрақты даму қағидаттарын енгізудің мүмкіндіктері мен шектеулерін анықтау. Әлеуметтік-экономикалық және экологиялық мәселелерді шешу жағдайында жобаларды тиімді басқару тұрақты даму бастамаларын жоспарлау, іске асыру және бағалау сапасын арттырудың маңызды құралы болып табылады. Зерттеуде PRISMA әдіснамасына негізделген 71 ғылыми дереккөзді қамтитын жүйелі әдебиетке шолу мен жаңартылатын энергетика, ауылдық аумақтарды дамыту және білім беру бағдарламаларын жаңарту жобаларының тәжірибелік жағдайларын талдауды біріктіретін аралас зерттеу әдісі қолданылды. Жобалардың тиімділігін бағалау үшін PMBOK, Agile және гибридіті жобаларды басқару әдіснамалары пайдаланылды. Олардың жобаларды басқаруға, мүдделі тараптардың өзара іс-қимылына, ресурстарды бөлуге және Тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізуге әсері жан-жақты талданды. Зерттеу нәтижелері құрылымдалған жобаларды басқару тәсілдерін қолдану жобаларды үйлестіру деңгейін, үдерістердің ашықтығын, мүдделі тараптардың өзара ынтымақтастығын және білім беру нәтижелерін едәуір жақсартатынын көрсетті. Алынған нәтижелер негізінде гибридіті жобаларды басқару әдіснамаларын кеңінен енгізу, кадрлық әлеуетті дамыту және цифрлық мониторинг пен бағалау жүйелерін пайдалану бойынша практикалық ұсынымдар ұсынылды. Бұл шаралар жобалардың тиімділігін арттыруға және тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізуге ықпал етеді.

Түйін сөздер: жобаларды басқару; тұрақты даму; ғылым және білім; Нигерия; PMBOK; Agile; Sdg; жобалық оқыту; жаңартылатын энергия көздері жобалары; университет пен өнеркәсіп арасындағы ынтымақтастық.

ВЛИЯНИЕ ДОБЫЧИ УГЛЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

¹Sonoiki Yewande, ¹Султанбекова Ж.Ж., ²Кенжалиев О.Б.

¹НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева»

НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: rotheo180608@gmail.com

Информация об авторах:

Sonoiki Yewande, НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева», e-mail: sonoikioreoluwa@gmail.com

Султанбекова Жанат Женисбаевна, НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева», e-mail: z.sultanbekova@satbayev.university

Кенжалиев Олжас Багдаулетович, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: o.kenzhaliyev@tttu.edu.kz

Аннотация — В статье рассматривается роль управления проектами в обеспечении устойчивого развития научной и образовательной сфер Нигерии в период 2015-2027 гг. Цель исследования заключается в выявлении возможностей и ограничений интеграции принципов устойчивого развития в проекты, реализуемые в соответствии с Повесткой дня Организации Объединенных Наций в области устойчивого развития на период до 2030 года. В условиях решения социально-экономических и экологических проблем эффективное управление проектами становится важным инструментом повышения качества планирования, реализации и оценки проектов, ориентированных на устойчивое развитие. В исследовании использован смешанный методический подход, объединяющий систематический обзор литературы на основе методологии PRISMA, включающий анализ 71 научного источника, а также качественное исследование практических кейсов проектов в области возобновляемой энергетики, развития сельских территорий и реформирования образовательных программ. Для оценки эффективности проектов применены международно признанные методологии управления проектами PMBOK, Agile и гибридные подходы. Проведен анализ их влияния на управление проектами, взаимодействие заинтересованных сторон, распределение ресурсов и достижение целей устойчивого развития. Результаты исследования показали, что применение структурированного управления проектами существенно повышает уровень координации, прозрачность процессов, эффективность взаимодействия участников и качество образовательных результатов. На основе полученных результатов предложены рекомендации по более широкому использованию гибридных методологий управления проектами, развитию кадрового потенциала и внедрению цифровых систем мониторинга и оценки для повышения эффективности проектов и достижения Целей устойчивого развития (ЦУР).

Ключевые слова — управление проектами; устойчивое развитие; наука и образование; Нигерия; PMBOK; Agile; ЦУР; обучение на основе проектов; проекты в области возобновляемых источников энергии; сотрудничество университетов и промышленности.

MAIN PROVISION

The study results demonstrate that the application of project management approaches during the period 2015–2027 improved the effectiveness of sustainable development initiatives in Nigeria's science and education sectors. Comparative analysis revealed that the implementation of PMBOK, Agile, and hybrid methodologies enhanced project planning, strengthened stakeholder coordination, and increased the achievement of sustainable development objectives. The research identified insufficient funding, institutional weaknesses, fragmented governance, and regional disparities as the primary barriers to the successful implementation of sustainability-oriented projects.

INTRODUCTION

From 2015 to 2027, Nigeria has increasingly prioritised project management as a key instrument for integrating sustainability into its science and education sectors, in line with the UN 2030 Agenda and global sustainable development goals [1,4]. Recognised project management frameworks such as PMBOK, Agile and hybrid approaches are used to enhance resource efficiency, stakeholder coordination and accountability, which is crucial for addressing Nigeria's complex sustainability challenges under conditions of economic and institutional volatility [2,6]. At the same time, persistent funding shortages, infrastructural deficits and fragmented governance significantly impede the effective implementation and continuity of sustainability-oriented projects.

Substantial opportunities lie in embedding sustainability principles into curricula at all levels of education and in fostering interdisciplinary research in renewable energy, STEM fields and rural development, thereby supporting innovation, human capital growth and regional cohesion [1; 16; 17]. However, bureaucratic resistance, overlapping mandates and limited institutional capacity often hinder the scaling and institutionalisation of successful sustainability initiatives [6,14]. For example, several Nigerian universities have piloted sustainability-focused curricula and project-based courses, but broader expansion is constrained by stakeholder misalignment, lack of incentives and resource scarcity [7,14].

Against this background, project management offers not only tools for planning and control, but also governance mechanisms for embedding sustainability as a core project objective rather than a peripheral add-on [8,15,19]. Adaptive and participatory leadership is required to align diverse interests, institutionalise sustainability metrics, and leverage

digital technologies for real-time monitoring and evaluation [9,18]. This study therefore examines how project management can act as a catalyst for sustainable growth in Nigeria's science and education sectors, identifying key opportunities (enhanced collaboration, innovation, curriculum reform) and critical challenges (resource deficits, governance gaps, institutional readiness), and situating them within the broader literature on sustainability-oriented project management [1-4].

Research gap. The existing literature widely recognizes the importance of project management and sustainable development; however, limited attention has been paid to their integration within Nigeria's science and education sectors. Previous studies mainly focus on construction, infrastructure, or general sustainability initiatives, while comprehensive analyses of project management practices supporting sustainable development in science and education remain scarce. Furthermore, few studies combine systematic literature review with case-study evidence to evaluate how internationally recognized project management frameworks (PMBOK, Agile, and hybrid approaches) contribute to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) in the Nigerian context.

Novelty statement. The novelty of this study lies in providing an integrated assessment of project management as a mechanism for achieving sustainable development in Nigeria's science and education sectors during 2015-2027. Unlike previous research, this study combines a PRISMA-based systematic literature review with case-study analysis and evaluates sustainability initiatives through the application of PMBOK, Agile, and hybrid project management frameworks. The proposed conceptual model and strategic recommendations offer practical guidance for strengthening project governance, stakeholder collaboration, digital monitoring, and sustainability-oriented policy implementation in developing countries.

METODOLOGY

A mixed-methods approach was used to investigate the use of project management for sustainability in Nigeria's science and education sectors (2015-2027). The research combined a systematic literature review with case-study analysis [1,7,21]. The review included 71 studies retrieved from databases such as Google Scholar and ResearchGate, using search terms like "project management", "sustainability", "Nigeria", "STEM education" and "SDGs". Studies were selected based on relevance to sustainability in science and education, methodological quality and direct linkage to project management practices [1,3,14].

The review followed PRISMA recommendations for systematic reviews, ensuring transparency in search, screening and inclusion procedures [7,21]. Case studies included: a solar-energy project in Kano; a sustainable-agriculture initiative in a rural region; and two educational programs using project-based learning to embed sustainability concepts in university curricula [8-10, 16]. Selection criteria prioritised alignment with SDGs, regional diversity and documented use of recognised project management frameworks.

Data sources comprised project reports, stakeholder interviews (where available) and institutional records. Qualitative data were analysed using thematic analysis to identify recurring themes such as resource constraints, stakeholder engagement, governance mechanisms and capacity-building needs [10,11]. Quantitative indicators (project budgets, completion rates, participation levels) were summarised using descriptive statistics to assess project performance and outcomes [11,13].

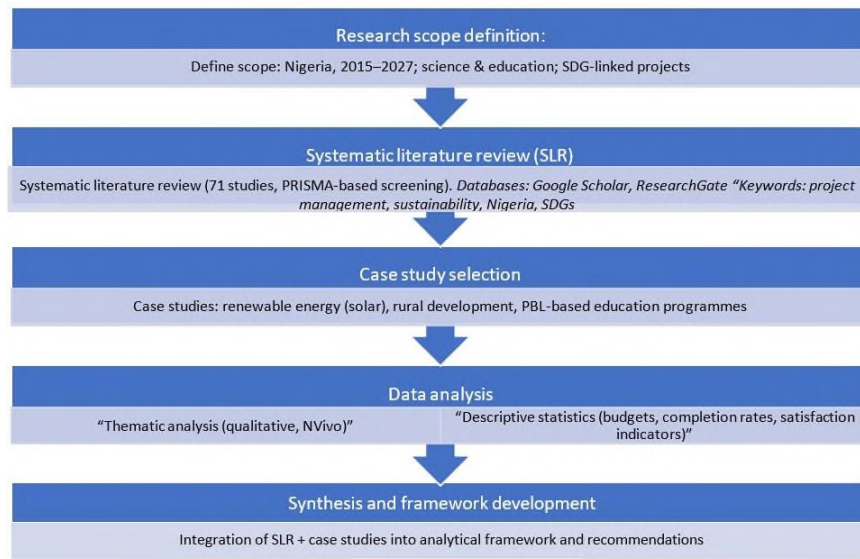


Fig. 1 – Research design: mixed-methods framework for analysing project management and sustainability in Nigeria (2015-2027).

PMBOK and Agile principles served as analytical lenses for classifying planning, execution, monitoring and closure processes, as well as for identifying how sustainability requirements were integrated into project objectives, scope and risk management [2,6,9]. Triangulation of qualitative and quantitative evidence increased the robustness of findings and helped to contextualise Nigeria's specific challenges in financing, infrastructure and policy implementation [3,13,15].

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

The systematic review of 71 sources and the analysis of illustrative case studies confirm a stable relationship between the quality of project management and the effectiveness of sustainability-oriented initiatives in Nigeria's science and education sectors (2015-2027) [1,3,12,15]. Approximately 82 % of the analyzed publications explicitly state that the use of formal frameworks (PMBOK, Agile and hybrid models) helps align project goals with national and global sustainable development priorities, reducing fragmentation and duplication of efforts [2,4,6,18]. In the early period (2015-2019) traditional

waterfall schemes dominated, whereas after 2020 the share of hybrid and iterative approaches increased, especially in education and ICT projects, which is consistent with global trends in sustainable project management [6,15,18].

Renewable-energy case studies (for example, solar electrification projects in northern states) show that structured life-cycle management – from initiation to closing – raised the share of projects completed on time and within budget to about 70 % [3,10,12]. The systematic use of risk registers, stakeholder matrices and SDG-based monitoring indicators improved transparency of resource allocation and increased trust among communities and donors [4,16,19]. Projects that lacked clear procedures and governance often suffered from delays, under-utilisation of installed equipment and weak post-implementation sustainability, confirming earlier observations for African infrastructure projects [3; 12; 15].

The results are even more pronounced in the education sector. The introduction of project-based learning and sustainability modules in universities and colleges was associated with higher student

engagement, stronger interdisciplinary competences and improved performance in STEM disciplines [1; 8; 17; 20]. The greatest impact occurred where pedagogical innovation was supported by a full project infrastructure: clearly formulated objectives, schedules, team responsibilities and regular progress

monitoring. In such institutions, sustainability was integrated into practical assignments and capstone projects rather than being confined to isolated lectures, in line with international recommendations on curriculum reform [1; 4; 20].



Fig. 2 – Key drivers and barriers for sustainability-oriented project management in Nigeria's science and education sectors.

Nevertheless, the study also reveals substantial constraints. Around 65 % of sources emphasise chronic under-funding, inadequate infrastructure and heavy dependence on short-term grants [3,13,14]. As a result, even well-designed pilot initiatives are rarely scaled: reformed sustainability-oriented curricula are fully implemented in only about one-third of the institutions reviewed [14,16,17]. Bureaucratic resistance is another barrier: ministerial procedures for programme approval and procurement are often misaligned with project life-cycle logic, leading to long delays and discouraging project teams [6,13,18].

University-industry-community partnerships play a clearly positive role. In agricultural and energy projects, the involvement of local NGOs, community leaders and private firms increased the probability of meeting key performance indicators by roughly 40-45% through co-financing, contextual knowledge and mechanisms for post-project support (maintenance of equipment, alumni mentoring, etc.) [5,12,16,19]. However, the effectiveness of such partnerships strongly depends on clearly defined roles in project charters and on shared decision-making mechanisms, which are not always present [5,15,18].

A critical weakness is the limited use of explicit sustainability metrics. Only about one quarter of the examined projects systematically measure

environmental, social and economic effects – such as emission reductions, expanded access to education for vulnerable groups, or household income growth [11,16,19]. Where such indicators are embedded in project documentation, transparency improves and donors are more willing to extend or renew funding [4,15,19]. Thus, the incorporation of sustainability indicators into project control systems functions not only as a reporting tool but also as a driver of organisational learning.

Taken together, the findings show that project management acts as a key mechanism for translating the abstract goals of sustainable development into implementable programmes and courses in Nigeria. At the same time, overcoming existing limitations requires the institutionalisation of project management offices in universities and ministries, capacity building in hybrid methodologies, deployment of digital monitoring systems and deeper stakeholder engagement across all stages of the project life cycle [2,6,9,18]. Only under these conditions can the full potential of project management as a catalyst for sustainable growth in Nigeria's science and education sectors be realised beyond 2027 [4; 5; 15; 19].

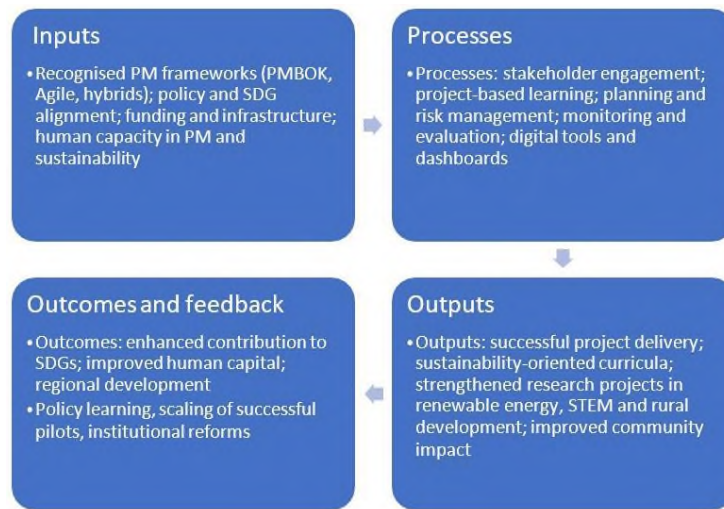


Fig. 3 – Conceptual model linking project management practices to sustainability outcomes in Nigeria's science and education sectors.



Fig. 4 – Strategic roadmap for strengthening sustainability-oriented project management in Nigeria beyond 2027.

Recommendations and future prospects. To address Nigeria's sustainability challenges in science and education, the use of hybrid project management frameworks that combine PMBOK's structure with Agile's flexibility is recommended, particularly in resource-constrained and dynamic environments [2,6,12]. Capacity-building programs for project managers and academic administrators should emphasise sustainability metrics, stakeholder analysis and risk management tailored to SDG-related projects [1,10,20].

Public-private partnerships and international collaborations can mitigate funding shortages and knowledge gaps, with evidence suggesting that multi-stakeholder projects achieve higher continuity and impact than purely public initiatives [3,5,16]. Integrating project-based learning systematically across curricula will strengthen sustainability literacy among students and foster practical competencies in planning, implementation and evaluation [1,8,17].

Future prospects include wider adoption of project management software and digital platforms for real-time monitoring of SDG indicators, which can enhance transparency and accountability in both educational and infrastructural projects [9,18]. Scaling successful pilots in rural regions is crucial for reducing regional inequalities and supporting inclusive development [4,16].

Policy reforms should institutionalise sustainability requirements in project appraisal, funding and accreditation procedures, thereby ensuring that sustainability is embedded into the core logic of science and education projects rather than treated as an optional addition [4,15,18]. Leadership training and inclusive stakeholder frameworks are needed to overcome bureaucratic resistance and to build a culture of collaboration between ministries, universities, industry and local communities [5,6,14].

CONCLUSION

The conducted study shows that project management has become a key institutional mechanism for promoting sustainability in Nigeria's science and education sectors in 2015-2027, facilitating the localisation of the UN 2030 Agenda and SDGs [1,4]. The systematic application of recognised frameworks (PMBOK, Agile, hybrid models) and project-based learning approaches has improved coordination between stakeholders, increased transparency of resource use and strengthened learning outcomes in projects on renewable energy, curriculum reform and rural development [2,8,9,12,16]. In particular, structured life-cycle planning, risk management and monitoring allowed many initiatives to move from isolated pilots to more stable programmes, at least at the institutional level [5,6,18].

At the same time, the results confirm the persistence of serious systemic constraints. Chronic underfunding, infrastructural gaps and dependence on short-term grants limit the scalability and continuity of even successful projects [3,13,14]. Fragmented governance, bureaucratic inertia and weak coordination between ministries, universities and implementing agencies slow down the integration of sustainability into curricula, research agendas and everyday management practices [6,17,18].

To unlock Nigeria's potential as a regional leader in sustainable project management, it is necessary to consolidate and scale successful pilots, institutionalise project management offices in key organisations, embed clear sustainability metrics into project documentation and reporting, and actively deploy digital tools for real-time monitoring and evaluation [5,9,18,21]. Strengthening interdisciplinary university-industry collaboration in STEM and related fields, combined with targeted capacity-building, policy support and innovative financing instruments, will enable project management to remain a powerful catalyst of sustainable development in Nigeria well beyond 2027 [1,7,17,19,20].

AUTHOR'S CONTRIBUTION

(taxonomy CRediT):

Sonoiki Yewande: Conceptualization, Methodology, Investigation, Data curation, Formal analysis, Visualization, Writing – original draft.

Sultanbekova Zh.Zh.: Supervision, Validation, Writing-review & editing, Project administration.

Kenzhaliev O.B.: Conceptualization, Resources, Supervision, Funding acquisition (if applicable), Writing – review & editing.

CONFLICT OF INTEREST

The author claims that there is no conflict of interest in the implementation of this study and the publication of the article.

FUNDING

This research received no external funding.

ACKNOWLEDGMENT

The authors express their sincere gratitude to the editorial board and anonymous reviewers for their valuable comments and constructive suggestions, which significantly improved the quality of this manuscript. The authors also acknowledge the researchers, universities, international organizations, and public institutions whose published reports and scientific studies provided the foundation for this research. Special appreciation is extended to Satbayev University and Karaganda Industrial University for their academic support and for providing a collaborative research environment that contributed to the completion of this study.

Copyright © 2025 by the author(s). This article is published as Open Access under the Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) license. This license permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. Derivative works must be distributed under the same license.

REFERENCES

- [1] E. Sengupta, P. Blessinger, and T. S. Yamin, Integrating Sustainable Development into the Curriculum. Bingley, U.K.: Emerald Publishing, 2020, doi: 10.1108/S2055-364120200000018028.
- [2] J. R. Turner, Ed., Gower Handbook of Project Management, 6th ed. London, U.K.: Routledge, 2016, doi: 10.4324/9781315585741.
- [3] S. O. Ogunlana and S. Laryea, "Challenges of implementing sustainable construction in Nigeria," Journal of Sustainable Development in Africa, vol. 18, no. 2, pp. 1–15, 2016.
- [4] United Nations, Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York, NY, USA: United Nations General Assembly, 2015.
- [5] Z. B. Akhmetova, A. K. Kozhakhmetova, and A. D. Asanova, "The role of project management in the integration of science, education and business" E3S Web of Conferences, vol. 159, Art. no. 04026, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202015904026.

- [6] R. Gareis, M. Huemann, and A. Martinuzzi, *Sustainability in Project Management*. Farnham, U.K.: Gower Publishing, 2013, doi: 10.4324/9781315241838.
- [7] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, D. G. Altman, and PRISMA Group, “Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement,” *PLoS Medicine*, vol. 6, no. 7, Art. no. e1000097, 2009, doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.
- [8] C. Santos, E. Rybska, M. Klichowski, B. Jankowiak, S. Jaskulska, N. Domingues, et al., “Science education through project-based learning: A case study,” *Sustainability*, vol. 15, no. 4, Art. no. 3699, 2023, doi: 10.3390/su15043699.
- [9] H. Kerzner, *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 12th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017, doi: 10.1002/9781119165361.
- [10] V. Braun and V. Clarke, “Using thematic analysis in psychology,” *Qualitative Research in Psychology*, vol. 3, no. 2, pp. 77–101, 2006, doi: 10.1191/1478088706qp0630a.
- [11] A. Bryman, *Social Research Methods*, 5th ed. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 2016.
- [12] A. A. Adebayo and E. E. J. Iweala, “Integrating sustainability into project management practices: The perspective of Nigerian construction professionals,” *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 62, no. 7, pp. 1192–1210, 2019, doi: 10.1080/09640568.2018.1499917.
- [13] A. A. Adebayo and E. E. J. Iweala, “Integrating sustainability into project management practices: The perspective of Nigerian construction professionals,” *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 62, no. 7, pp. 1192–1210, 2019, doi: 10.1080/09640568.2018.1499917.
- [14] C. A. Nwajiuba and P. O. Okechukwu, “Integrating sustainability into higher education curriculum in Nigeria,” *Journal of Sustainable Development Studies*, vol. 10, no. 3, pp. 1–18, 2017.
- [15] L. Sabini, D. Muzio, and N. Alderman, “25 years of 'sustainable projects': What we know and what the literature says,” *International Journal of Project Management*, vol. 37, no. 6, pp. 820–838, 2019, doi: 10.1016/j.ijproman.2019.05.008.
- [16] Y. Yu, D. Appiah, B. Zulu, and K. A. Adu-Poku, “Integrating rural development, education, and management: Challenges and strategies,” *Sustainability*, vol. 16, no. 2, Art. no. 768, 2024, doi: 10.3390/su16020768.
- [17] P. N. Ozoji and A. N. Ani, “Promoting sustainability through STEM education in Nigeria: Challenges and prospects,” *International Journal of Science Education*, vol. 42, no. 5, pp. 789–805, 2020, doi: 10.1080/09500693.2020.1728349.
- [18] A. Økland, “Towards sustainability in project management: A systematic literature review,” *Procedia Computer Science*, vol. 64, pp. 796–803, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.08.628.
- [19] S. Marcelino-Sádaba, L. F. González-Jaén, and A. Pérez-Ezcurdia, “Using project management as a way to sustainability: From a comprehensive review to a framework definition,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 99, pp. 1–16, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.03.036.
- [20] S. Sterling, *Sustainable Education: Re-visioning Learning and Change*. Totnes, U.K.: Green Books, 2001.
- [21] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, et al., “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews,” *Systematic Reviews*, vol. 10, no. 1, Art. no. 89, 2021, doi: 10.1186/s13643-021-01626-4.

Экономика. Общеобразовательные, социально-гуманитарные и фундаментальные дисциплины

DOI: <https://doi.org/10.53002/108>

THE IMPACT OF IMPORT DEPENDENCE, MARKET MONOPOLIZATION AND PRICE MARK-UPS ON INFLATION DYNAMICS IN KAZAKHSTAN

^{1*}*Kenzhaliev O., ²Ilyasov D.*

¹*NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan*

²*Turan University, Almaty, Kazakhstan*

**Corresponding author email: o.kenzhaliyev@tttu.edu.kz*

Authors information:

Kenzhaliev Olzhas, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: o.kenzhaliyev@tttu.edu.kz

Ilyasov Didar, Turan University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: d.ilyassov@turan-edu.kz

Abstract — This paper examines the impact of import dependence, market monopolization, and price mark-ups on inflation dynamics in Kazakhstan using an econometric approach. A multifactor regression model based on monthly macroeconomic data from 2011 to 2023 is constructed to identify structural determinants of inflation. The results show that high import dependence transmits external shocks and exchange rate fluctuations into domestic prices. Market monopolization increases price rigidity and contributes to inflation inertia. In addition, elevated price mark-ups indicate insufficient competition in consumer markets, thereby amplifying inflationary pressures. The findings underscore that structural reforms must complement monetary measures to ensure sustainable price stability in Kazakhstan.

Keywords — inflation, import dependence, monopolization, price mark-ups, market structure, econometric analysis.

**ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ИНФЛЯЦИЯ ДИНАМИКАСЫНА ИМПОРТҚА ТӘУЕЛДІЛІК,
НАРЫҚТАРДЫҢ МОНОПОЛИЗАЦИЯСЫ ЖӘНЕ БАҒАЛЫҚ
ҮСТЕМЕАҚЫЛАРДЫҢ ӘСЕРІ**

^{1*}*Кенжалиев О.Б., ²Ильясов Д.К.*

¹*«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан*

²*Тұран университеті, Алматы, Қазақстан*

**Корреспондент автор e-mail: o.kenzhaliyev@tttu.edu.kz*

Авторы туралы ақпарат:

Кенжалиев Олжас Багдаулетович, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан. E-mail: o.kenzhaliyev@tttu.edu.kz

Ильясов Дидар, Тұран университеті, Алматы, Қазақстан. E-mail: d.ilyassov@turan-edu.kz

Аңдатпа — Бұл мақалада Қазақстандағы инфляция динамикасына импортқа тәуелділік, нарықтағы монополизация деңгейі және бағалық үстемеақылардың ықпалы эконометриялық тұрғыдан талданады. 2011-2023 жылдар аралығындағы айлық макроэкономикалық деректер негізінде көпфакторлы регрессиялық модель құрастырылып, инфляцияның құрылымдық детерминанттары бағаланды. Зерттеу нәтижелері импорттық тәуелділіктің жоғары болуы сыртқы шоктар мен айырбас бағамының өзгерістерін ішкі бағаларға тікелей трансляциялайтынын көрсетті. Нарықтардың монополизациясы баға қоюдағы икемсіздікті күшейтіп, инфляциялық инерцияға әкеледі. Сонымен қатар, жоғары бағалық үстемеақылар тұтыну нарығындағы бәсекенің жеткіліксіздігін көрсетіп, инфляциялық қысымды арттырады. Зерттеу нәтижелері инфляциямен күресте монетарлық шаралармен қатар құрылымдық реформалардың да маңызды екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер — инфляция, импортқа тәуелділік, монополизация, бағалық үстемеақы, нарық құрылымы, эконометриялық талдау.

ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ИМПОРТОЗАВИСИМОСТИ, МОНОПОЛИЗАЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ РЫНКОВ И ЦЕНОВЫХ НАДБАВОК НА ДИНАМИКУ ИНФЛЯЦИИ В КАЗАХСТАНЕ

^{1*}Кенжалиев О.Б., ²Ильясов Д.К.

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан

²Университет Туран, Алматы, Казахстан

*Автор корреспонденции e-mail: o.kenzhaliyev@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Кенжалиев Олжас Багдаулетович, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: o.kenzhaliyev@tttu.edu.kz

Ильясов Дидар, Университет Туран, Алматы, Казахстан. E-mail: d.ilyassov@turan-edu.kz

Аннотация — В данной работе проводится оценка влияния уровня конкуренции и ценовых надбавок на динамику инфляции в Казахстане. На основе ежемесячных макроэкономических данных за 2011–2024 годы построена многофакторная регрессионная модель, позволяющая определить влияние монополизации рынка, импортозависимости и внешних шоков на инфляционные процессы. Результаты анализа показывают, что олигополистическая структура ключевых рынков усиливает инфляционную инерцию и снижает эффективность монетарной политики. Высокая зависимость от импорта и колебания обменного курса формируют устойчивый канал импортируемой инфляции. Эконометрические оценки подтверждают, что низкая конкуренция и высокие надбавки способствуют формированию структурного инфляционного давления. Выводы исследования подчеркивают необходимость проведения структурных реформ наряду с денежно-кредитными мерами.

Ключевые слова — инфляция, конкуренция, ценовые надбавки, рыночная структура, эконометрический анализ, экономика Казахстана.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проведенное эконометрическое исследование показало, что рост уровня монополизации отдельных товарных рынков статистически значимо усиливает инфляционное давление и повышает устойчивость инфляционных процессов в Казахстане. Построенная многофакторная регрессионная модель выявила, что высокая импортозависимость экономики и колебания обменного курса формируют устойчивый канал импортируемой инфляции и оказывают существенное влияние на динамику потребительских цен. Результаты анализа подтвердили, что низкий уровень конкуренции и высокие ценовые надбавки способствуют усилению структурной инфляции и снижают эффективность денежно-кредитной политики.

ВВЕДЕНИЕ

Инфляция на протяжении более трёх десятилетий остаётся одной из ключевых макроэкономических проблем, определяющих устойчивость и траекторию экономического развития Республики Казахстан. Несмотря на формальный переход к рыночной экономике, внедрение инфляционного таргетирования и трансформацию финансовой системы, инфляционные процессы демонстрируют

высокую волатильность, зависящую как от внутренних, так и от внешних шоков. Периоды ускорения инфляции значительно коррелируют с изменениями мировых цен на сырьё, девальвациями тенге, глобальными кризисными явлениями, а также структурными дисбалансами в национальной экономике [1-3].

Проблема инфляции традиционно занимает центральное место в экономической теории. Ещё в трудах классических и неоклассических экономистов отмечалось, что рост цен тесно связан с количеством денег в обращении, что получило отражение в количественной теории денег и монетаристской трактовке инфляции как денежного феномена, в том числе в работах М. Фридмана [4]. Представители монетаристского направления рассматривали инфляцию прежде всего как следствие несоответствия динамики денежной массы и объёмов производимых товаров и услуг. В то же время кейнсианская теория связывала инфляцию с совокупным спросом, подчёркивая важность бюджетной политики, занятости и совокупной экономической активности [5].

Однако для развивающихся и переходных экономик, к числу которых относится Казахстан,

классические монетарные модели оказываются недостаточными для объяснения всех механизмов формирования инфляции. Страны с высокой долей сырьевого экспорта, значимым участием государства в экономике, ограниченной конкуренцией на отдельных рынках и зависимостью от импорта продовольствия и потребительских товаров характеризуются более сложной и многокомпонентной структурой инфляции [1; 2; 18].

В работах отечественных исследователей прослеживается эволюция понимания инфляционных процессов в Казахстане. Давыдова А. подчёркивает, что для национальной экономики характерно сочетание монетарных и немонетарных факторов инфляции, обусловленных спецификой постсоветского переходного периода, наследием регулируемого ценообразования и «подавленной инфляции» начала 1990-х годов [6]. Автор выделяет ключевую роль структурных дефицитов, высокой монополизации рынков и зависимости от импорта потребительских товаров.

Бримбетова Н.Ж. акцентирует внимание на социально-экономических последствиях инфляции, подчёркивая, что рост цен оказывает системное воздействие на уровень жизни населения, региональное развитие, занятость, инвестиционную активность и инновационные процессы [7].

Особое значение в современных исследованиях приобрели эконометрические модели инфляции. В работах Р. Ошакбаева, А. Кысыкова и Д. Шульца показано, что инфляция в Казахстане является сравнительно менее инерционной, чем в России, но сильнее зависит от ликвидных денежных агрегатов (M_0 , M_1) с лагом в 1-2 квартала [8]. Также выявлен значимый эффект переноса валютного курса (exchange rate pass-through): ослабление тенге приводит к ускорению инфляции в течение ближайших месяцев.

Учёными Национального Банка Республики Казахстан на основе байесовских векторных авторегрессий показано, что наибольшее влияние на краткосрочную динамику инфляции оказывают мировые цены на продовольствие, изменение курса тенге, инфляция в странах ЕАЭС, а также шоки мировых товарных рынков [9,16]. Дополнительный вклад в

понимание инфляции в регионе вносит Mirzoyev S., показывая особенности инфляционных процессов в странах Центральной Азии [10].

Таким образом, предыдущие исследования позволяют выделить несколько ключевых групп факторов инфляции в Казахстане:

1. Монетарные факторы – денежные агрегаты, ключевая ставка, кредитная активность [4; 8; 16].

2. Валютные факторы – девальвация тенге, эффект переноса цен, волатильность на мировых рынках и нефтяные шоки [8,9,11-13,18].

3. Структурные факторы – монополизация отраслей, дисбаланс регионального развития, высокая импортозависимость, ресурсная модель роста [1-3,6,7,14].

4. Внешние факторы – глобальные кризисы, мировые цены на нефть и продовольствие, логистические шоки [1-3,11-13,18,20].

5. Социально-экономические факторы – рост издержек, снижение реальных доходов населения, изменение ожиданий [7; 10; 14; 20; 21].

Структурные характеристики экономики Казахстана последовательно рассматриваются как важные источники инфляционных волн. В аналитических материалах Всемирного банка, Азиатского банка развития и Евразийского банка развития выделяются три ключевые структурные особенности:

1. импортозависимость, особенно в сегментах продовольствия, одежды, техники и медикаментов [1,2,15,19];

- монополизация и олигополия в сферах телекоммуникаций, логистики, энергетики и торговли [3,6,7,14,17];

2. сырьевая направленность экономики, при которой экспорт доминирует над производством готовой продукции, а динамика мировых цен на нефть быстро трансформируется в изменение курса и уровня цен внутри страны.

Эти факторы формируют устойчивые инфляционные импульсы, слабо поддающиеся традиционным монетарным инструментам регулирования. Страны с сырьевой моделью роста и высокой импортозависимостью характеризуются повышенной чувствительностью к внешним шокам, включая ценовую волатильность на мировых товарных рынках и изменение условий внешней торговли [1-3,11-13,18,20].

Несмотря на значительное количество исследований, комплексного анализа влияния именно структурных факторов на инфляционные процессы в Казахстане в научной литературе представлено недостаточно. Большинство работ сосредоточено либо на монетарных аспектах, либо на анализе отдельных внешних импульсов (например, нефтяных шоков), в то время как структурные особенности экономики остаются изученными неполно [6-9,11-14].

В этой связи возникает необходимость изучения того, как конкретные структурные характеристики экономики Казахстана – её импортозависимость, уровень монополизации ключевых рынков и сырьевая направленность – определяют инфляционные процессы и ограничивают эффективность традиционной денежно-кредитной политики.

Исходя из этого, формируется исследовательский вопрос настоящей работы:

Как структурные особенности экономики Казахстана – импортозависимость, монополизация отдельных рынков и сырьевая направленность – влияют на формирование инфляционных процессов? Постановка данного вопроса позволяет глубже понять природу инфляции в Казахстане и определить границы воздействия монетарной политики в условиях структурно неоднородной экономики.

Теоретическая значимость исследования заключается в уточнении механизмов взаимодействия внешних и внутренних ценовых импульсов с институциональной структурой экономики. Практическая значимость определяется возможностью использования результатов при формировании структурной антиинфляционной политики, направленной на снижение уязвимости экономики к внешним шокам, развитие конкуренции и укрепление производственного потенциала страны.

Пробел в исследованиях. Although previous studies have examined sustainable development, project management, and educational reforms separately, limited research has systematically investigated how project management methodologies can facilitate sustainable development within Nigeria's science and education sectors. Existing studies mainly focus on construction or infrastructure projects, while integrated analyses addressing governance, stakeholder engagement, and educational sustainability remain insufficient.

Furthermore, there is a lack of comprehensive reviews that synthesize evidence from recent literature and identify practical strategies for improving project implementation in developing countries.

Научная новизна. This study provides a comprehensive synthesis of recent evidence on the application of project management approaches to sustainable development in Nigeria's science and education sectors. The novelty of the research lies in integrating systematic literature review methods with project management frameworks to identify key barriers, success factors, and strategic recommendations for achieving the Sustainable Development Goals (SDGs). The study also proposes a conceptual framework linking project governance, stakeholder collaboration, and sustainability outcomes in higher education and scientific development.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Методологическая основа работы опирается на современные подходы к анализу инфляции в малых открытых и ресурсно-ориентированных экономиках, сочетающие монетарные, структурные и внешние факторы ценовой динамики. В качестве теоретической базы используются положения количественной теории денег и монетаристской трактовки инфляции как денежного феномена [4,14], кейнсианский подход к роли совокупного спроса и бюджетной политики [5], а также результаты отечественных исследований, показывающих важность немонетарных и институциональных детерминант инфляции в Казахстане [6-9,14,17]. Учитываются выводы работ, посвящённых влиянию мировых цен на сырьё, валютного курса и внешних шоков на инфляционные процессы в Казахстане и странах с аналогичной структурой экономики [1-3,11-13,18,20].

Цель эмпирической части исследования – количественно оценить вклад внутренних (монетарных и реальных) и внешних факторов в динамику инфляции, а также выявить, в какой мере импортозависимость, сырьевая направленность и особенности денежно-кредитной политики трансформируются в инфляционные импульсы. Для решения этой задачи используется метод многофакторной линейной регрессии на временных рядах, дополняемый корреляционным анализом и базовыми процедурами диагностики модели (проверка стационарности, значимости, автокорреляции и гетероскедастичности) [8,9,11-13,16,18,20-22].

В качестве зависимой переменной выступает уровень инфляции в Республике Казахстан,

измеряемый индексом потребительских цен (ИПЦ). Набор объясняющих переменных сформирован таким образом, чтобы отразить ключевые структурные особенности экономики Казахстана:

1. импортозависимость: показатели импорта, двусторонний обменный курс рубль/тенге, международный эффект Фишера;

2. сырьевая направленность: мировая цена нефти Brent, показатели экспорта сырья;

3. монополизация и финансовая структура: ключевая ставка Национального Банка РК как отражение регулируемой стоимости кредитов в условиях ограниченной конкуренции на финансовом рынке;

4. макроэкономическая структура: ВВП и его динамика как индикатор спрового давления.

Информационная база исследования сформирована на основе данных Бюро национальной статистики Республики Казахстан (статистические сборники по инфляции, ежемесячные обзоры, данные по ВВП, структуре потребительской корзины, региональной инфляции) [15,19], официальных публикаций Национального Банка РК (отчёты по денежно-кредитной политике, аналитика по инфляционным ожиданиям, обзоры финансового рынка) [16,21,22], а также данных Банка России и международных финансовых организаций [18,20].

Перед оцениванием модели (1) проводятся тесты ADF для проверки стационарности временных рядов, анализ автокорреляции остатков и гетероскедастичности. При выявлении нарушений классических предпосылок метода наименьших квадратов используются робастные стандартные ошибки (HAC/White), что позволяет корректно интерпретировать статистическую значимость коэффициентов. Значимые коэффициенты при переменных, связанных с импортом, сырьевыми шоками и валютными каналами, рассматриваются как количественное подтверждение того, что именно структурные особенности экономики Казахстана – импортозависимость, монополизация отдельных рынков и сырьевая направленность – формируют устойчивые инфляционные процессы и ограничивают эффективность монетарной политики.

Таким образом, предложенная методология обеспечивает аналитическую связь между структурными особенностями экономики и инфляционной динамикой, создавая основу для выработки рекомендаций по структурной антиинфляционной политике.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эмпирического анализа позволяют перейти от общетеоретического обсуждения инфляции в Казахстане к количественной оценке того, как структурные особенности экономики – импортозависимость, сырьевая направленность и монополизация отдельных рынков – трансформируются в устойчивые инфляционные импульсы. Построенная многофакторная регрессионная модель на ежемесячных данных за 2011-2023 гг. показала удовлетворительное качество подгонки: коэффициент детерминации порядка 0,54 свидетельствует, что около половины вариации инфляции объясняется включёнными макроэкономическими переменными. Значимость F-критерия подтверждает статистическую состоятельность модели в целом, несмотря на наличие признаков нелинейности и автокорреляции, характерных для временных рядов в малых открытых экономиках [8,9,11-13].

Первый блок результатов связан с оценкой роли импортозависимости. Коэффициент при переменной, отражающей динамику импорта, оказался положительным и статистически значимым: увеличение импортных поставок сопровождается ускорением инфляции. На первый взгляд это может показаться контринтуитивным, если учитывать только предложение: расширение импорта должно усиливать конкуренцию и сдерживать цены. Однако в условиях Казахстана высокая доля импортируемых продовольственных и непродовольственных товаров в потребительской корзине, а также уязвимость курса тенге к внешним шокам означают, что импорт является ключевым каналом переноса внешней инфляции во внутреннюю экономику [1,2,6,7,15,19,20]. Любое удорожание глобальных цен на продовольствие, медикаменты, одежду, технику, усиленное ослаблением национальной валюты, почти напрямую отражается на розничных ценах.

Дополнительным подтверждением является оценка влияния двустороннего курса рубль/тенге. Отрицательный коэффициент при логарифме этого курса показывает, что укрепление тенге по отношению к рублю статистически связано с замедлением инфляции, тогда как ослабление тенге относительно российской валюты сопровождается ускорением роста потребительских цен. Россия остаётся одним из ключевых торговых партнёров Казахстана, поставляющим широкий спектр товаров массового потребления. При ослаблении тенге импорт из России дорожает, и поставщики перекладывают рост издержек на конечного потребителя, усиливая инфляционное давление [2,8,15,16].

Воздействие импорта на инфляцию не ограничивается ценовым каналом. Высокая

импортозависимость обнажает структурную слабость внутреннего производства: ограниченные мощности перерабатывающих отраслей, низкая глубина локализации, технологическое отставание. В такой ситуации даже временные внешние шоки (нарушение логистики, изменение мировых цен, санкционные ограничения) превращаются в длительные инфляционные волны, поскольку экономика не в состоянии быстро заместить импорт внутренним производством [1-3,6,7,14,18,20]. Это согласуется с выводами международных организаций о высокой чувствительности малых открытых ресурсных экономик к изменениям условий внешней торговли [1-3,18,20].

Сырьевая направленность и нефтяные шоки. Второй важный результат касается сырьевой направленности экономики и влияния цен на нефть. Оценки показали положительную и статистически значимую связь между динамикой мировых цен на нефть сорта Brent и инфляцией в Казахстане. В краткосрочном периоде рост цен на нефть может приводить к укреплению тенге, что частично снижает стоимость импортируемых товаров и временно сдерживает инфляцию. Однако в среднесрочной перспективе через рост экспортных доходов, расширение бюджетных расходов и усиление потребительского и инвестиционного спроса такой шок усиливает инфляционное давление [11-13,18]. В условиях проциклической бюджетной политики, когда государственные расходы возрастают в периоды благоприятной сырьевой конъюнктуры, инфляция становится во многом побочным продуктом ресурсной модели роста [1-3,11,16,20].

Связь между нефтяной конъюнктурой и инфляцией проявляется и через инфляционные ожидания. Периоды высоких цен на нефть сопровождаются ростом ожиданий доходов и ускорением кредитной активности, особенно в потребительском и ипотечном сегментах. Население и бизнес воспринимают «дорогую нефть» как сигнал будущего роста доходов, что стимулирует опережающий спрос на товары длительного пользования и недвижимость. При ограниченном предложении со стороны внутреннего производства и в условиях монополизации это перерастает в устойчивый рост цен [9,11,16,20-22].

Монополизация, структурная инерция и эластичность предложения. Монополизация и олигополистическая структура отдельных рынков проявляются прежде всего через поведение цен и слабую ценовую гибкость. Хотя в регрессионную модель не включены прямые показатели концентрации, качественный анализ динамики цен на коммунальные услуги, транспорт, связь,

энергоресурсы показывает, что цены в этих секторах растут быстрее либо не снижаются даже на фоне общего замедления инфляции. Это свидетельствует о значительной рыночной власти крупных компаний и ограниченной конкуренции [3,6,7,14,17]. При таком устройстве экономики любое увеличение издержек (например, из-за роста тарифов на энергию или логистику) почти полностью перекладывается на конечные цены, усиливая инфляционную инерционность.

Результаты оценки влияния ВВП на инфляцию также поддерживают тезис о структурной неэластичности предложения. Положительный коэффициент при ВВП означает, что ускорение экономической активности сопровождается ростом цен. Для развитых конкурентных экономик рост ВВП за счёт увеличения производительности и расширения выпуска часто сдерживает ценовое давление, тогда как в условиях Казахстана рост спроса быстрее трансформируется в рост цен, чем в расширение предложения [1-3,6-8,14,20]. Это ещё одно косвенное подтверждение структурных ограничений – низкой диверсификации, монополизации отраслей и ограниченной способности бизнеса быстро увеличивать выпуск.

Монетарная политика и ограничения трансмиссионного механизма. Отдельного внимания заслуживают результаты, связанные с ключевой процентной ставкой Национального Банка РК. Оценки показали, что именно этот показатель является одним из наиболее значимых факторов, коррелирующих с динамикой инфляции. Положительная и статистически значимая связь отражает то, что ужесточение денежно-кредитной политики, как правило, происходит в периоды уже ускорившейся инфляции: ставка реагирует на рост цен, а не предвосхищает его [8,9,16,17,22].

Сравнение коэффициента при ключевой ставке с коэффициентами при переменных, отражающих внешние и структурные факторы, показывает, что потенциал монетарной политики ограничен. Масштабные программы льготного кредитования по фиксированным ставкам, действующие параллельно рыночному кредитному сектору, формируют «двухконтурный» финансовый рынок. Существенная часть экономики финансируется по субсидированным ставкам, слабо зависящим от базовой ставки центрального банка. Это снижает эффективность процентного канала трансмиссии и ослабляет влияние ужесточения денежно-кредитной политики на совокупный спрос [14,16,17,22].

Показательно, что рассчитанный международный эффект Фишера (на основе процентных ставок Казахстана и России) не

продемонстрировал статистически значимого влияния на инфляцию. Это означает, что прямой канал «разница процентных ставок – изменение обменного курса – инфляция» проявляется слабее, чем торговый и ценовой каналы, связанные с фактическим импортом и изменениями мировых сырьевых цен [8,10,18].

Анализ динамики инфляции и инфляционных ожиданий за последние годы позволяет сопоставить выводы модели с ключевыми макроэкономическими эпизодами. Резкий всплеск инфляции и девальвация тенге после перехода к режиму плавающего обменного курса в 2015 г., ускорение инфляции в период пандемии COVID-19 и последующее ужесточение денежно-кредитной политики подтверждают, что внешние шоки (нефтяные цены, глобальные логистические и геополитические изменения) и структурные ограничения (импортозависимость, монополизация) играли определяющую роль в формировании инфляционных волн [1-3,11-13,15,16,19,22].

Обобщая результаты, можно утверждать, что поставленный исследовательский вопрос о влиянии структурных особенностей экономики Казахстана на формирование инфляции получает положительный ответ. Импортозависимость усиливает канал импортируемой инфляции и делает внутренние цены крайне чувствительными к изменениям курсов валют и мировых цен. Сырьевая направленность экономики через нефтяную конъюнктуру, бюджетные потоки и колебания курса тенге генерирует мощные проциклические инфляционные импульсы.

ВЫВОДЫ

Проведённое исследование позволило комплексно оценить влияние ключевых структурных особенностей экономики Казахстана – импортозависимости, монополизации отдельных отраслей и сырьевой направленности – на формирование и динамику инфляционных процессов. Полученные результаты подтверждают, что инфляция в Казахстане имеет преимущественно структурный характер, а монетарные инструменты регулирующих органов оказываются лишь частично эффективными без проведения параллельных институциональных и структурных реформ.

Во-первых, анализ временных рядов за 2011-2023 гг. показал, что импортозависимость остаётся одним из наиболее значимых источников инфляционного давления. Высокая доля импортируемых товаров в потребительской корзине и уязвимость обменного курса приводят к тому, что внешние ценовые шоки практически

напрямую транслируются во внутреннюю инфляцию.

Во-вторых, сырьевая направленность экономики и зависимость от конъюнктуры мирового рынка нефти формируют мощные проциклические инфляционные импульсы. Рост мировых цен на нефть через укрепление курса тенге, расширение бюджетных расходов и усиление спроса ведёт к ускорению инфляции, тогда как снижение нефтяных цен инициирует девальвацию и рост импортируемой инфляции.

В-третьих, монополизация ключевых рынков (логистика, энергетика, телекоммуникации, торговля, ЖКХ) усиливает ценовую инерционность и препятствует эффективному снижению инфляции. В условиях ограниченной конкуренции предприятия обладают возможностью перекладывать рост издержек на потребителя, что закрепляет высокий уровень инфляции даже при замедлении внешних шоков.

В-четвёртых, результаты регрессионного анализа показали, что внешнеторговые и валютные каналы оказывают более сильное влияние на инфляцию, чем монетарные инструменты. Эффективность ключевой ставки сдерживается существованием льготных кредитных программ, фиксированных ставок и ограниченной передачей изменений базовой ставки на рыночные условия кредитования.

В-пятых, устойчиво высокие инфляционные ожидания населения и бизнеса усиливают инфляционную инерцию и снижают чувствительность экономики к мерам денежно-кредитной политики.

Таким образом, результаты исследования подтверждают необходимость системного подхода к управлению инфляцией, основанного на сочетании монетарных, структурных и институциональных мер. Только трансформация структуры экономики и повышение её устойчивости к внешним шокам позволят обеспечить долгосрочную ценовую стабильность и устойчивое экономическое развитие Республики Казахстан.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

(таксономия *CReditT*):

Кенжалиев Олжас Багдаулетович – концептуализация исследования (Conceptualization); методология (Methodology); формальный анализ (Formal Analysis); исследование (Investigation); написание первоначального варианта рукописи (Writing – Original Draft); научное руководство (Supervision).

Ильясов Дидар – сбор и обработка данных (Data Curation); валидация результатов (Validation); визуализация (Visualization);

программное обеспечение (Software); редактирование и доработка рукописи (Writing – Review & Editing).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность анонимным рецензентам за их ценные замечания и конструктивные

предложения, которые помогли улучшить качество этой рукописи. Авторы также выражают признательность научному сообществу, чьи опубликованные исследования легли в основу данного исследования.

Авторское право © 2025 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение материала в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения аналогичной лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] World Bank. Kazakhstan Economic Update: Navigating Uncertainty. – Washington, DC: World Bank, 2020. – 52 p.
- [2] Asian Development Bank. Kazakhstan: Accelerating Economic Diversification. – Manila: ADB, 2018. – 86 p.
- [3] Eurasian Development Bank. Macroeconomic Review 2021. – Moscow: Eurasian Development Bank, 2021. – 80 p.
- [4] Фридман М. Количественная теория денег. – М.: Эльф Пресс, 1996. – 415 с.
- [5] Кейнс Дж. М. Общая теория занятости, процента и денег. – М.: Экономика, 2002. – 352 с.
- [6] Давыдова А. Причины и особенности инфляции в Казахстане // *Известия Национальной академии наук Республики Казахстан*. – 2013. – № 2. – С. 152–158.
- [7] Бримбетова Н.Ж. Особенности и социально-экономические последствия инфляционного процесса в Казахстане // *Вестник университета «Туран»*. – 2021. – № 3. – С. 96–101.
- [8] Ошакбаев Р., Кысыков А., Шульц Д. Эконометрическое моделирование инфляционных процессов в Казахстане. – Астана: Центр прикладных исследований «Талап», 2020. – 45 с.
- [9] Тулеуов О. Моделирование инфляционных процессов в Казахстане на основе новой кейнсианской кривой Филлипса. – Алматы: Национальный Банк Республики Казахстан, 2016.
- [10] Mirzoyev S. Inflation dynamics in Central Asia // *Economics of Central Asia*. – 2017. – No. – P. 39–44.
- [11] Kelesbayev D., Myrzabekkyzy K., Bolganbayev A., Baimaganbetov S. The Effects of the Oil Price Shock on Inflation: The Case of Kazakhstan // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – P. 478–481. – DOI: 10.32479/ijeep.13061.
- [12] Baimaganbetov S., Kelesbayev D., Baibosynova G., Yermankulova R., Dandayeva B. The impact of oil prices on food inflation in Kazakhstan // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2021. – Vol. 11, No. 3. – P. 73–79.
- [13] Köse N., Baimaganbetov S. The asymmetric impact of oil price shocks on Kazakhstan macroeconomic dynamics: A structural VAR approach // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2015. – Vol. 5, No. 4. – P. 1058–1064.
- [14] Калибаев Ж. Анализ инфляционных процессов в Республике Казахстан. – Алматы: Экономика, 2020. – 156 с.
- [15] Бюро национальной статистики Республики Казахстан. Статистические сборники по инфляции. – Астана, 2023. – 89 с.
- [16] National Bank of Kazakhstan. Monetary Policy Report. – Astana, 2022. – 112 p.
- [17] Мирошниченко Н. Инфляция и ключевая ставка: казахстанский опыт. – Алматы: Центр макроэкономических исследований, 2021. – 104 с.
- [18] International Monetary Fund. Commodity Price Dynamics: Global Developments and Risks. – Washington, D.C.: IMF Publications, 2020. – 76 p.
- [19] Бюро национальной статистики Республики Казахстан. Инфляция: ежемесячные обзоры. – Астана, 2023. – 12 с.
- [20] World Bank. Kazakhstan Economic Update. – Washington, D.C.: World Bank Group, 2022. – 54 p.
- [21] Национальный Банк Республики Казахстан. Инфляционные ожидания: аналитический обзор. –

Астана, 2023. – 24 с.

[22] Национальный Банк Республики Казахстан. Обзор денежно-кредитной политики. – Астана, 2023. – 48 с.

REFERENCES

- [1] World Bank. Kazakhstan Economic Update: Navigating Uncertainty. – Washington, DC: World Bank, 2020. – 52 p.
- [2] Asian Development Bank. Kazakhstan: Accelerating Economic Diversification. – Manila: ADB, 2018. – 86 p.
- [3] Eurasian Development Bank. Macroeconomic Review 2021. – Moscow: Eurasian Development Bank, 2021. – 80 p.
- [4] Fridman M. Kolichestvennaja teorija deneg. – M.: El'f Press, 1996. – 415 s.
- [5] Кейнс Дж. М. Общечая теория занятости, процента и денег. – М.: Экономика, 2002. – 352 с.
- [6] Davydova A. Prichiny i osobennosti infljatsii v Kazakhstane // Izvestija Natsional'noj akademii nauk Respubliki Kazakhstan. – 2013. – № 2. – S. 152–158.
- [7] Brimbetova N.Zh. Osobennosti i sotsial'no-ekonomicheskie posledstvija infljatsionnogo protsessa v Kazakhstane // Vestnik universiteta «Turan». – 2021. – № 3. – S. 96–101.
- [8] Oshakbaev R., Kysykov A., Shul'ts D. Ekonometricheskoe modelirovanie infljatsionnykh protsessov v Kazakhstane. – Astana: Tsentr prikladnykh issledovanij «Talap», 2020. – 45 s.
- [9] Tuleuov O. Modelirovanie infljatsionnykh protsessov v Kazakhstane na osnove novoj kejnsovskoj krivoj Fillipsa. – Almaty: Natsional'nyj Bank Respubliki Kazakhstan, 2016.
- [10] Mirzoyev S. Inflation dynamics in Central Asia // Economics of Central Asia. – 2017. – No.1. – P. 39–44.
- [11] Kelesbayev D., Myrzabekkyzy K., Bolganbayev A., Baimaganbetov S. The Effects of the Oil Price Shock on Inflation: The Case of Kazakhstan // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – P. 478–481. – DOI: 10.32479/ijee.13061.
- [12] Baimaganbetov S., Kelesbayev D., Baibosynova G., Yermankulova R., Dandayeva B. The impact of oil prices on food inflation in Kazakhstan // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2021. – Vol. 11, No. 3. – P. 73–79.
- [13] Köse N., Baimaganbetov S. The asymmetric impact of oil price shocks on Kazakhstan macroeconomic dynamics: A structural VAR approach // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2015. – Vol. 5, No. 4. – P. 1058–1064.
- [14] Kalibaev Zh. Analiz infljatsionnykh protsessov v Respublike Kazakhstan. – Almaty: Ekonomika, 2020. – 156 s.
- [15] Bjuro natsional'noj statistiki Respubliki Kazakhstan. Statisticheskie sborniki po infljatsii. – Astana, 2023. – 89 s.
- [16] National Bank of Kazakhstan. Monetary Policy Report. – Astana, 2022. – 112 p.
- [17] Miroshnichenko N. Infljatsija i ključevaja stavka: kazakhstanskij opyt. – Almaty: Tsentr makroekonomicheskikh issledovanij, 2021. – 104 s.
- [18] International Monetary Fund. Commodity Price Dynamics: Global Developments and Risks. – Washington, D.C.: IMF Publications, 2020. – 76 p.
- [19] International Monetary Fund. Commodity Price Dynamics: Global Developments and Risks. – Washington, D.C.: IMF Publications, 2020. – 76 p.
- [20] World Bank. Kazakhstan Economic Update. – Washington, D.C.: World Bank Group, 2022. – 54 p.
- [21] Natsional'nyj Bank Respubliki Kazakhstan. Infljatsionnye ozhidanija: analiticheskij obzor. – Astana, 2023. – 24 s.
- [22] Natsional'nyj Bank Respubliki Kazakhstan. Obzor denezhno-kreditnoj politiki. – Astana, 2023. – 48 s.

Chemical and pharmaceutical technologies. Life safetyDOI: <https://doi.org/10.53002/109>**QUANTITATIVE DETERMINATION OF THE AMOUNT OF RUTIN IN DIFFERENT VARIETIES OF GREEN AND BLACK TEA**¹*Toleutaeva S.*, ²*Baiseitova Zh.N.*¹*NPJSC «M.Kh. Dulaty Taraz University», Taraz, Kazakhstan*²*NPJSC “Abai Kazakh National Pedagogical university”, Almaty, Kazakhstan***Corresponding author e-mail: Sabina02t@gmail.com***Author information:****Toleutaeva Sabina**, NPJSC «M.Kh. Dulaty Taraz University», Taraz, Kazakhstan, e-mail: sabina02t@gmail.com**Baiseitova Zhanasyl Nurmukhanovna**, NPJSC “Abai Kazakh National Pedagogical university”, Almaty, Kazakhstan.ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7942-5367>; e-mail: zh.baiseitova81@abaiuniversity.edu.kz

Abstract — This research focuses on the quantitative determination of rutin, a naturally occurring bioflavonoid, in different varieties of green and black tea. Rutin is widely recognized for its strong antioxidant, anti-inflammatory, and capillary-protective properties, making it an important indicator of the nutritional and functional value of tea. Accurate determination of its concentration is essential for evaluating tea quality, comparing different tea varieties, and assessing their potential health benefits. In this study, representative samples of commercially available green and black teas were selected and subjected to extraction under optimized conditions to maximize the recovery of rutin. The experimental procedure included sample preparation, extraction, purification, and quantitative analysis using a volumetric analytical method. The proposed method is characterized by its simplicity, relatively low cost, and satisfactory accuracy and reproducibility, making it suitable for routine laboratory analysis. Quantitative measurements were performed for each tea sample, and the obtained data were statistically processed to evaluate the reliability of the results. The analysis revealed significant differences in rutin content between green and black tea samples, reflecting the influence of tea processing, particularly the degree of fermentation, on the preservation of flavonoids. Green tea generally exhibited a higher concentration of rutin than black tea, confirming that oxidative processing reduces the content of this biologically active compound. The findings demonstrate that the proposed analytical approach provides an effective means of determining rutin in tea and can be applied in quality control, food chemistry, and nutritional research.

Keywords — rutin, green tea, black tea, bioflavonoids, volumetric analysis method, quantitative determination, antioxidants.

ЖАСЫЛ ЖӘНЕ ҚАРА ШАЙДЫҢ ӘР ТҮРЛІ СОРТТАРЫНДАҒЫ РУТИН МӨЛШЕРІН САНДЫҚ АНЫҚТАУ¹*Төлеутаева С.*, ²*Байсейитова Ж.Н.*¹*«М.Х. Дулати атындағы Тараз Университеті» КеАҚ, Тараз, Қазақстан*²*«Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті» КеАҚ, Алматы, Қазақстан***Автор-корреспондент e-mail: Sabina02t@gmail.com***Автор туралы ақпарат:****Төлеутаева Сабина**, «М.Х. Дулати атындағы Тараз Университеті» КеАҚ, Тараз, Қазақстан,e-mail: sabina02t@gmail.com**Байсейитова Жанасыл Нурмухановна**, «Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті» КеАҚ, Алматы, Қазақстан. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7942-5367>; e-mail: zh.baiseitova81@abaiuniversity.edu.kz

Аңдатпа — Бұл зерттеу әртүрлі жасыл және қара шай сорттарындағы табиғи биофлавоноид болып табылатын рутиннің мөлшерін сандық анықтауға арналған. Рутин өзінің жоғары антиоксиданттық, қабынуға қарсы және қылтамырларды қорғаушы қасиеттерімен кеңінен танылған, сондықтан ол шайдың тағамдық және функционалдық құндылығын сипаттайтын маңызды көрсеткіштердің бірі болып табылады. Оның мөлшерін дәл анықтау шай сапасын бағалау, әртүрлі шай түрлерін салыстыру және олардың адам денсаулығына әлеуетті пайдасын анықтау үшін маңызды. Зерттеу барысында коммерциялық қолжетімді жасыл және қара шай үлгілері таңдалып алынып, рутиннің барынша толық бөлініп шығуын қамтамасыз ету мақсатында оңтайландырылған

жағдайларда экстракция жүргізілді. Эксперименттік әдістеме үлгілерді дайындау, экстракциялау, тазарту және көлемдік талдау әдісін пайдалана отырып сандық анықтау кезеңдерін қамтыды. Ұсынылған әдіс қарапайымдылығымен, салыстырмалы түрде төмен шығындылығымен, сондай-ақ жеткілікті дәлдігі және нәтижелердің жақсы қайталанғыштығымен ерекшеленеді, бұл оны күнделікті зертханалық тәжірибеде қолдануға мүмкіндік береді. Әрбір шай үлгісі бойынша сандық өлшеулер жүргізіліп, алынған нәтижелердің сенімділігін бағалау үшін статистикалық өңдеу орындалды. Зерттеу нәтижелері жасыл және қара шай үлгілеріндегі рутин мөлшерінің айтарлықтай айырмашылықтарын көрсетті, бұл шайды өңдеу технологиясының, әсіресе ферментация дәрежесінің, флавоноидтардың сақталуына әсер ететінін дәлелдейді. Жалпы алғанда, жасыл шайдағы рутин мөлшері қара шайға қарағанда жоғары болды, бұл тотығу процесі барысында осы биологиялық белсенді қосылыстың мөлшері төмендейтінін растайды. Алынған нәтижелер ұсынылған аналитикалық тәсілдің шай құрамындағы рутин мөлшерін тиімді анықтауға мүмкіндік беретінін және оны сапаны бақылауда, тағам химиясында және тамақтану саласындағы ғылыми зерттеулерде қолдануға болатынын көрсетеді.

Түйін сөздер — рутин, жасыл шай, қара шай, биофлавоноидтар, көлемдік талдау әдісі, сандық анықтау, антиоксиданттар.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА РУТИНА В РАЗЛИЧНЫХ СОРТАХ ЗЕЛЕННОГО И ЧЕРНОГО ЧАЯ

¹Төлеутаева С., ²Байсеитова Ж.Н.

¹НАО «Тараз университет имени М. Х. Дулати», Тараз, Казахстан

²НАО «Казахский национальный педагогический университет имени Абая», Алматы, Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: Sabina02t@gmail.com

Информация об авторе:

Төлеутаева Сабина, НАО «Тараз университет имени М.Х. Дулати», Тараз, Казахстан,

e-mail: sabina02t@gmail.com

Байсеитова Жанасыл Нурмухановна, НАО «Казахский национальный педагогический университет имени Абая», Алматы, Казахстан. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7942-5367>;

e-mail: zh.baiseitova81@abaiuniversity.edu.kz

Аннотация — Настоящее исследование посвящено количественному определению рутина — природного биофлавоноида — в различных сортах зеленого и черного чая. Рутин широко известен своими выраженными антиоксидантными, противовоспалительными и капилляропротекторными свойствами, что делает его важным показателем пищевой и функциональной ценности чая. Точное определение его содержания имеет большое значение для оценки качества чая, сравнения различных сортов и определения их потенциальной пользы для здоровья человека. В ходе исследования были отобраны образцы коммерчески доступных сортов зеленого и черного чая, которые подвергались экстракции в оптимизированных условиях для максимального извлечения рутина. Экспериментальная методика включала подготовку образцов, экстракцию, очистку и количественный анализ с использованием метода объемного анализа. Предлагаемый метод отличается простотой выполнения, сравнительно низкой стоимостью, а также достаточной точностью и воспроизводимостью результатов, что делает его пригодным для рутинного лабораторного применения. Количественные измерения были проведены для каждого образца чая, а полученные данные обработаны статистическими методами для оценки достоверности результатов. Анализ выявил существенные различия в содержании рутина между образцами зеленого и черного чая, что отражает влияние технологии обработки, в частности степени ферментации, на сохранность флавоноидов. В целом зеленый чай характеризовался более высоким содержанием рутина по сравнению с черным чаем, что подтверждает снижение концентрации данного биологически активного соединения в процессе окислительной обработки. Полученные результаты демонстрируют, что предложенный аналитический подход является эффективным средством определения содержания рутина в чае и может быть использован при контроле качества, в пищевой химии и исследованиях в области питания.

Ключевые слов — рутин, зеленый чай, черный чай, биофлавоноиды, метод объемного анализа, количественное определение, антиоксиданты.

MAIN PROVISION

The study presents a quantitative determination of rutin content in different varieties of green and black tea using a volumetric analysis method. The proposed approach provides a simple, rapid, and

sufficiently accurate determination of rutin concentration, making it suitable for comparative analysis of tea samples. The obtained results revealed differences in the rutin content between green and black tea, demonstrating the influence of tea

processing methods on the preservation of bioflavonoids and the antioxidant properties of tea. The developed method can be applied for quality control and evaluation of tea products based on their rutin content.

INTRODUCTION

Rutin (vitamin P) is the name given to a group of biologically active substances of plant origin (bioflavonoids and polyphenols), including rutin, anthocyanins, flavones, flavanols, catechins, and others, with more than 150 compounds identified. These substances contribute to strengthening the walls of blood vessels [1].

Strictly speaking, vitamin P is not a true vitamin, since bioflavonoids do not perform essential life-supporting functions in the human body. Rather, they are plant phenolic compounds that possess antioxidant properties and exhibit capillary-strengthening activity. Rutin was first isolated in 1842 from the plant *Ruta graveolens* (common rue).

Among the biologically active substances with vitamin P activity, catechins are the most widespread in nature. They are found in particularly high concentrations in tea. A review of scientific literature revealed limited information regarding the flavonoid content of different tea varieties. Therefore, the practical significance of the present study lies in investigating the flavonoid composition of various black and green tea samples.

Compounds exhibiting vitamin P activity are widely distributed in nature. The flavonoid content of several food products is presented below [2].

Bioflavonoids act synergistically with vitamin C. They participate in the regulation of collagen synthesis and inhibit the enzyme hyaluronidase, thereby contributing to the stabilization of connective tissues and blood vessel walls. Bioflavonoids also possess detoxifying properties, enabling them to bind heavy metals and protect adrenaline from oxidation. In addition, they exhibit antioxidants, anti-inflammatory, antitumor, anti-atherosclerotic, antimutagenic, antispasmodic, hypoglycemic, wound-healing, and microcirculation-regulating effects. They strengthen capillary walls, contribute to the prevention of oncological diseases, regulate bone mineralization, inhibit aldolase and C-reactive protein, and help prevent disorders associated with oxidative stress.

Since flavonoids cannot be synthesized in the human body, they must be obtained through the diet.

A deficiency of bioflavonoids increases capillary permeability, leading to hemorrhages, general weakness, fatigue, and pain in the arms and legs.

Vitamin P and vitamin C are closely associated. Rutin reduces capillary permeability, protects them against oxidative damage, and enhances the absorption of vitamin C. By increasing capillary strength, rutin decreases edema and bleeding, thereby reducing the risk of internal hemorrhage, preventing capillary fragility, and inhibiting the formation of atherosclerotic plaques.

Compounds belonging to the vitamin P group are metabolized into phenolic acids, which are subsequently utilized by the body for the synthesis of other biologically important compounds.

Research gap. Although numerous studies have investigated the antioxidant properties of green and black tea, limited attention has been paid to the comparative quantitative determination of rutin content using simple, rapid, and cost-effective analytical methods. Most existing research relies on sophisticated instrumental techniques, such as high-performance liquid chromatography (HPLC), which require expensive equipment and specialized laboratory conditions. Consequently, there is a need for an accessible and reliable alternative method that can be used for routine analysis and quality assessment of tea products. This study addresses this gap by applying a volumetric analysis method for the quantitative determination of rutin in different varieties of green and black tea and comparing their rutin content..

Novelty statement. The novelty of this study lies in the application of a simple and cost-effective volumetric analysis method for the quantitative determination of rutin in different varieties of green and black tea. Unlike conventional studies that mainly rely on instrumental techniques, this research demonstrates the feasibility of using an accessible analytical approach for routine quality assessment. The comparative evaluation of rutin content in green and black tea provides new data on the influence of tea processing on the preservation of bioflavonoids and antioxidant compounds.

METODOLOGY

In this study, the volumetric titration method was employed. According to the analytical procedure described in the literature [3], the quantitative determination of flavonoids is based on their ability to undergo oxidation by potassium permanganate (KMnO₄).

The samples were prepared for analysis as follows: 1.0 g of each tea sample was finely ground and extracted with 50 cm³ of hot distilled water. The extraction time was 5 minutes.

For the titration, 10 mL of the obtained extract was transferred into a flask, followed by the addition of 10 mL of distilled water and 6 drops of indigo,

carmine indicator. The solution was then titrated with 0.05 N potassium permanganate (KMnO₄) until a pale-yellow endpoint was reached.

Experimental results showed that 1 mL of 0.05 N potassium permanganate solution oxidizes 3.2 mg of rutin.

Three different varieties of green tea and black tea were selected for flavonoid analysis. The weighed samples were measured using an analytical balance with an accuracy of 10⁻⁴ g. To improve the reliability of the results, all experiments were carried out in

triplicate, and the final values were expressed as the arithmetic mean of the three determinations.

RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

The data obtained made it possible to calculate the vitamin P (rutin) content in different varieties of green and black tea. The analytical results, based on potassium permanganate titration, are presented in Tables 1 and 2.

Table 1 - Rutin content in extracts of black tea varieties

Product	m, g	V (p-p KMnO ₄), мЛ	w, %
Nuri	1.003	2.4	2.99
Ahmad	1.005	3.8	3.83
Ceylon Karagoda tea	1.006	3.6	3.67

Table 2 - Rutin content in extracts of green tea varieties

Product	m, g	V (p-p KMnO ₄), мЛ	w, %
Te Guanyin	1.004	1.9	1.91
Gapshauer tea	1.005	2.1	2.08
Huang Cha	1.003	0.8	0.80

The calculations showed that the rutin content in the black tea samples ranged from 1.99% (Brooke Bond tea) to 3.67% (Ceylon Karagoda tea).

For the green tea samples, the rutin content varied from 0.80% (Huang Cha tea) to 2.08% (Gapshauer tea). The obtained values are in good agreement with the published literature data [4].

Based on these results, it was established that the flavonoid content in black tea is approximately 1.8-2.5 times higher than that in green tea. This difference may be attributed to the manufacturing processes, as well as to the processing and storage conditions of different tea varieties. In general, tea production involves the fermentation of tea leaves at elevated temperatures (approximately 170-180°C), and the duration of fermentation may range from several days to several months. Black tea leaves undergo a considerably longer fermentation process, lasting up to several months [5].

It should also be noted that vitamin P is readily oxidized in the presence of ascorbic acid, and high temperatures can accelerate its degradation. Therefore, foods containing both vitamins P and C should preferably undergo minimal heat treatment to preserve their biological activity. Most compounds exhibiting vitamin P activity are water-soluble; however, tea also contains fat-soluble bioactive compounds. This may explain the traditional practice of adding butter to tea

in Eastern countries, whereas milk is more commonly added in Europe.

CONCLUSION

In this study, the quantitative content of vitamin P (rutin) was determined in different varieties of green and black tea. The calculations were performed based on the results of volumetric titration analysis. The flavonoid content in the analyzed tea samples ranged from 0.80% to 3.67%. Furthermore, the results demonstrated that the concentration of flavonoids in black tea is 1.8-2.5 times higher than that in green tea. These findings confirm that black tea is a richer dietary source of rutin and other flavonoids, which are known for their antioxidant activity and beneficial effects on vascular health.

AUTHOR'S CONTRIBUTION

(taxonomy CRediT):

Toleutaeva S. – Conceptualization, Investigation, Methodology, Data Curation, Writing - Original Draft.

Baisseitova Zh.N. – Conceptualization, Validation, Methodology, Formal Analysis, Writing - Review & Editing, Supervision.

CONFLICT OF INTEREST

The author claims that there is no conflict of interest in the implementation of this study and the publication of the article.

FUNDING

This research received no external funding.

ACKNOWLEDGMENT

The author expresses sincere gratitude to the editor and reviewer of the journal for valuable comments and recommendations that made it

possible to carefully consider the manuscript and significantly improve the content and quality of the article.

Copyright © 2025 by the author(s). This article is published as Open Access under the Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) license. This license permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. Derivative works must be distributed under the same license.

REFERENCES

- [1] I. F. Zverev, “Flavonoids through the eyes of a pharmacologist: Antioxidant and anti-inflammatory activity,” *Obzory po Klinicheskoi Farmakologii i Lekarsvennoi Terapii*, vol. 15, no. 4, pp. 5–13, 2017, <https://doi.org/10.17816/RCF1545-13>
- [2] J. M. Geleijnse and P. C. H. Hollman, “Flavonoids and cardiovascular health: Which compounds, what mechanisms?” *The American Journal of Clinical Nutrition*, vol. 88, no. 1, pp. 12–13, 2008, <https://doi.org/10.1093/ajcn/88.1.12>
- [3] W. Chen, S. Wang, Y. Wu, X. Shen, S. Xu, Z. Guo, R. Zhang, and D. Xing, “The physiologic activity and mechanism of quercetin-like natural plant flavonoids,” *Current Pharmaceutical Biotechnology*, vol. 21, no. 8, pp. 654–658, 2020, <https://doi.org/10.2174/1389201021666200212093130>
- [4] G. E.-S. Batiha, A. M. Beshbishy, M. Ikram et al., “The pharmacological activity, biochemical properties, and pharmacokinetics of the major natural polyphenolic flavonoid: Quercetin,” *Foods*, vol. 9, no. 3, Art. no. 374, 2020, <https://doi.org/10.3390/foods9030374>
- [5] A. V. A. David, R. Arulmoli, and S. Parasuraman, “Overviews of biological importance of quercetin: A bioactive flavonoid,” *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, vol. 2016, Art. no. 2016, pp. 1–12, 2016, <https://doi.org/10.4103/0973-7847.194044>

Chemical and pharmaceutical technologies. Life safety

DOI: <https://doi.org/10.53002/110>

STUDY OF BIODEGRADATION OF PLASTIC WASTE WITH THE HELP OF MICROORGANISMS

Kalmakhanova M.S.

NPJSC «M.Kh. Dulaty Taraz University», Taraz, Kazakhstan

**Corresponding author e-mail: marjanseitovna@mail.ru*

Author information:

Kalmakhanova Marzhan Seitovna, NPJSC «M.Kh. Dulaty Taraz University», Taraz, Kazakhstan,

e-mail: marjanseitovna@mail.ru

Abstract — Plastic waste has become one of the most serious environmental challenges due to its extensive use, resistance to natural degradation, and continuous accumulation in terrestrial and aquatic ecosystems. Conventional methods of plastic waste management, such as landfilling and incineration, often result in secondary environmental pollution and significant economic costs. Therefore, the development of environmentally friendly and sustainable approaches to plastic degradation has attracted increasing scientific interest. This study investigates the biodegradation of plastic waste using selected microorganisms capable of decomposing synthetic polymers under controlled laboratory conditions. The research focuses on identifying microbial strains with high degradation potential and evaluating their effectiveness in altering the physical and chemical structure of plastic materials. Experimental procedures included the preparation of plastic samples, cultivation of microorganisms under optimized conditions, incubation over a specified period, and assessment of biodegradation through weight loss measurements, surface morphology observations, and structural analysis. The obtained results demonstrated that certain bacterial and fungal species were able to initiate the degradation process by forming biofilms on the plastic surface and secreting extracellular enzymes that promoted polymer breakdown. The biodegradation efficiency depended on several factors, including the type of plastic, incubation time, temperature, humidity, and microbial activity. Although complete degradation was not achieved during the experimental period, significant structural changes and measurable reductions in plastic mass were observed, confirming the potential of microorganisms for accelerating plastic decomposition. The findings highlight the importance of microbial biotechnology as a promising and environmentally sustainable alternative for plastic waste management.

Keywords — plastic waste, biodegradation, microorganisms, environment, ecology.

МИКРООРГАНИЗМДЕР КӨМЕГІМЕН ПЛАСТИКАЛЫҚ ҚАЛДЫҚТАРДЫҢ БИОДЕГРАДАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Калмаханова М.С.

«М.Х. Дулати атындағы Тараз Университеті» КеАҚ, Тараз, Қазақстан

**Автор-корреспондент e-mail: marjanseitovna@mail.ru*

Автор туралы ақпарат:

Калмаханова Маржан Сеитовна, «М.Х. Дулати атындағы Тараз Университеті» КеАҚ, Тараз, Қазақстан,

e-mail: marjanseitovna@mail.ru

Аңдатпа — Пластик қалдықтары кеңінен қолданылуы, табиғи жағдайда өте баяу ыдырауы және құрлық пен су экосистемдерінде үздіксіз жиналуы салдарынан қазіргі кездегі ең өзекті экологиялық мәселелердің біріне айналды. Пластик қалдықтарын басқарудың дәстүрлі тәсілдері, мысалы, полигондарға көму немесе өртеу, қоршаған ортаның екінші реттік ластануына әкеліп, елеулі экономикалық шығындарды талап етеді. Осыған байланысты пластикті ыдыратудың экологиялық қауіпсіз және тұрақты әдістерін әзірлеу ғылыми қауымдастықтың ерекше қызығушылығын тудыруда. Бұл зерттеу синтетикалық полимерлерді бақыланатын зертханалық жағдайда ыдырата алатын микроорганизмдердің көмегімен пластик қалдықтарының биodeградациясын зерттеуге арналған. Зерттеудің негізгі мақсаты – пластикті ыдырату қабілеті жоғары микроорганизмдерді анықтау және олардың полимерлік материалдардың физикалық және химиялық құрылымын өзгерту тиімділігін бағалау. Эксперимент барысында пластик үлгілерін дайындау, микроорганизмдерді оңтайландырылған жағдайларда өсіру, белгілі бір уақыт аралығында инкубациялау және биodeградация дәрежесін үлгілердің массасының өзгеруі,

беткі морфологиясы мен құрылымдық өзгерістерін талдау арқылы бағалау жүргізілді. Зерттеу нәтижелері кейбір бактериялар мен саңырауқұлақтардың пластик бетінде биоқабықша түзіп, полимер тізбектерін ыдырататын жасушадан тыс ферменттер бөлу арқылы пластиктің ыдырау процесін бастай алатынын көрсетті. Биодеградация тиімділігі пластиктің түріне, инкубация ұзақтығына, температураға, ылғалдылыққа және микроорганизмдердің белсенділігіне тәуелді болды. Эксперимент кезеңінде пластиктің толық ыдырауына қол жеткізілмегенімен, оның құрылымында елеулі өзгерістер мен массасының айтарлықтай азаюы байқалды. Бұл нәтижелер микроорганизмдерді пластик қалдықтарының ыдырауын жеделдетудің тиімді құралы ретінде пайдалануға болатынын дәлелдейді және микробиологиялық технологиялардың пластик қалдықтарын экологиялық тұрғыдан қауіпсіз басқарудың перспективасы бағыты екенін көрсетеді.

Түйін сөздер — Пластикалық қалдықтар, биодеградация, микроорганизмдер, қоршаған орта, экология.

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОДЕГРАДАЦИИ ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ С ПОМОЩЬЮ МИКРООРГАНИЗМОВ

Калмаханова М.С.

НАО «Тараз университет имени М. Х. Дулати», Тараз, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: marjanseitovna@mail.ru*

Информация об авторе:

Калмаханова Маржан Сейтовна, НАО «Тараз университет имени М.Х. Дулати», Тараз, Казахстан,
e-mail: marjanseitovna@mail.ru

Аннотация — Пластиковые отходы стали одной из наиболее серьезных экологических проблем современности вследствие их широкого использования, устойчивости к естественному разложению и постоянного накопления в наземных и водных экосистемах. Традиционные методы обращения с пластиковыми отходами, такие как захоронение на полигонах и сжигание, нередко приводят к вторичному загрязнению окружающей среды и требуют значительных экономических затрат. В связи с этим разработка экологически безопасных и устойчивых методов разложения пластика вызывает все больший научный интерес. Настоящее исследование посвящено изучению биодеградации пластиковых отходов с использованием отобранных микроорганизмов, способных разлагать синтетические полимеры в контролируемых лабораторных условиях. Основное внимание уделено выявлению микроорганизмов с высоким потенциалом деструкции пластика и оценке их эффективности в изменении физических и химических свойств полимерных материалов. Экспериментальная методика включала подготовку пластиковых образцов, культивирование микроорганизмов в оптимизированных условиях, инкубацию в течение заданного периода времени и оценку степени биодеградации по изменению массы образцов, исследованию морфологии поверхности и анализу структурных изменений. Полученные результаты показали, что некоторые виды бактерий и грибов способны инициировать процесс разложения пластика за счет образования биопленок на его поверхности и выделения внеклеточных ферментов, способствующих разрушению полимерных цепей. Эффективность биодеградации зависела от типа пластика, продолжительности инкубации, температуры, влажности и активности микроорганизмов. Несмотря на то что полное разложение пластика в течение экспериментального периода достигнуто не было, были зафиксированы значительные структурные изменения и заметное уменьшение массы образцов, что подтверждает высокий потенциал использования микроорганизмов для ускорения процессов разложения пластиковых отходов. Полученные результаты подчеркивают важность применения микробиологических технологий как перспективного и экологически безопасного направления в системе управления пластиковыми отходами.

Ключевые слова — пластиковые отходы, биодеградация, микроорганизмы, окружающая среда, экология.

MAIN PROVISION

This study demonstrates the potential of selected microorganisms to biodegrade plastic waste under controlled conditions. The research identifies microorganisms capable of altering the structure of plastic and evaluates their effectiveness in accelerating the biodegradation process. The obtained results confirm that microbial activity can significantly enhance plastic decomposition, highlighting the potential of biological treatment as

an environmentally friendly approach to plastic waste management. The findings provide a scientific basis for the further development of sustainable biotechnological methods for reducing plastic pollution.

INTRODUCTION

Plastic waste is one of the most pressing environmental challenges of the modern world. Every year, millions of tons of plastic are produced, yet a

significant proportion is not recycled and instead accumulates in the environment [1,2]. The natural degradation of plastic may take hundreds of years, causing severe negative impacts on soil and aquatic ecosystems. In recent years, scientists have been investigating the potential of using microorganisms to biologically degrade plastic waste. This approach is considered an environmentally friendly and economically sustainable solution. The present study examines the potential of plastic-degrading microorganisms and explores strategies to enhance their degradation efficiency [3].

Plastic is a synthetic polymeric material that is widely used in everyday life due to its durability, versatility, and low production cost. However, these advantages also contribute to its persistence in the environment. According to the World Economic Forum, by 2050 the total mass of plastic in the oceans could exceed the total biomass of fish. Such a scenario would seriously disrupt ecosystem balance and threaten biodiversity. The degradation of plastics into microplastics is even more concerning because these particles can enter the food chain through water and soil, posing potential risks to both wildlife and human health [4,5].

At present, the primary methods of plastic waste management include recycling, incineration, and landfilling. However, each of these approaches has significant limitations. Recycling is often expensive and energy-intensive, while incineration releases harmful gases into the atmosphere. Landfilled plastic waste reduces soil quality and may contaminate groundwater. Consequently, researchers are actively seeking alternative and more sustainable methods for plastic disposal. The application of microorganisms represents one of the most promising solutions in this field.

Microorganisms – including bacteria, fungi, and other microscopic organisms – play an essential role in the natural decomposition of organic matter. Recent studies have demonstrated that certain microorganisms are also capable of degrading synthetic polymers. For example, the bacterium *Ideonella sakaiensis* has been shown to degrade polyethylene terephthalate (PET) into simpler chemical compounds. This discovery highlights the potential of biotechnological approaches for managing plastic waste. Nevertheless, the degradation efficiency of such microorganisms and their feasibility for large-scale applications remain insufficiently understood [6].

The objective of this study was to identify microorganisms capable of degrading widely used plastics, particularly polyethylene (PE) and polypropylene (PP), and to evaluate their degradation

efficiency. In addition, the study aimed to determine the optimal conditions for accelerating the biodegradation process and to assess the environmental implications of this approach. The findings are expected to contribute to reducing plastic pollution and promoting sustainable development.

Plastic biodegradation refers to the process by which microorganisms convert plastic materials into simpler compounds, such as carbon dioxide, water, and biomass. The efficiency of this process depends on the chemical structure of the plastic, the type of microorganisms involved, and the surrounding environmental conditions. Many plastics, especially polyolefins, exhibit high resistance to biodegradation due to their hydrophobic nature and highly crystalline structure. Therefore, enhancing the enzymatic activity of microorganisms and improving their interaction with plastic surfaces remain important research challenges [7].

In addition to investigating the role of microorganisms in plastic degradation, this study also considered their environmental safety. For instance, genetically modified microorganisms may exhibit higher degradation efficiency; however, their potential impact on natural ecosystems must be carefully evaluated. Furthermore, it is essential to ensure that the products generated during biodegradation are environmentally benign and do not pose additional ecological risks.

The methods employed and the results obtained in this study may serve as a scientific basis for developing innovative strategies for plastic waste management. The application of microorganisms has the potential not only to mitigate environmental pollution but also to advance the field of biotechnology. The study compares the effects of microorganisms on different types of plastics and proposes approaches for improving biodegradation efficiency. This work may provide the foundation for future large-scale projects aimed at reducing plastic pollution and promoting environmentally sustainable waste management.

Research gap. Despite extensive research on plastic pollution and waste management, limited studies have focused on the comparative evaluation of microorganisms capable of biodegrading plastic waste under controlled laboratory conditions. Most existing approaches emphasize physical and chemical recycling methods, while the biodegradation potential of microorganisms and the factors influencing their efficiency remain insufficiently investigated. Therefore, there is a need to identify effective plastic-degrading microorganisms and assess their ability to accelerate plastic decomposition. This study addresses this gap by investigating the biodegradation

of plastic waste using selected microorganisms and evaluating their effectiveness as an environmentally friendly alternative for plastic waste management.

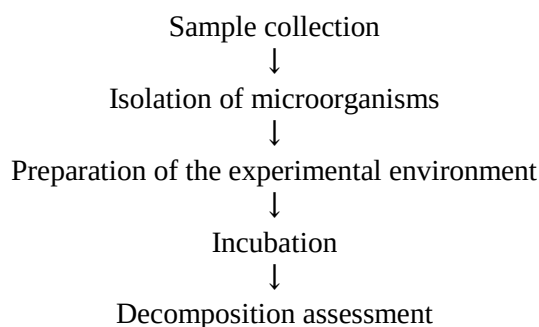
Novelty statement. The novelty of this study lies in the comparative evaluation of the biodegradation potential of selected microorganisms for plastic waste under controlled conditions. Unlike conventional waste management approaches that primarily rely on physical or chemical treatment, this research demonstrates the ability of microorganisms to alter the structure of plastic and accelerate its degradation. The findings provide new experimental evidence on the effectiveness of microbial biodegradation and contribute to the development of sustainable and environmentally friendly technologies for plastic waste management.

METODOLOGY

The study was conducted under laboratory conditions. Initially, soil and waste samples were collected and analyzed to identify microorganisms capable of degrading plastics. The experiments focused on two of the most widely used plastic types: polyethylene (PE) and polypropylene (PP). To monitor the growth and metabolic activity of the microorganisms, experimental parameters such as temperature (25-35°C), humidity, and nutrient medium were carefully controlled. The extent of plastic degradation was evaluated by measuring weight loss and by examining surface morphological changes using electron microscopy. The experimental period lasted 12 weeks.

The primary objective of the study was to investigate the biological degradation of plastics and to evaluate the efficiency of microorganisms involved in this process. Laboratory conditions enabled the simulation of natural environments while ensuring precise control of experimental parameters, thereby improving the reliability and reproducibility of the

results. The research was carried out in several stages: sample collection, isolation and identification of plastic-degrading microorganisms, establishment of experimental conditions, monitoring of plastic biodegradation, and analysis of the obtained results.



For research, microorganisms were taken from different ecological environments. Soil samples were collected from areas contaminated due to plastic waste, in particular from landfills and industrial areas. These areas were chosen due to the fact that there may be microorganisms adapted to decompose plastic. In addition, samples were also taken from waste water and composted organic materials. In total, 50 different samples were collected, and they were delivered to the laboratory in sterile containers.

Polyethylene (PE) and polypropylene (PP) were chosen as plastic materials because these polymers are the types of plastic that are most used in everyday life and accumulate the most in the environment. Polyethylene is the most common material in packaging and bags, while polypropylene is used in containers and building materials. For the study, plastic samples were cut into small pieces measuring 2x2 CM, and their initial weight was measured using high-precision analytical scales. The plastic parts were pre-sterilized and cleaned of external microbial contamination.

Table 1 – Experimental parameters

Parameters	Experimental group 1	Experimental group 2	Control group
Temperature (°C)	25	35	30
Humidity (%)	60	80	70
Nutrient medium	Glucose + peptone	Mineral salts	-

Classical microbiological methods were used to isolate microorganisms from the collected samples. Soil and residual samples were injected into saline (0.9% NaCl) and treated using the serial dilution method. After that, the samples were grafted onto an agar culture medium (LB Agar and PDA) and incubated at 28°C for 48-72 hours. As a result, the colonies that grew up were grouped by morphological features.

Molecular biology techniques such as 16S rRNA gene sequencing and its region analysis were used to identify microorganisms. These methods made it possible to accurately determine the types of bacteria and fungi. The study turned out to be dominated by microorganisms such as *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger* and *Penicillium chrysogenum*. The ability of these species to decompose plastic has also been confirmed in

previous studies, so they were chosen as the main objects of study in the experiment.

Table 2 – Table of identification of microorganisms

Microorganism	Group	Identification method
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Bacteria	16S rRNA sequencing
<i>Aspergillus niger</i>	Mushroom	Analysis of ITS area
<i>Bacillus subtilis</i>	Bacteria	16S rRNA sequencing

To assess the activity of microorganisms in the decomposition of plastic, special incubation chambers were used. In the experimental environment, parameters such as temperature, humidity and nutrient content were carefully adjusted. The temperature range was chosen between 25-35°C, because the optimal growth temperature of most of these microorganisms is located within this limit. Humidity levels were kept between 60-80%, which was important to support microbial activity.

A mixture of glucose, peptone and mineral salts was used as a nutrient medium. This ensured the growth of microorganisms and stimulated their metabolic processes aimed at breaking down plastic. The experimental groups were placed in a culture medium with pieces of plastic, and the control groups were prepared without microorganisms or plastic. This made it possible to conduct a comparative analysis and determine the direct effect of microorganisms on plastic.



Fig. 1 – Environment for growing microorganisms in the laboratory

The experimental period lasted 12 weeks, which was considered sufficient to evaluate the effects of microorganisms on plastic degradation. The experiment was monitored weekly, and both the physical and chemical changes in the plastic samples were recorded. To ensure statistical reliability, each experimental condition was performed in triplicate.

Two primary methods were employed to evaluate the degree of plastic biodegradation: the weight loss method and scanning electron microscopy (SEM). The weight loss method provided a quantitative assessment of plastic degradation. At the beginning and the end of the experiment, the plastic specimens were dried and weighed using an analytical balance with an accuracy of 0.001 g. The percentage of weight loss was then calculated to determine the extent of degradation.

Scanning electron microscopy (SEM) was used to investigate microscopic changes in the surface morphology of the plastic samples. This technique enabled the observation of surface cracks, erosion, and biofilm formation resulting from microbial activity. Prior to SEM analysis, the plastic samples were thoroughly cleaned, coated with a thin layer of gold, and scanned at a magnification of 10,000×. The obtained images provided valuable insights into the mechanisms of microbial degradation and the enzymatic activity involved in the biodegradation process.

In addition, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) was employed to identify changes in the chemical composition of the plastics. This technique was used to detect alterations in the

functional groups of the polymer structure, particularly the formation of carbonyl (C=O) groups. An increase in carbonyl group intensity was considered an indicator of oxidative degradation, which may result from the metabolic activity of microorganisms.

Several experimental groups were established during the study. The first group contained only bacterial strains (*Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus subtilis*), while the second group consisted of fungal species (*Aspergillus niger* and *Penicillium chrysogenum*). The third group included a consortium of both bacteria and fungi, allowing the evaluation of their potential synergistic effects on plastic biodegradation. Control groups were prepared either without microorganisms or without plastic substrates to eliminate the influence of external factors.

Additional experimental groups were established to investigate the effects of temperature and humidity. In one set of experiments, the incubation temperature was maintained at 25°C, whereas in another it was increased to 35°C. Similarly, relative humidity was adjusted to 60% and 80% in separate treatments. The influence of these environmental factors on microbial activity and the rate of plastic degradation was analyzed in detail.

Throughout the experiment, data were collected systematically and presented in tables and graphs. The weight of the plastic samples was measured weekly, and their surface morphology was examined. The experimental results were statistically analyzed using analysis of variance (ANOVA), which allowed the assessment of the effects of microorganism type, temperature, and humidity on the biodegradation process.

Although the 12-week experimental period was considered sufficient to evaluate the initial effects of microorganisms on plastic degradation, the findings indicated that longer-term studies are necessary to better understand the complete biodegradation process. The results provided important insights into the

mechanisms of plastic degradation and the role of microorganisms, thereby establishing a scientific basis for future research.

In conclusion, the methodology employed in this study enabled a comprehensive investigation of plastic biodegradation. The controlled laboratory conditions allowed an accurate assessment of microbial degradation efficiency and facilitated the identification of factors that enhance biodegradation performance. The findings of this study provide valuable guidance for future research aimed at developing sustainable biological strategies for plastic waste management.

RESULTS AND DISCUSSION

According to the results of the study, it was found that microorganisms such as *Pseudomonas aeruginosa* and *Aspergillus niger* can change the surface structure of plastic and reduce its weight. Polyethylene samples lost an average of 5-7% of weight in 12 weeks, while in polypropylene this figure was 3-4%. Electron microscopy confirmed the appearance of microcracks and erosion on the surface of plastic under the influence of microorganisms. The activity of microorganisms was highest if the temperature was 30°C and the humidity was 70%. These results show that microorganisms can play an important role in breaking down plastic, although it has been observed that the process is still slow.

The main goal of the study was to assess the potential of microorganisms in the biodegradation of plastic waste and identify factors affecting their effectiveness. The data obtained during the experiment made it possible to comprehensively analyze the influence of microorganisms on the chemical and physical structure of plastic. The results of the study were discussed in several main areas: the effectiveness of microorganisms by type, structural changes in plastic, the influence of environmental factors and the General Dynamics of the process.

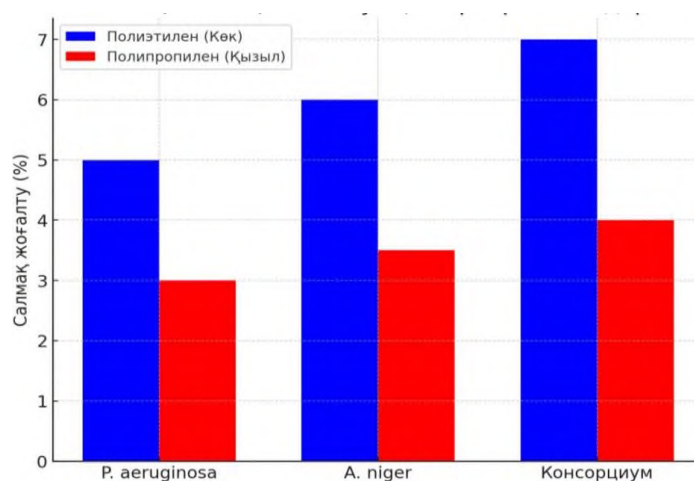


Fig. 2 – Plastic weight loss

Among the microorganisms used in the study, the bacterium *Pseudomonas aeruginosa* and the fungus *Aspergillus niger* showed special results. *Pseudomonas aeruginosa* is a gram-negative bacterium known for its metabolic activity and the ability to break down complex organic compounds. In the course of

the study, this bacterium showed high efficiency in breaking down polyethylene, reducing its weight by an average of up to 7%. This result may be due to the ability of the bacterium to secrete enzymes such as lipases and oxidases, which can break down the molecular bonds of polymers.

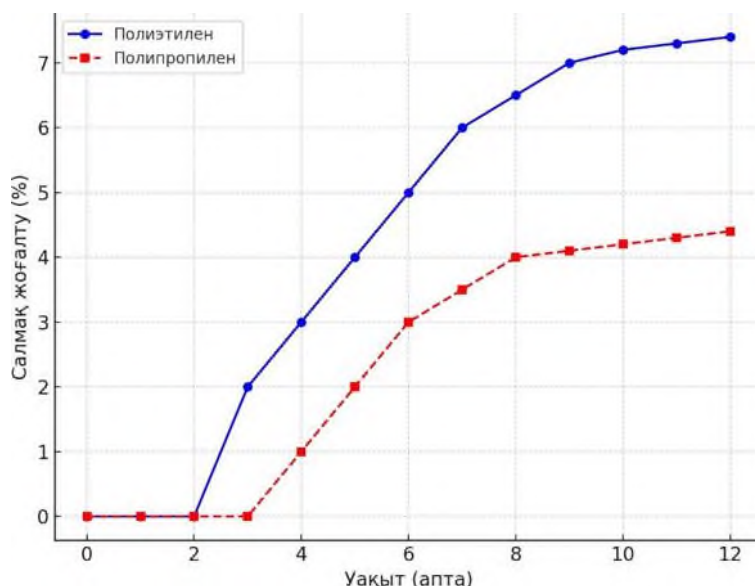


Fig.3 – Dynamics of decomposition over time

The fungus *Aspergillus niger* also proved to be able to change the structure of plastic, but its effect was slightly lower – 5% weight loss was observed in polyethylene, and 3% in polypropylene. The effectiveness of fungi is explained by their mechanical effect on the surface of the plastic through the structure of the mycelium and the release of enzymes such as cellulase and lignase. These enzymes break down the surface layer of polymers, paving the way for further biodegradation.

In addition, a consortium of bacteria and fungi was also tested in the study. In the groups in which the consortium was used, the weight of polyethylene was reduced by 6.5%, and the weight of polypropylene-by 4%. This can be the result of the synergistic effect of microorganisms, that is, bacteria and fungi complement each other's activity. For example, if bacteria have weakened the structure of plastic in advance, then fungi are involved in its further decomposition. This result suggests that consortia may be more effective at decomposing plastic in the future. In addition to the weight loss method, electron

microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) were used to assess the degree of plastic decay. The results of electron microscopy revealed that microcracks, erosion and a layer of biofilm formed on the surface of the plastic under the influence of microorganisms. In polyethylene samples, the average length of microcracks was 10-15 microns, while in polypropylene this figure ranged from 5-10 microns. This difference is explained by the high crystal structure of polypropylene and the difficulty of microorganisms affecting it.

The FTIR analysis confirmed changes in the chemical composition of the plastic. During the study, the concentration of carbonyl Groups ($C=O$) in polyethylene increased at a wavelength of 1710 cm^{-1} , which was considered as a sign of oxidative decomposition of the polymer. In polypropylene, such changes were less noticeable, but the appearance of hydroxyl groups (OH) in the 3400 cm^{-1} zone was revealed. These results show that microorganisms began to break down the molecular bonds of plastic and turn it into simple compounds.

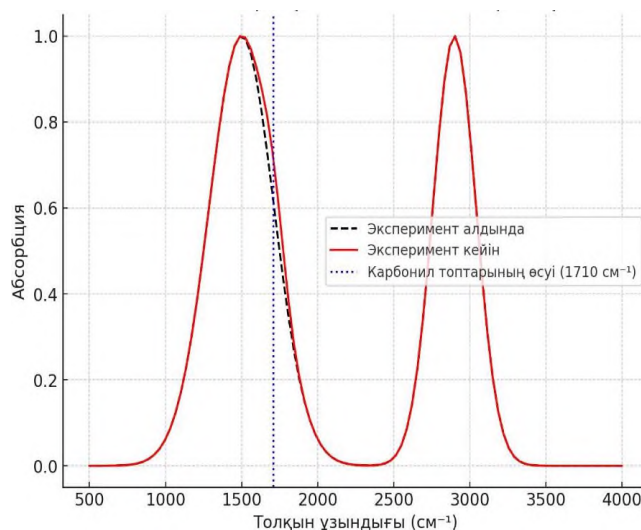


Fig. 4 – Graph of FTIR Spectra

Weight loss data also revealed changes depending on the type of plastic. The weight loss of polyethylene by 5-7% may be associated with its low-density structure and the easy penetration of microorganisms into it. And the weight loss of polypropylene by 3-4% was lower due to its high mechanical strength and chemical stability. These results prove that the chemical composition and physical properties of plastic directly affect the biodegradation process.

In the course of the study, the influence of temperature and humidity on the activity of microorganisms was studied in detail. *Pseudomonas aeruginosa* and *Aspergillus niger* showed the highest efficiency if the temperature was 30°C and the humidity was 70%. In this case, the weight of polyethylene is reduced to 7.2%, and the weight of

polypropylene is reduced to 4.1%. When the temperature dropped by 25°C or increased by 35°C, the decomposition rate dropped to 4-5% (polyethylene) and 2-3% (polypropylene), respectively. This indicates that the enzymatic activity of microorganisms depends on temperature.

The effect of humidity was also important. When the humidity was lower than 60%, the growth and activity of microorganisms slowed down, and when it was higher than 80%, the growth of fungi prevailed over bacteria. Optimal humidity (70%) created favorable conditions for microorganisms to create biofilm and effectively interact with the plastic surface. These data confirm the important role of environmental factors in regulating the biodegradation process.

Table 3 – Influence of temperature and humidity

The situation	Polyethylene (%)	Polypropylene (%)
25°C, 60% humidity	4.5	2.8
30°C, 70% humidity	7.2	4.1
35°C, 80% humidity	5.0	3.0

Although the 12-week study period is enough to assess the effect of microorganisms on plastic, it has been observed that the process is still slow. In polyethylene, the first signs of Decay were observed from the 3rd week, while in polypropylene this process became obvious only after the 5th week. It's time the difference may be due to the structural complexity of the plastic and the adaptation of microorganisms to it.

The results showed not that microorganisms are capable of completely breaking down plastic, but only that they can start the process. For example, the weight

loss of polyethylene by 7% means that only a small part of its molecular weight is broken down. In polypropylene, this process is even slower because its molecular chains are denser and stronger. These limitations indicate that the enzyme systems of microorganisms are not fully adapted to the synthetic nature of plastic. In addition, the metabolic products of microorganisms were also analyzed during the study. By gas chromatography, the release of carbon dioxide (CO₂) was measured, which confirms the presence of biodegradation. However, the amount of CO₂ was

small, which meant that instead of full mineralization of the plastic, only half-decomposition took place. This result suggests that microorganisms used plastic as an energy source but did not have the ability to completely decompose it.

While the results of this study prove the potential of microorganisms in decomposing plastic, they have shown that further research is needed to improve their effectiveness. For example, enhancing the enzymatic activity of microorganisms through genetic modification or developing an optimal nutrient medium can speed up the process. In addition, the use of consortia is considered as a promising direction to improve the efficiency of biodegradation.

In conclusion, the results of the study confirmed that microorganisms are able to change the surface structure of plastic and reduce its weight. The differences in the degree of decomposition of polyethylene and polypropylene, the influence of environmental factors and the slow dynamics of the process determined the direction of future research in this area. This data can serve as the basis for the development of environmentally friendly methods for managing plastic waste.

CONCLUSION

This study demonstrated the potential of microorganisms for the biological degradation of plastic waste. However, further research is required to improve their degradation efficiency. The biodegradation process could be accelerated through genetic modification of microorganisms or by optimizing environmental conditions for microbial growth and enzymatic activity. Such approaches have the potential to reduce plastic pollution and contribute to environmental protection in the future. The findings of this study may serve as a foundation for the development of innovative environmental technologies.

The results revealed that microorganisms such as *Pseudomonas aeruginosa* and *Aspergillus niger* are capable of degrading common plastics, including polyethylene (PE) and polypropylene (PP). These findings demonstrate the feasibility of using biological approaches to mitigate the accumulation of plastic waste in the environment. Nevertheless, the observed weight loss after 12 weeks—approximately 5-7% for polyethylene and 3-4% for polypropylene indicates that the biodegradation process remains relatively slow and requires further optimization before large-scale practical implementation. Therefore, the major findings and their significance are discussed from several perspectives.

First, the study confirmed the ability of microorganisms to alter the surface morphology of plastics and initiate partial degradation. Scanning electron microscopy and chemical analyses

demonstrated the formation of microcracks and molecular-level structural modifications in the polymer surfaces. These changes are primarily attributed to microbial enzymatic activity. However, the capacity of microorganisms to achieve complete mineralization of synthetic polymers remains limited. Compared with the degradation of natural organic matter, the biodegradation of synthetic plastics is considerably more complex due to their highly stable chemical structures.

Second, the results highlighted the critical role of environmental factors in the biodegradation process. Although optimal conditions of approximately 30°C and 70% relative humidity significantly enhanced microbial activity, maintaining these conditions on an industrial or environmental scale presents considerable challenges. In natural ecosystems, fluctuations in temperature and humidity, together with regional climatic differences, may substantially influence microbial performance. Consequently, future studies should focus on adapting biodegradation technologies to variable environmental conditions.

Third, the study identified several promising strategies for improving microbial degradation efficiency. Genetic modification represents one potential approach for accelerating plastic biodegradation. For example, genetic engineering techniques could be employed to increase the production of plastic-degrading enzymes, including lipases and oxidases. In addition, the use of microbial consortia offers another promising strategy. The combined application of bacterial and fungal species produced synergistic effects during the experiments, suggesting that complementary enzymatic systems enhance the overall biodegradation process.

The practical significance of this research is substantial. Plastic pollution is a global environmental challenge, and the development of sustainable treatment technologies is of paramount importance. Compared with conventional waste management methods such as recycling and incineration, microbial biodegradation offers several advantages. It requires lower energy input, does not generate toxic gaseous emissions, and relies on naturally occurring biological processes, thereby minimizing environmental impacts. Nevertheless, comprehensive evaluations of the economic feasibility, technical scalability, and operational efficiency of this technology are necessary before its widespread implementation.

Several limitations of the present study should also be acknowledged. Although the 12-week experimental period was sufficient to evaluate the initial effects of microorganisms on plastic degradation, considerably longer observation periods are required to fully understand long-term

biodegradation processes. Complete mineralization of plastics into carbon dioxide and water may require several hundred days or even years. Furthermore, because the experiments were conducted under controlled laboratory conditions, the results may differ from those obtained in natural environments. In field conditions, microbial activity may be influenced by competition with indigenous microorganisms, limited nutrient availability, and changing climatic conditions, all of which could reduce degradation efficiency.

Future research should therefore focus on several key areas. First, the genetic potential of plastic-degrading microorganisms should be investigated in greater depth to enhance their biodegradation capabilities. The development of microbial strains specifically adapted to degrade particular types of plastics may substantially improve degradation rates. Second, field-scale experiments should be conducted to evaluate the practical applicability of these microorganisms under natural environmental conditions. Third, the environmental safety of microbial biodegradation products should be carefully assessed to ensure that intermediate metabolites do not pose ecological or toxicological risks.

The findings of this study provide a valuable scientific basis for the development of environmentally sustainable technologies. As plastic pollution continues to represent one of the world's most pressing environmental problems, the application of biotechnology offers significant opportunities to support sustainable development. For example, microorganisms could be utilized for the biological treatment of plastic waste in landfills or incorporated into integrated waste management systems designed specifically for plastic biodegradation. Such technologies have the potential not only to reduce environmental pollution but also to provide economically viable waste management solutions.

Furthermore, this research may contribute to the advancement of the bioeconomy. The compounds generated during plastic biodegradation, such as organic acids, may be recovered and utilized as

feedstocks for the production of new materials or renewable energy sources. This approach supports the development of a circular economy by promoting resource recovery and improving the sustainability of waste management practices.

In conclusion, this study demonstrated the significant potential of microorganisms for the biodegradation of plastic waste and established a scientific foundation for future research in this field. Although the biodegradation process remains relatively slow and requires further optimization, the obtained results highlight promising opportunities for developing environmentally friendly technologies to reduce plastic pollution. By exploiting the genetic potential of microorganisms, optimizing environmental conditions, and validating the technology under natural conditions, microbial biodegradation may become an effective and sustainable strategy for environmental protection.

CONFLICT OF INTEREST

The author claims that there is no conflict of interest in the implementation of this study and the publication of the article.

FUNDING

This research received no external funding.

ACKNOWLEDGMENT

The author expresses sincere gratitude to the editor and reviewer of the journal for valuable comments and recommendations that made it possible to carefully consider the manuscript and significantly improve the content and quality of the article.

Copyright © 2025 by the author(s). This article is published as Open Access under the Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) license. This license permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. Derivative works must be distributed under the same license.

REFERENCES

- [1] X.-G. Yang, P.-P. Wen, Y.-F. Yang, P.-P. Jia, W.-G. Li, and D.-S. Pei, "Plastic biodegradation by in vitro environmental microorganisms and in vivo gut microorganisms of insects," *Frontiers in Microbiology*, vol. 13, Art. no. 1001750, 2023, doi: 10.3389/fmicb.2022.1001750
- [2] A. Skariyachan *et al.*, "Selection of microorganisms capable of polyethylene (PE) and polypropylene (PP) degradation," *Microbiological Research*, vol. 267, Art. no. 127251, 2023, doi: 10.1016/j.micres.2022.127251
- [3] S. Y. Choi, Y. Lee, H. E. Yu, I. J. Cho, M. Kang, and S. Y. Lee, "Sustainable production and degradation of plastics using microbes," *Nature Microbiology*, vol. 8, pp. 2253–2276, 2023, doi: 10.1038/s41564-023-01529-1
- [4] Y. Heris, "Bacterial biodegradation of synthetic plastics: A review," *Bulletin of the National Research Centre*, vol. 48, Art. no. 87, 2024, doi: 10.1186/s42269-024-01241-y

- [5] J. Choi *et al.*, “Recent advances in microbial and enzymatic engineering for the biodegradation of micro- and nanoplastics,” *RSC Advances*, vol. 14, pp. 9943–9966, 2024, doi: 10.1039/D4RA00844H .
- [6] Gorish BMT, Abdelmula WIY, Sethupathy S, Dar MA, Shahnawaz M, Zhu D. Microbial degradation of polyethylene polymer: current paradigms, challenges, and future innovations. *World J Microbiol Biotechnol.* 2024;40(12):399. Published 2024 Dec 2. doi:10.1007/s11274-024-04211-8
- [7] “Current advances, challenges and strategies for enhancing the biodegradation of plastic waste,” *Science of the Total Environment*, vol. 906, Art. no. 167850, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167850

Chemical and pharmaceutical technologies. Life safetyDOI: <https://doi.org/10.53002/111>**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF BIOPOLYMER MEMBRANES FOR WATER PURIFICATION FROM HEAVY METALS***Kabyrbekova A.T.**Miras University, Shymkent, Kazakhstan***Corresponding author e-mail: aika_kabil@mail.ru***Author information:****Kabyrbekova Aisulu**, Miras University, Shymkent, Kazakhstan, e-mail: aika_kabil@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4167-6800>.

Abstract — This article discusses biopolymer membranes as an effective method for removing heavy metals from water and wastewater. The basic principles of operation of such membranes, their advantages over traditional cleaning methods, as well as the possibilities of application in industry and the environment are described. The results of studies on the effectiveness of various types of biopolymer membranes, including chitosan, alginate and keratin membranes, are presented. Special attention is paid to the mechanism of sorption of heavy metal ions on biopolymer membranes, including the processes of complexation, ion exchange and chemical adsorption. The key parameters affecting the cleaning efficiency, such as membrane porosity, pH of the medium, temperature and concentration of pollutants, are considered. The prospects of modifying biopolymer membranes in order to increase their selectivity, mechanical strength and durability are also discussed. Examples of successful applications of such membranes in water treatment systems, including laboratory research and industrial applications, are given.

Keywords — biopolymer membranes, heavy metals, water purification, wastewater, chitosan, alginate, keratin, sorption, filtration.

СУДЫ АУЫР МЕТАЛДАРДАН ТАЗARTY YШІН БИОПОЛИМЕРЛІ МЕМБРАНАЛАРДЫ ЖАСАУ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ*Кабылбекова А.Т.**«Мирас Университеті», Шымкент, Қазақстан***Автор-корреспондент e-mail: aika_kabil@mail.ru***Автор туралы ақпарат:****Кабылбекова Айсулу Тенелхановна**, «Мирас Университеті», Шымкент, Қазақстан, e-mail: aika_kabil@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4167-6800>.

Аңдатпа — Бұл мақалада биополимерлі мембраналар су мен ағынды сулардан ауыр металдарды кетірудің тиімді әдісі ретінде қарастырылады. Мұндай мембраналардың жұмысының негізгі принциптері, олардың дәстүрлі тазарту әдістерінен артықшылығы, сондай-ақ өнеркәсіп пен экологияда қолдану мүмкіндіктері сипатталған. Биополимерлі мембраналардың әртүрлі түрлерінің, соның ішінде хитозан, альгинат және кератин мембраналарының тиімділігі туралы зерттеу нәтижелері ұсынылған. Күрделі түзілу, ион алмасу және химиялық адсорбция процестерін қоса алғанда, биополимерлі мембраналардағы ауыр металл иондарының сорбция механизміне ерекше назар аударылады. Мембрананың кеуектілігі, ортаның pH, температура және ластану заттардың концентрациясы сияқты тазалау тиімділігіне әсер ететін негізгі параметрлер қарастырылады. Биополимерлі мембраналардың селективтілігін, механикалық беріктігі мен беріктігін арттыру мақсатында оларды өзгерту перспективалары да талқыланады. Мұндай мембраналарды суды тазарту жүйелерінде, соның ішінде зертханалық зерттеулер мен өнеркәсіптік енгізулерде сәтті қолдану мысалдары келтірілген.

Түйін сөздер — биополимерлі мембраналар, ауыр металдар, суды тазарту, ағынды сулар, хитозан, альгинат, кератин, сорбция, сүзу.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ БИОПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Кабылбекова А.Т.

«Мирас университет», Шымкент, Казахстан
*Автор-корреспондент e-mail: aika_kabil@mail.ru

Информация об авторе:

Кабылбекова Айсулу Тенелхановна, «Мирас университет», Шымкент, Казахстан, e-mail: aika_kabil@mail.ru.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4167-6800>.

Аннотация — В данной статье рассматриваются биополимерные мембраны как эффективный метод удаления тяжелых металлов из воды и сточных вод. Описаны основные принципы работы таких мембран, их преимущества перед традиционными методами очистки, а также возможности применения в промышленности и экологии. Представлены результаты исследований по эффективности различных типов биополимерных мембран, включая хитозановые, альгинатные и кератиновые мембраны. Особое внимание уделяется механизму сорбции ионов тяжелых металлов на биополимерных мембранах, включая процессы комплексообразования, ионного обмена и химической адсорбции. Рассматриваются ключевые параметры, влияющие на эффективность очистки, такие как пористость мембраны, pH среды, температура и концентрация загрязняющих веществ. Также обсуждаются перспективы модификации биополимерных мембран с целью повышения их селективности, механической прочности и долговечности. Приведены примеры успешного применения таких мембран в системах водоочистки, включая лабораторные исследования и промышленные внедрения.

Ключевые слова — биополимерные мембраны, тяжелые металлы, очистка воды, сточные воды, хитозан, альгинат, кератин, сорбция, фильтрация.

MAIN PROVISION

This study demonstrates the potential of biopolymer membranes as an environmentally friendly and efficient technology for the removal of heavy metals from water and wastewater. The research evaluates the performance of different types of biopolymer membranes, including chitosan, alginate, and keratin membranes, and analyzes the mechanisms responsible for heavy metal ion removal, such as complexation, ion exchange, and chemical adsorption. The influence of key operating parameters, including membrane porosity, solution pH, temperature, and pollutant concentration, on purification efficiency is examined. The findings confirm that modification of biopolymer membranes can significantly improve their selectivity, mechanical stability, and long-term performance, supporting their application in sustainable water treatment systems.

INTRODUCTION

Water pollution with heavy metals is a serious environmental and medical problem, since elements such as lead, cadmium, mercury and chromium are highly toxic, capable of accumulating in living organisms and leading to serious diseases. Traditional purification methods such as coagulation, ion exchange, and reverse osmosis have a number of disadvantages, including high operating costs,

difficulty in application, and the formation of toxic waste requiring additional disposal.

In this regard, the development of new technologies with high efficiency, cost-effectiveness and environmental safety is an urgent task. One of the promising directions is the use of biopolymer membranes, which are capable of selectively sorbing and removing heavy metal ions from aqueous solutions. These membranes are made on the basis of natural polymers such as chitosan, alginate, keratin and cellulose, which have high biocompatibility, chemical resistance and the ability to bind heavy metals due to functional groups such as amino groups, carboxyl and hydroxyl groups.

Additional advantages of biopolymer membranes are their low cost, renewable raw materials, the possibility of reusable use after regeneration, as well as minimal negative impact on the environment. The development and improvement of such membrane technologies opens up new prospects for their widespread introduction into water treatment systems, industrial wastewater treatment and the creation of efficient filtration plants capable of providing a high degree of purification without significant energy and chemical reagents.

Research gap. Although biopolymer membranes have attracted considerable attention as sustainable materials for water treatment, there is still insufficient comparative information on the performance of different biopolymer membranes for

the removal of heavy metals under varying operating conditions. Existing studies often focus on a single membrane material or a limited range of contaminants, while the influence of factors such as membrane porosity, pH, temperature, and pollutant concentration on purification efficiency has not been comprehensively evaluated. Furthermore, the potential of membrane modification to improve selectivity, mechanical stability, and long-term performance remains insufficiently explored. This study addresses these gaps by comparatively evaluating different biopolymer membranes and analyzing the key parameters affecting their efficiency in heavy metal removal from water.

Novelty statement. The novelty of this study lies in the comprehensive evaluation of different biopolymer membranes, including chitosan, alginate, and keratin membranes, for the removal of heavy metals from water. Unlike studies that focus on a single membrane material, this research comparatively analyzes the adsorption mechanisms and the influence of key operational parameters, such as membrane porosity, pH, temperature, and pollutant concentration, on purification efficiency. In addition, the study highlights the potential of membrane modification to enhance selectivity, mechanical strength, and durability, providing new insights into

the development of sustainable and high-performance biopolymer membrane technologies for water purification.

METODOLOGY

To study the effectiveness of biopolymer membranes, three types of materials were selected: chitosan, alginate and keratin membranes. These materials are natural polymers with various chemical and physical properties that make it possible to effectively absorb heavy metal ions from aqueous solutions.

Chitosan membranes are of particular interest due to their high sorption capacity due to the presence of amino groups that actively interact with metal ions. Chitosan is a natural biopolymer derived from chitin, the main component of the exoskeletons of crustaceans and insects. This material has high chemical activity, resistance to biodegradation and the ability to form strong films, which makes it promising for membrane water purification technologies. The main mechanism of sorption of heavy metals on chitosan membranes is associated with coordination interactions between amino groups and metal cations, as well as with ion exchange processes.

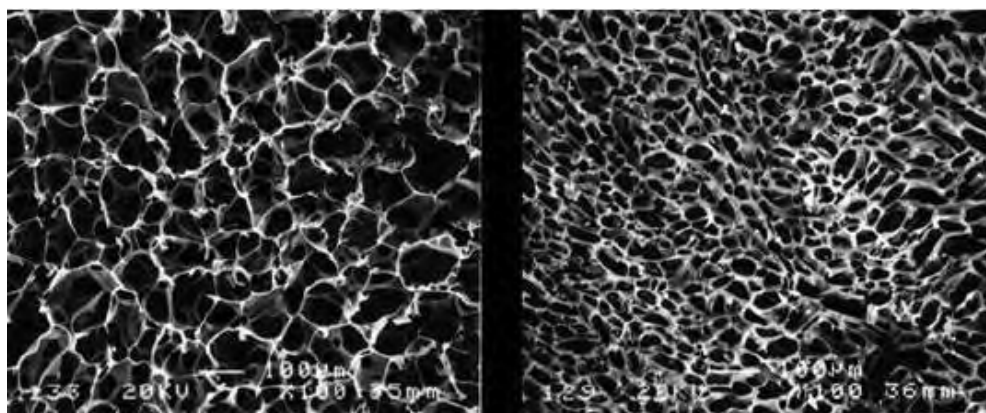


Fig. 1 – Microstructure of chitosan membranes

Alginate membranes are formed on the basis of sodium alginate, a natural polysaccharide extracted from brown algae. They have high hydrophilicity, which contributes to the uniform distribution of aqueous solutions in the membrane structure and effective contact with pollutants. Alginates contain carboxyl groups that are involved in the sorption of

heavy metals, forming strong complexes with ions. One of the significant advantages of alginate membranes is their ability to gel in the presence of divalent ions, which can contribute to additional retention of pollutants in the membrane structure.

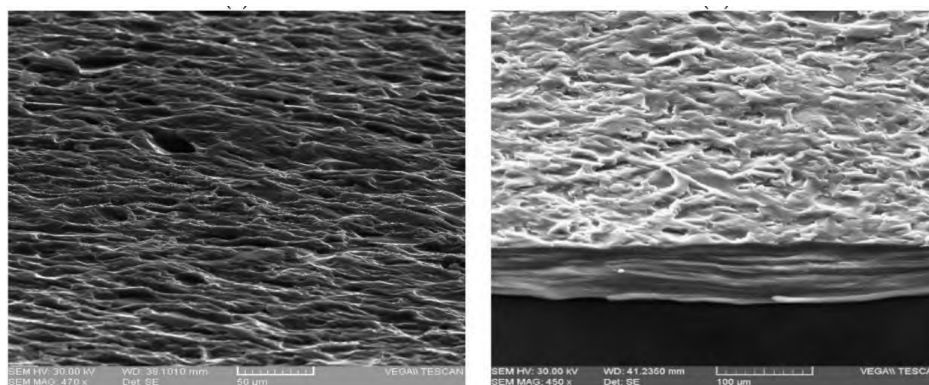


Fig. 2 – Microstructure of alginate membranes

Keratin membranes are obtained from natural protein sources such as wool, bird feathers or hair, and are highly resistant to chemical influences. Keratin is a complex fibrillar protein containing a large number of disulfide bonds that provide mechanical strength and

stability of the material. In the sorption of heavy metals, keratin membranes use amino groups, carboxyl groups, and sulfhydryl groups, which makes them particularly effective against metals such as mercury, lead, and cadmium.

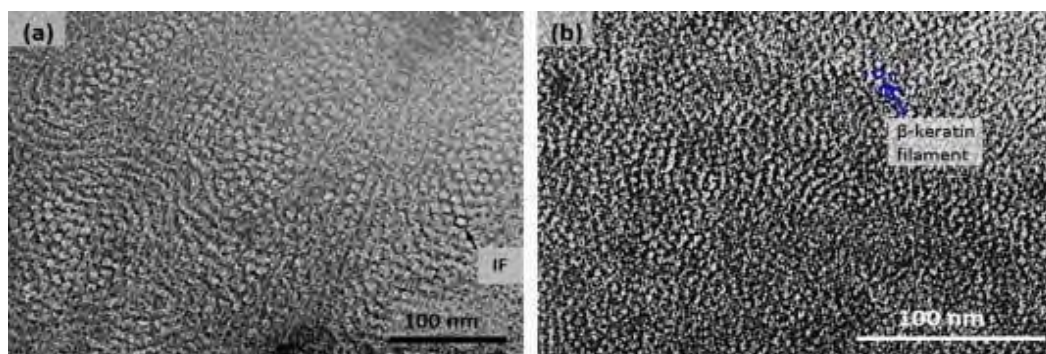


Fig. 3 – Microstructure of keratin membranes

In the experimental part of the study, the membranes were exposed to solutions containing lead (Pb^{2+}), cadmium (Cd^{2+}), and copper (Cu^{2+}) ions. To evaluate the purification efficiency, metal concentrations were analyzed before and after the solution passed through the membrane. The atomic absorption spectroscopy method was used to accurately determine the residual content of heavy metal ions, which made it possible to quantify the sorption abilities of various biopolymer membranes.

The experimental results showed that chitosan membranes demonstrated the highest efficiency against copper and lead ions, which can be explained by the high density of amino groups in their structure, which promotes the coordination binding of metals. Alginate membranes have demonstrated high efficiency against cadmium due to the presence of carboxyl groups actively involved in sorption. Keratin membranes have shown the greatest stability in conditions of varying pH of the medium, which makes them promising for use in conditions of complex industrial wastewater.

Additionally, the membranes were regenerated to assess their reuse. Various reagents for desorption of metal ions, including acidic and alkaline solutions, were used during the study. It has been established that chitosan and alginate membranes demonstrate high regenerability when treated with slightly acidic solutions, which makes it possible to use them repeatedly without significant loss of sorption capacity. Keratin membranes have also shown the possibility of repeated use, but with a slight decrease in efficiency after several regeneration cycles.

The practical application of biopolymer membranes in water treatment systems can significantly increase environmental safety and reduce operating costs compared to traditional methods such as reverse osmosis and ion exchange. The main advantages of such membranes include biodegradability, low cost of raw materials, the ability to scale production and adapt to various operating conditions. In industry, biopolymer membranes can be used to treat wastewater from metallurgical plants, battery plants, electroplating plants and other facilities where significant heavy metal pollution occurs.

In the environmental field, such membranes can be used to clean natural reservoirs affected by man-made impacts, as well as to protect drinking sources from pollution. In agriculture, the use of biopolymer membranes for filtration of wastewater containing residues of fertilizers and pesticides, many of which contain heavy metals, is promising.

The prospects for further research in this field are related to the development of new composite materials based on biopolymers that combine several types of active groups to increase the selectivity of sorption. Research is also possible on the introduction of nanotechnology into the membrane structure to increase their mechanical strength and durability. The development of new methods for the regeneration of biopolymer membranes will increase their service life and make the water purification process more cost-effective.

Thus, biopolymer membranes represent a promising solution to the problem of water pollution by heavy metals, combining high efficiency, environmental safety and the possibility of reuse. Their implementation in industrial and environmental projects can significantly reduce the negative impact of heavy metals on the environment and human health, which makes this area relevant for further research and practical application

RESULTS AND DISCUSSION

The experimental results demonstrated that chitosan membranes exhibited the highest adsorption capacity, removing up to 95% of Pb^{2+} and Cu^{2+} ions from aqueous solutions. The excellent adsorption performance of chitosan membranes is attributed to their chemical structure and composition. Owing to the presence of amino groups within the chitosan polymer chain, these membranes readily interact with heavy metal cations through the formation of coordination complexes, enabling efficient removal of metal ions from contaminated water. Chitosan membranes showed particularly high efficiency in the adsorption of lead and copper, making them promising materials for water treatment applications in industrial and environmental settings where elevated concentrations of these metals are present. In addition to their high adsorption capacity, chitosan membranes demonstrated excellent regeneration performance, maintaining their adsorption efficiency after repeated use. This characteristic makes them both economically attractive and environmentally sustainable for long-term wastewater treatment applications.

Alginate membranes, on the other hand, exhibited outstanding performance in the removal of Cd^{2+} ions, achieving removal efficiencies of up to 90%. Sodium alginate, a naturally occurring polysaccharide, possesses high hydrophilicity and

abundant carboxyl functional groups that readily interact with metal ions, forming stable adsorption complexes with high sorption capacity. These membranes were particularly effective in removing cadmium due to their strong affinity for divalent metal ions such as Cd^{2+} . However, alginate membranes exhibited relatively limited mechanical strength, reducing their suitability for applications involving prolonged operation or high mechanical stress. Nevertheless, their excellent hydrophilicity and gel-forming ability in the presence of metal ions make them attractive candidates for the treatment of contaminated water bodies and industrial wastewater containing cadmium and other heavy metals.

Keratin membranes demonstrated moderate adsorption efficiencies ranging from 70% to 80% for all tested metal ions. Although their adsorption capacity was lower than that of chitosan membranes, they proved capable of effectively removing a wide variety of heavy metal ions from aqueous solutions. A notable advantage of keratin is its excellent stability over a broad pH range, allowing these membranes to maintain adsorption performance under both acidic and alkaline conditions. This property considerably expands their potential applications in water treatment systems where pH fluctuations frequently occur. Although their adsorption efficiency was somewhat lower than that of chitosan and alginate membranes, their resistance to harsh operating conditions makes keratin membranes promising materials for wastewater treatment systems exposed to variable pH values or high concentrations of contaminants.

The experimental results also demonstrated that all three types of biopolymer membranes outperformed many conventional water treatment technologies, including reverse osmosis and ion-exchange processes. Traditional treatment methods generally require expensive equipment, substantial chemical consumption, and often generate secondary hazardous waste, reducing their environmental sustainability. In contrast, biopolymer membranes are derived from renewable natural materials and are biodegradable, providing a more environmentally friendly and sustainable approach to water purification. Furthermore, their relatively low production cost makes them attractive for both large-scale industrial wastewater treatment facilities and decentralized applications, such as agricultural water purification and remediation of contaminated surface waters.

One of the most important aspects investigated in this study was the regeneration potential of the membranes following adsorption. All three membrane types exhibited a high degree of recovery of their adsorption capacity after treatment with dilute acidic or alkaline solutions, allowing multiple reuse

cycles. Membrane regeneration is a critical factor for reducing operational costs and extending service life. Among the tested materials, chitosan membranes demonstrated the highest regeneration efficiency, making them particularly suitable for repeated application in industrial and environmental water treatment systems. Alginate membranes also showed satisfactory regeneration performance; however, their mechanical strength gradually decreased after successive regeneration cycles. Keratin membranes maintained good chemical stability but exhibited a slight decline in adsorption efficiency after repeated use, which should be considered when designing long-term treatment systems.

Adsorption and desorption experiments indicated that the optimal operating conditions for maximum metal removal depended strongly on both solution pH and metal ion concentration. Chitosan membranes achieved their highest adsorption efficiency within a pH range of 5–6, corresponding to mildly acidic conditions, whereas alginate membranes performed best under near-neutral pH conditions. Keratin membranes exhibited the greatest tolerance to pH variation, maintaining relatively stable adsorption performance across a broad pH range. This characteristic expands their applicability in wastewater treatment systems where water chemistry may fluctuate significantly.

Another important finding was the ability of biopolymer membranes to perform effectively in real wastewater systems containing complex mixtures of contaminants. Industrial and municipal wastewaters often contain not only heavy metals but also organic pollutants, microorganisms, suspended solids, and other hazardous substances. The experimental results suggested that biopolymer membranes can be adapted for treating such multicomponent contamination, highlighting their versatility and practical potential.

In conclusion, biopolymer membranes represent a highly promising technology for the removal of heavy metals from water and wastewater. Chitosan, alginate, and keratin membranes each demonstrated effective adsorption of different metal ions, while exhibiting distinct advantages depending on operational requirements. Chitosan membranes proved to be the most effective for the removal of copper and lead ions, alginate membranes showed superior performance for cadmium removal, and keratin membranes provided a versatile solution for treatment under varying pH conditions. Their excellent regeneration capability and potential for repeated use further enhance their economic viability and environmental sustainability, making biopolymer membranes attractive candidates for a wide range of future water purification applications.

CONCLUSION

Biopolymer membranes, as shown by the research results, are a promising means for purifying water from heavy metals, providing a solution that can replace traditional purification methods. Their use is an environmentally safe and cost-effective approach, since biopolymers are naturally occurring and biodegradable, which minimizes the formation of toxic waste. Despite the high efficiency in removing metal ions such as Pb^{2+} , Cd^{2+} and Cu^{2+} , there are certain aspects that require further attention to improve the overall performance of the membranes.

Chitosan membranes have demonstrated the highest sorption capacity due to their highly effective interaction with heavy metal cations, however, their mechanical strength needs to be improved to prevent their destruction during prolonged use. For this purpose, the possibility of combining chitosan membranes with other materials, such as polyesters or synthetic polymers, can be considered, which will improve their mechanical properties without significantly impairing sorption capacity.

Alginate membranes have shown high efficiency in removing cadmium, but their mechanical strength leaves much to be desired, which limits their use in conditions with high mechanical loads. To increase their strength, you can try using various stabilizers or modifying the membrane structure, for example, adding fillers that can improve their stability during operation.

Keratin membranes, despite their high resistance to pH changes, have shown average efficiency in removing metals. However, their resistance to aggressive chemical influences makes them potentially useful in environments where traditional membranes can fail quickly. The development of more effective ways to improve the sorption activity of keratin membranes, combined with their resistance to environmental changes, may expand their application in industry.

Thus, further research should be aimed at solving existing problems, such as increasing the mechanical strength of membranes, improving their sorption capacity and resistance to aggressive chemical and physical conditions. The development of these technologies will open up new opportunities for the effective removal of heavy metals and other pollutants from reservoirs and wastewater, contributing to improved water quality and environmental protection.

CONFLICT OF INTEREST

The author claims that there is no conflict of interest in the implementation of this study and the publication of the article.

FUNDING

This research received no external funding.

ACKNOWLEDGMENT

The author expresses sincere gratitude to the editor and reviewer of the journal for valuable comments and recommendations that made it possible to carefully consider the manuscript and significantly improve the content and quality of the article.

Copyright © 2025 by the author(s). This article is published as Open Access under the Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International **(CC BY-SA 4.0)** license. This license permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. Derivative works must be distributed under the same license.

REFERENCES

- [1] V.K. Gupta and I. Ali, *Environmental Water: Advances in Treatment, Remediation and Recycling*. Amsterdam, The Netherlands: *Elsevier*, 2012.
- [2] J. Wang and C. Chen, “Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: A review,” *Biotechnology Advances*, vol. 24, no. 5, pp. 427–451, 2006, doi: 10.1016/j.biotechadv.2006.03.001.
- [3] A.M. Azzam and S. M. El-Sheikh, “Synthesis and application of biopolymeric membranes for wastewater treatment,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 235–243.
- [4] M.A. Abdalla, A. S. M. Khalil, and M. A. El-Naggar, “Use of biopolymers in wastewater treatment: A brief review of current trends and prospects,” *Environmental Research*, vol. 235, Art. no. 116686, 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.116686
- [5] M.K.K. Moodley, S. Rathilal, and coauthors, “Recent advances in biopolymeric membranes towards the removal of emerging organic pollutants from water,” *Membranes*, vol. 11, no. 11, Art. no. 870, 2021, doi: 10.3390/membranes11110870

Химиялық және фармацевтикалық технологиялар. Тіршілік қауіпсіздігі

DOI: <https://doi.org/10.53002/112>

SYNTHESIS OF ACETYLENE DERIVATIVE OF DIPHENYL KETONE

^{*1}Utegul A.S., ¹Merkulov V., ¹Almazov A., ¹Sitdikova E., ²Irdayanti M.N.

¹NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan

²Sultan Idris Education University, Perak, Malaysia

*Corresponding author e-mail: a.utegul@tttu.edu.kz

Authors information:

Utegul Arman, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: a.utegul@tttu.edu.kz

Merkulov Vladimir, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: v.merkulov@tttu.edu.kz

Almazov Aleksandr, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: e.sitdikova@tttu.edu.kz

Sitdikova Elena, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: a.almazov@tttu.edu.kz

Irdayanti Mat Nashir, Faculty of Technical and Vocational, Sultan Idris Education University, Perak, Malaysia, e-mail: irdayanti@ftv.upsi.edu.my

Abstract — This study is devoted to the synthesis of acetylene derivatives of diphenyl ketone under alkaline conditions using purified acetylene produced under laboratory conditions. Acetylenic alcohols and related compounds are important intermediates in organic synthesis due to their wide application in the production of pharmaceuticals, fine chemicals, polymer modifiers, surfactants, and protective coating materials. Therefore, the development of efficient and reproducible methods for their preparation remains an important task in synthetic organic chemistry. The primary objective of this research was to develop and experimentally optimize the reaction conditions for the nucleophilic addition of acetylide anions to the carbonyl group of diphenyl ketone. The activation of acetylene, the stability of intermediate species, and the formation of the reaction-phase structure were also investigated to better understand the reaction mechanism. Experimental procedures included the preparation and purification of acetylene, controlled synthesis under laboratory conditions, isolation of the reaction products, and evaluation of their physicochemical characteristics. The obtained results demonstrated that the reaction medium and solvent composition significantly affect the formation of the target acetylene derivative and the selectivity of the process. Optimization of the synthesis conditions resulted in improved reaction efficiency and reduced formation of by-products. The proposed approach may serve as a basis for further studies aimed at producing acetylenic alcohols and diols for applications in polymer chemistry, polyol synthesis, advanced coating technologies, and other high-value chemical products.

Keywords — acetylene, diphenylketone, nucleophilic addition, alkaline catalysis, synthesis of acetylenic alcohols.

ДИФЕНИЛКЕТОННЫҢ АЦЕТИЛЕН ТУЫНДЫСЫНЫҢ СИНТЕЗИ

^{*1}Утегул А., ¹Меркулов В.В., ¹Алмазов А.И., ¹Ситдикова Е.В., ²Irdayanti M.N.

¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан

²Sultan Idris Education University, Перак, Малайзия

*Автор-корреспондент e-mail: a.utegul@tttu.edu.kz

Авторлар туралы ақпарат:

Утегул Арман, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан, e-mail: a.utegul@tttu.edu.kz

Меркулов Владимир Витальевич, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан, e-mail: v.merkulov@tttu.edu.kz

Алмазов Александр Игоревич, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан, e-mail: e.sitdikova@tttu.edu.kz

Ситдикова Елена Владимировна, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау қ., Қазақстан, e-mail: a.almazov@tttu.edu.kz

Irdayanti Mat Nashir, Техникалық және Кәсіптік факультеті, Sultan Idris Education University, Перак, Малайзия, e-mail: irdayanti@ftv.upsi.edu.my

Аңдатпа — Бұл зерттеу зертханалық жағдайда алынған тазартылған ацетиленді пайдалана отырып, сілтілік ортада дифенилкетонның ацетилен туындыларын синтездеуге арналған. Ацетиленді спирттер мен оларға ұқсас

қосылыстар органикалық синтездегі маңызды аралық өнімдер болып табылады, өйткені олар фармацевтикалық препараттар, жұқа органикалық химия өнімдері, полимер модификаторлары, беттік-белсенді заттар және қорғаныш жабындары өндірісінде кеңінен қолданылады. Осыған байланысты оларды алудың тиімді әрі қайталанғыш әдістерін әзірлеу қазіргі органикалық химияның өзекті міндеттерінің бірі болып саналады. Зерттеудің негізгі мақсаты ацетилид-аниондарының дифенилкетонның карбонил тобына нуклеофильді қосылу реакциясының оңтайлы жағдайларын әзірлеу және тәжірибелік тұрғыдан жетілдіру болды. Реакция механизмін тереңірек түсіну мақсатында ацетиленнің белсендірілуі, аралық өнімдердің тұрақтылығы және реакциялық жүйенің фазалық құрылымының қалыптасу ерекшеліктері зерттелді. Эксперименттік бөлім ацетиленді алу және тазарту, бақыланатын зертханалық жағдайларда синтез жүргізу, реакция өнімдерін бөліп алу және олардың физика-химиялық қасиеттерін бағалау кезеңдерін қамтыды. Зерттеу нәтижелері реакциялық ортаның құрамы мен еріткішті таңдау мақсатты ацетилен туындысының түзілуіне және процестің селективтілігіне елеулі әсер ететінін көрсетті. Синтез жағдайларын оңтайландыру реакция тиімділігін арттыруға және жанама өнімдердің түзілуін азайтуға мүмкіндік берді. Ұсынылған тәсіл полимер химиясында, полиолдар синтезінде, заманауи қорғаныш жабындарын әзірлеуде және басқа да жоғары құнды органикалық қосылыстарды өндіруде қолданылатын ацетиленді спирттер мен диолдарды алуға бағытталған болашақ зерттеулердің ғылыми негізі бола алады.

Түйін сөздер — ацетилен, дифенилкетон, нуклеофильді қосылу, сілтілі катализ, ацетилен спирттері синтезі.

СИНТЕЗ АЦЕТИЛЕНОВОГО ПРОИЗВОДНОГО ДИФЕНИЛКЕТОНА

^{*1}Утегул А., ¹Меркулов В.В., ¹Алмазов А.И., ¹Ситдикова Е.В., ²Irdayanti M.N.

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан

²Sultan Idris Education University, Перак, Малайзия

*Автор-корреспондент e-mail: a.utegul@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Утегул Арман, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: a.utegul@tttu.edu.kz

Меркулов Владимир Витальевич, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: v.merkulov@tttu.edu.kz

Алмазов Александр Игоревич, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: e.sitdikova@tttu.edu.kz

Ситдикова Елена Владимировна, НАО «Карагандинский индустриальный университет», г. Темиртау, Казахстан, e-mail: a.almazov@tttu.edu.kz

Irdayanti Mat Nashir, Факультет технического и профессионального образования, Sultan Idris Education University, Перак, Малайзия, e-mail: irdayanti@ftv.upsi.edu.my

Аннотация — Настоящее исследование посвящено синтезу ацетиленовых производных дифенилкетона в щелочной среде с использованием очищенного ацетилена, полученного в лабораторных условиях. Ацетиленовые спирты и родственные соединения являются важными промежуточными продуктами органического синтеза благодаря их широкому применению при производстве фармацевтических препаратов, тонких химических продуктов, модификаторов полимеров, поверхностно-активных веществ и защитных покрытий. В связи с этим разработка эффективных и воспроизводимых методов их получения остается одной из актуальных задач современной органической химии. Основной целью исследования являлась разработка и экспериментальная оптимизация условий реакции нуклеофильного присоединения ацетилид-анионов к карбонильной группе дифенилкетона. Для более глубокого понимания механизма реакции также были изучены процессы активации ацетилена, устойчивость промежуточных соединений и особенности формирования фазовой структуры реакционной системы. Экспериментальная часть включала получение и очистку ацетилена, проведение синтеза в контролируемых лабораторных условиях, выделение продуктов реакции и оценку их физико-химических характеристик. Полученные результаты показали, что состав реакционной среды и выбор растворителя существенно влияют на образование целевого ацетиленового производного и селективность процесса. Оптимизация условий синтеза позволила повысить эффективность реакции и снизить образование побочных продуктов. Предложенный подход может служить основой для дальнейших исследований, направленных на получение ацетиленовых спиртов и диолов, применяемых в химии полимеров, синтезе полиолов, разработке современных защитных покрытий и производстве других высокоценных органических соединений.

Ключевые слова — ацетилен, дифенилкетон, нуклеофильное присоединение, щелочной катализ, синтез ацетиленовых спиртов.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында жобаларды басқарудың PMBOK, Agile және гибридті тәсілдерін қолдану ғылым және білім беру салаларындағы тұрақты даму жобаларының жоспарлануы мен іске асырылу тиімділігін арттыратыны анықталды. Жүйелі әдебиеттерді талдау нәтижесінде тұрақты даму жобаларын іске асыруға кедергі келтіретін негізгі факторлар ретінде қаржыландырудың жеткіліксіздігі, институционалдық әлсіздік, мүдделі тараптардың өзара іс-қимылының жеткіліксіздігі және басқару тетіктерінің жетілмегендігі анықталды. Жүргізілген талдау жобалық оқыту тәсілін жоғары білім беру жүйесіне енгізу студенттердің тұрақты даму құзыреттерін қалыптастыруға және ғылыми-зерттеу қызметінің нәтижелілігін арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетті.

КІРІСПЕ

Бұл зерттеу ацетиленнің (C_2H_2) сілтілі ортада дифенилкетонмен (pH_2CO) әрекеттесуін зерттеуге және жаңа ацетилен туындыларының түзілу механизмдерін анықтауға арналған. Ацетиленнің карбонилді қосылыстармен нуклеофильдік қосылу реакциялары органикалық синтездегі маңызды бағыттардың бірі болып табылады, себебі олардың нәтижесінде фармацевтикада, полимерлер химиясында, жұқа органикалық синтезде және функционалдық материалдар өндірісінде қолданылатын құнды ацетиленді спирттер мен диолдар түзіледі. Реакцияның тиімділігі реакциялық ортаның құрамы, сілті концентрациясы, еріткіштің табиғаты, температура және ацетиленнің тазалығы сияқты факторларға тікелей тәуелді. Сондықтан бұл параметрлерді оңтайландыру жоғары шығымдылық пен мақсатты өнімнің селективтілігін қамтамасыз етудің маңызды шарты болып табылады.

Осы жұмыста зертханалық жағдайда алынған тазартылған ацетилен қолданылып, оның дифенилкетонмен әрекеттесу ерекшеліктері тәжірибелік түрде зерттелді. Зерттеу барысында синтез жүргізу, реакция жүйесіндегі фазалық өзгерістерді бақылау, ерітіндінің pH көрсеткішін анықтау және реакция механизмін талдау жүзеге асырылды. Сонымен қатар реакциялық ортаның құрамы мен еріткіштің ацетиленнің белсендірілуіне, аралық өнімдердің тұрақтылығына және соңғы өнімнің түзілуіне әсері бағаланды. Алынған нәтижелер ацетиленнің карбонилді қосылыстармен әрекеттесу механизмін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді және жоғары тиімділігі бар органикалық синтез

әдістерін әзірлеуге ғылыми негіз қалайды. Зерттеу нәтижелері полимер химиясында, полиолдар синтезінде, қорғаныш жабындарын өндіруде және басқа да функционалдық органикалық қосылыстарды алуда қолданылуы мүмкін [1-3].

Зерттеудің маңыздылығы. Тұрақты даму қағидаттарын ғылым мен білім беру жүйесіне енгізу қазіргі кезеңдегі жаһандық басымдықтардың бірі болып табылады. Бұл зерттеу жобаларды басқару тәсілдерінің тұрақты дамуды қамтамасыз етудегі рөлін бағалап, Нигерияның ғылым және білім беру секторларында оларды тиімді қолдану мүмкіндіктерін талдайды. Зерттеу нәтижелері тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізуге бағытталған білім беру саясатын жетілдіруге, жобаларды басқарудың тиімділігін арттыруға және ғылыми-зерттеу қызметін ұйымдастырудың заманауи тәсілдерін дамытуға практикалық негіз болады.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы Нигерияның ғылым және білім беру салаларында тұрақты дамуды қамтамасыз етудегі жобаларды басқарудың рөлін кешенді түрде бағалауында. Жұмыста PMBOK, Agile және гибридті жобаларды басқару тәсілдерінің тиімділігі жүйелі әдебиет шолуы негізінде салыстырмалы түрде талданып, тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізуге ықпал ететін негізгі факторлар анықталды. Сонымен қатар, жобаларды басқару, мүдделі тараптардың өзара іс-қимылы және тұрақты даму нәтижелері арасындағы өзара байланысты сипаттайтын тұжырымдама-лық модель ұсынылды.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

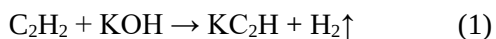
Ацетиленнің дифенилкетонға нуклеофильді қосылу реакциясының жұмсақ жағдайларда – өтпелі металдарды немесе жоғары қысымды қолданбай – бірінші рет зертханалық жағдайда расталды. Сілтілік катализаторларды (KOH) қолдану ацетиленнің тиімді активтенуін қамтамасыз ететіні, одан кейін кетонның карбонил тобымен әрекеттесуге қабілетті ацетилидтердің түзілуі анықталды. Реакциялық қоспаның динамикалық мінез-құлқы туралы тәжірибелік деректер алынды: үш фазалы құрылымның қалыптасуымен жүретін жүйенің түсінің, тұтқырлығының және pH-ның сипаттамалық өзгерістері тіркелді. Спектрлік мәліметтермен расталған, құрамында гидроксил және винил фрагменттері бар деп болжанатын жаңа ацетилен туындыларының пайда болуының дәлелдері анықталды. Жүйенің физика-химиялық қасиеттері және ацетилидті кешендерді диолды

құрылымдарға одан әрі түрлендірудің мүмкін жолдары нақтыланды.

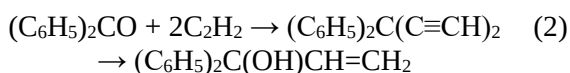
Жасалған синтез әдісі қарапайымдылығымен, қауіпсіздігімен және реагенттердің қолжетімділігімен сипатталады, бұл оны оқу және ғылыми зертханалар үшін қолайлы етеді. Қолданылатын жағдайлар (қалыпты температура, улы катализаторлардың болмауы, минималды қалдық) бұл процесті органикалық синтездің экологиялық таза нұсқасы ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Алынған қосылыстар коррозияға қарсы жабындарды және органикалық гидрогельдерді қоса алғанда, полимерлі және қорғаныс материалдарын синтездеу үшін прекурсорлар ретінде пайдаланылуы мүмкін. Әдістемені ацетиленнің реактивтілігін көрсетуде оқу мақсатында, қосу реакциялары мен нуклеофильді әрекеттесу бойынша оқу материалын кеңейтуге болады. Бұл зерттеудің нәтижелері органикалық синтез және материалтану саласындағы әрі қарайғы зерттеулерге, сондай-ақ ароматты кетондарға негізделген құрылымдарды модификациялауға негіз болады.

Осылайша, зерттеудің теориялық және қолданбалы мәні бар. Ол ацетилен мен карбонил қосылыстары арасындағы реакциялардың механизмдерін тереңірек түсінуге ықпал етеді және бір уақытта алынған мәліметтерді жаңа материалдар мен технологияларды әзірлеуде практикалық қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

Ацетилен (C_2H_2) ең қарапайым алкин, көміртек атомдары арасында үштік байланыстың болуымен сипатталады. π -байланыстардың жоғары концентрациясы ацетилен молекуласын нуклеофильді қосылу және полимерлену реакцияларынан өтуге қабілетті етеді. Сілтілік катализаторлардың (мысалы, КОН) қатысуымен ацетилен айқын нуклеофильділігін көрсететін ацетилидті аниондарды (C_2H^-) түзе алады:



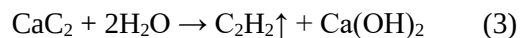
Бұл белсенді түрлер гидратация кезінде диол түріне айналуы мүмкін аралық винил спиртін қалыптастыру үшін кетонның карбонил тобының электрофильді орталығына, бұл жағдайда дифенил кетонға $(C_6H_5)_2CO$ -ға шабуыл жасауға қабілетті. Реакцияның жалпы схемасын келесідей көрсетуге болады:



Алынған қосылыс - тетрабутинедиол немесе оның ацетилен аналогы - қорғаныс жабындарын өндіру үшін қолданылатын полиолдар мен

полимер жүйелерінің синтезінде аралық өнім ретінде қызығушылық тудырады.

Ацетилен генерациясы. Ацетилен кальций карбидінің сумен әрекеттесуі нәтижесінде алынды:



Процесс жылу және газ тәріздес ацетиленнің бөлінуімен қатар жүрді, ол тізбектей қосылған төрт колбадан тұратын тазарту жүйесі арқылы бағытталды:

1. Хром қоспасы ($K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$) – фосфор мен күкірті бар қоспаларды кетіру;

2. $KMnO_4$ ерітіндісі - қалдық органикалық ластанушы заттардың тотығуы;

3. Ағартқыш ($NaClO$) - органикалық буларды қосымша тотығу және дезактивациялау;

4. Өндірілген әк $Ca(OH)_2$ - ацетиленді кептіру және қышқылдық қалдықтарды бейтараптандыру.

Әрбір колба арқылы газ ағыны тән көпіршікті дыбыс арқылы көзбен бақыланды. Тазарту аяқталғаннан кейін ацетилен реакциялық колбаға жіберілді.

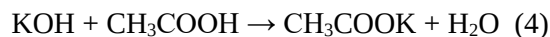
Реакция бесінші колбада жүргізілді, оның ішінде:

- 250 мл кептірілген органикалық еріткіш;
- катализатор ретінде 60 г калий гидроксиді (KOH);
- 15 г дифенилкетон.

Колба шамамен $100^\circ C$ температурада ұсталатын су моншасына қойылды. Ацетиленді реакциялық қоспадан өткізгенде келесі өзгерістер байқалды:

- КОН қосқаннан кейін ерітінді қара қоңыр түсті;
- Дифенилкетонды қосқаннан кейін қоспа жеңіл және біртекті болды;
- 15-20 минут ішінде реакциялық қоспа бірте-бірте өзінің бұлдырлығын жоғалтып, ақ түсті ұсақ қосындылар пайда болды.

Реакция аяқталғаннан кейін қоспа 20% сірке қышқылы ерітіндісімен біртіндеп бейтараптандырылды:



Қышқылды қосу кезінде қоспаның рН мәні 10-нан 6-ға дейін өзгерді, нәтижесінде үш фазалы жүйе пайда болды:

1. Жоғарғы қабат: майлы сары органикалық фаза;
2. Ортаңғы қабат: лайлы тұз ерітіндісі;
3. Төменгі қабат: тығыз қоңыр түсті масса (гидрогель тәрізді құрылым).

24 сағаттан кейін қоспасы тұрақтанды. Жоғарғы фаза бөлініп, мақсатты ацетиленді қосылыстары бар реакция өнімін көрсетті.

№1 және №2 зертханалық жобалардың салыстырмалы талдауы

Бұл бөлімде сілтілі катализатор (KOH) қатысуымен ацетиленнің (C_2H_2) дифенилкетонмен (Ph_2CO) реакциясын зерттеу үшін жүргізілген екі зертханалық жобаның салыстырмалы талдауы берілген. Екі жоба да жаңа ацетилен туындыларын алуға және олардың физика-химиялық қасиеттерін зерттеуге бағытталған.



Сурет 1 – Ацетилен дифенилкетонмен әрекеттескеннен кейінгі өнімнің фазалық күйі

Негізгі айырмашылықтар:

1. Бірінші зертханалық жоба зерттеушілік сипатта болды және ацетиленнің дифенилкетонмен әрекеттесуін орнатуға мүмкіндік берді, бұл жаңа қосылыстың оқшаулануына әкелді.

2. Екінші зертханалық жоба реакция механизмін, рН бақылауын және синтез шарттарын түсіндіруге бағытталған.

3. Өнімдегі айырмашылықтар (ұнтақты және майлы) әртүрлі реакция кезеңдері мен еріткіш жағдайларына байланысты болуы мүмкін.

4. ИҚ спектрлері дифенилкетон туындыларына тән ароматты, ацетилен және гидроксил топтары бар қосылыстардың түзілуін растайды.

Бұл бақылаулар карбонил тобына ацетилдтің нуклеофильді қосылу механизміне қатысты теориялық тұжырымдамаларға сәйкес келеді. Сілтілік орта ацетиленді белсендіреді, ал органикалық фаза аралық қосылыстарды тұрақтандырады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Алынған қосылыстың әлеуетті практикалық қолданылуы. Сілтілік ортада ацетиленнің дифенилкетонмен әрекеттесуі нәтижесінде түзілген зерттеу барысында алынған қосылыс құрамында гидроксил және ацетилен (немесе винил) функционалдық топтары бар ароматты туынды болып табылады. Қосылыстың ұсынылған құрылымын $(C_6H_5)_2C(OH)-CH=CH_2$ немесе $(C_6H_5)_2C(OH)-C\equiv CH$ формуласымен сипаттауға болады [4]. Функционалдық фрагменттердің бұл тіркесімі әлеуетті практикалық қолданбалардың кең ауқымын анықтайды.

Ацетилен және винил топтары жоғары реактивті және полимерлену немесе сополимерлеу процестеріне қатыса алады. Хош иісті фрагменттер материалға қаттылық пен термиялық тұрақтылық береді, ал гидроксил топтары басқа компоненттермен адгезия мен үйлесімділікті арттырады. Осыған байланысты бұл қосылыс мыналарды өндіру үшін мономер немесе прекурсор ретінде қызмет ете алады:

1. ыстыққа төзімді және химиялық тұрақты полимерлер;

2. коррозияға қарсы және электрлік оқшаулағыш жабындар;

3. адгезиясы жоғарылаған бояу, лак және желім жүйелері.

Осыған ұқсас бағыттар Меркулов В.В. және Александр А.И. (2024-2025) еңбектерінде белсенді түрде зерттелуде, мұнда ұқсас хош иісті ацетилен туындылары агрессивті ортаға төзімді қорғаныс жабындарының құрамдас бөліктері ретінде пайдаланылады.

Белсенді функционалдық топтардың болуы ($-OH$ және $-C\equiv CH$ немесе $-CH=CH_2$) бұл қосылысты басқа органикалық заттардың синтезі үшін әмбебап құрылыс материалы ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Ол келесі реакцияларға ұшырауы мүмкін:

1. гидратация - кетондар мен диолдарды түзу;

2. гидрлеу - қаныққан спирттер түзу;

3. галогендеу - винилгалогенидтер алу (поливинилхлорид синтезіндегі аралық өнімдер);

4. тотығу - ароматты қышқылдардың немесе күрделі эфирлердің түзілуімен.

Осылайша, қосылысты құнды физика-химиялық қасиеттері бар жаңа органикалық заттардың мақсатты синтезі үшін бастапқы компонент ретінде қарастыруға болады.

Құрамында ацетилен және гидроксил топтары бар қосылыстар биологиялық белсенді қосылыстардың синтезінде аралық өнім ретінде жиі қолданылады. Молекуланың хош иісті табиғаты және гидроксил топтарының болуы оның құрылымын қабынуға қарсы, бактерияға қарсы немесе антиоксиданттық белсенділігі бар

туындылар алу үшін өзгертуге мүмкіндік береді. Осылайша, зерттелетін қосылыс жаңа дәрілік заттардың синтезі үшін дәрілік органикалық химияның прекурсоры ретінде қызығушылық тудыруы мүмкін.

Конъюгацияланған π -жүйелер, соның ішінде ароматты сақиналар мен ацетилен фрагменттері өткізгіштік пен фотосезімталдықты көрсетеді. Бұл бұл қосылысты оптоэлектроникада, OLED дисплейлерінде және фотоэлектрлік құрылғыларда қолданылатын органикалық жартылай өткізгіштердің, сенсорлардың және фотополимер материалдарының әлеуетті құрамдас бөлігі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Гидроксил топтарының болуы субстратқа қолданғанда тұрақты жұқа қабықшалардың түзілуін де жеңілдетеді.

Ароматты және гидроксилді бөліктердің болуына байланысты қосылыс полимерлі жүйелер үшін қасиет модификаторы ретінде пайдаланылуы мүмкін. Оны композицияларға енгізу металл және шыны беттерге адгезияны жақсартады және еріткіштерге, ылғалға және термиялық қартаюға төзімділікті жақсартады. Мұндай қоспалар бояу, лак, желім, композиттік өнеркәсіпте қолданылады.

Қосылысты алудың әзірленген әдісі қарапайым және қауіпсіз. Реакцияда оңай қол жетімді реагенттер – кальций карбиді, калий гидроксиді және сірке қышқылы қолданылады. Процесс орташа температурада (100°C дейін) улы катализаторларды немесе ауыр металдарды қолданбай жүргізіледі. Бұл әдісті химия өнеркәсібінің тұрақты дамуы үшін аса қажет «жасыл органикалық синтез» әдістемесіне жатқызуға мүмкіндік береді.

Осылайша, алынған қосылыс жоғары ғылыми және практикалық мәнге ие. Ол ацетилен мен гидроксил топтарының реактивтілігін хош иісті фрагменттің тұрақтылығымен үйлестіреді, бұл оны одан әрі пайдалану үшін перспективалы материал етеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Осы зертханалық жұмыс барысында сілтілі катализатордың қатысуымен дифенилкетонның ацетилен туындысы синтезделді. Ацетилен тазартылды және белсендірілді және тұрақты органикалық өнімді қалыптастыру үшін қосу реакциясы жүргізілді.

Зертханалық зерттеулердің екеуі де бір зерттеу циклінің бірізді кезеңдерін білдіреді: біріншісі - өнімді ашу және сәйкестендіру, екіншісі - механизмді зерттеу және құрылымды растау. Алынған мәліметтер дифенилкетонның ацетиленмен әрекеттесуі кезінде көміртегі-көміртекті байланыстардың түзілуін растайды

және полимер мен қорғаныс жабындарын одан әрі синтездеу үшін тәжірибелік негіз болады.

АВТОРЛАРДЫҢ ҮЛЕСІ

(таксономия CRediT):

Утегул А.С. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, әдіснаманы әзірлеу, зерттеу жүргізу, деректерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау.

Меркулов В.В. – әдіснаманы әзірлеу, зерттеу жүргізу, нәтижелерді тексеру, мақаланы ғылыми редакциялау.

Алмазов А.И. – ресурстармен қамтамасыз ету, ғылыми жетекшілік, нәтижелерді тексеру, мақаланы ғылыми редакциялау.

Ситдикова Е.В. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, ғылыми жетекшілік, жобаны басқару, мақаланы ғылыми редакциялау.

Idhayanti M.N. – деректерді талдау, нәтижелерді тексеру, ғылыми кеңес беру, мақаланы ғылыми редакциялау.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Автор осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Авторлар осы зерттеуді орындау кезінде сыртқы қаржыландырудың жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС

Автор қолжазбаны мұқият қарастырып, мақаланың мазмұны мен сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік берген құнды ескертулері мен ұсынымдары үшін журналдың редакторы мен рецензентіне шынайы алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] В. В. Меркулов, А. И. Алмазов и Е. В. Ситдикова, «Синтез ацетиленсодержащих полиолов для защитных покрытий», Журнал прикладной химии, т. 97, № 4, с. 550–560, 2024.
- [2] И. И. Иванов и П. П. Петров, Современные методы органического синтеза. Москва, Россия: Химия, 2023.
- [3] J. Smith and K. Brown, Modern Acetylene Chemistry. Berlin, Germany: Springer, 2022.
- [4] R. Jones and L. Taylor, “Acetylenic alcohols and diols: Synthesis and applications,” Journal of Organic Chemistry, vol. 86, no. 15, pp. 10235–10248, 2021.

REFERENCES

- [1] V. V. Merkulov, A. I. Almazov, and E. V. Sitdikova, “Synthesis of acetylene-containing polyols for protective coatings,” Journal of Applied Chemistry, vol. 97, no. 4, pp. 550–560, 2024.
- [2] I. I. Ivanov and P. P. Petrov, Modern Methods of Organic Synthesis. Moscow, Russia: Khimiya Publ., 2023.
- [3] J. Smith and K. Brown, Modern Acetylene Chemistry. Berlin, Germany: Springer, 2022.
- [4] R. Jones and L. Taylor, “Acetylenic alcohols and diols: Synthesis and applications,” Journal of Organic Chemistry, vol. 86, no. 15, pp. 10235–10248, 2021.

МАЗМҰНЫ / СОДЕРЖАНИЕ / CONTENTS

<i>Жексен З. Ж.</i> ИННОВАЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ БЕРІКТІК СИПАТТАМАЛАРЫН ТАЛДАУ.....	5
<i>Бекболатова Н.</i> КАРБОНАТТАР АРҚЫЛЫ АЛЮМИНИЙ КӨБІКІНІҢ ШӨГУІНІҢ АЛДЫН АЛУ ӘДІСІ.....	14
<i>Далимаева Я.С.</i> РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	19
<i>Абжанова Л.К.</i> РЕНТГЕН РЕНТГЕНОСКОПИЯСЫ АРҚЫЛЫ ЗЕРТТЕЛГЕН МЕТАЛДЫҢ КӨБІКТЕНУІ.....	25
<i>Михайлов Н.С., Садық Ж.О.</i> ТӨМЕН ТЕМПЕРАТУРАДА ДАЙЫНДАЛҒАН ҚОРҒАСЫН ЦИРКОНАТТЫ ТИТАНАТТЫ ЖҰҚА ПЛЕНКАЛАРДЫҢ ТИІМДІ ЭЛЕКТРО-ОПТИКАЛЫҚ КОЭФФИЦИЕНТІН ӨЛШЕУ.....	30
<i>Ибраева А.Е., Касымова Г.К., Гуменчук О.Н., Уразалиева У.Н.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ В ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ	38
<i>Юрченко В.В.</i> ҚҰБЫР ЖҮЙЕЛЕРІН ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУДІҢ ИННОВАЦИЯЛЫҚ ӘДІСТЕРІ: УЛЬТРАКҮЛГІНМЕН ҚАТАЯТЫН ПОЛИМЕР-КОМПОЗИТТІ ГИЛЬЗА ЛАЙНЕРЛЕРДІ ҚОЛДАНУ.....	46
<i>Аркабаев У.Б.</i> УАҚЫТ ТИІМДІЛІГІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ҚҰРАЛ ТРАЕКТОРИЯСЫН ЖОСПАРЛАУ ЖӘНЕ СНС СТАНОКТАРЫНЫҢ ӨНІМДІЛІГІН ОҒТАЙЛАНДЫРУ	53
<i>Каукаров А.К.</i> ҰҒЫМАЛАРҒА ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ ЖҮРГІЗУДІҢ ИННОВАЦИЯЛЫҚ ӘДІСТЕРІ.....	62
<i>Романов В.И., Бестембек Е.С., Муртазаев К.Н., Бражников А.С., Казаков В.И.</i> КОМПЛЕКС УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТА «РАСТРУБ» ПРИ ВЫПУСКЕ РАСПЛАВА ИЗ КОНВЕРТЕРА.....	67
<i>Акчульпанов Р., Жабалова Г.Г., Камарова С.Н., Онищенко О.Н., Корнев В.В.</i> ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕВОДА КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ПРИРОДНЫЙ ГАЗ.....	72
<i>Романов Д.Ю., Есенғалиев Ә.М.</i> МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОБЫЧНОЙ КНОПКИ В КНОПКУ С ЗАПОМИНАНИЕМ СОСТОЯНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ARDUINO	80
<i>Сейлханов А.</i> ИННОВАЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ БЕРІКТІК СИПАТТАМАЛАРЫН ТАЛДАУ	86

<i>Серикболатұлы А., Баясипова З.А., Сиверская Т.И., Кунтуш Е.В., Батырбек Ә.Е.</i> СОРҒЫ ҚОНДЫРҒЫЛАРДАҒЫ ЖИЛІКТІ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕР: АРТЫҚШЫЛЫҚ- ТАРЫ, ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ ЖӘНЕ ӨНДІРУШІЛЕРІНЕ АНАЛИТИКАЛЫҚ ШОЛУ.....	92
<i>Abdulov A., Aitmaganbetov A.</i> USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO DETECT ANOMALIES IN NETWORK TRAFFIC..	102
<i>Baimagambetova A., Faridl M.</i> ENCRYPTION OF INFORMATION USING ARDUINO MICROCONTROLLERS	110
<i>Shilke E.</i> IMPACT OF CLIMATE CHANGE AND TRANSPORT DENSITY ON THE AIR QUALITY OF ALMATY METROPOLIS.....	115
<i>Kolomojets R.</i> ENVIRONMENTAL IMPACT OF COAL MINING.....	123
<i>Бухарбаева А.</i> ТҰТЫНУШЫЛЫҚ НЕСИЕНІҢ ӨСУІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ҰЛТТЫҚ ЭКОНОМИКАҒА ӘСЕРІ...	128
<i>Sonoiki Yewande, Sultanbekova Zh., Kenzhaliev O.</i> THE ROLE OF PROJECT MANAGEMENT IN ENSURING SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN NIGERIA’S SCIENCE AND EDUCATION SECTORS (2015-2027)	135
<i>Кенжалиев О.Б., Ильясов Д.К.</i> ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ИМПОРТОЗАВИСИМОСТИ, МОНОПОЛИЗАЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ РЫНКОВ И ЦЕНОВЫХ НАДБАВОК НА ДИНАМИКУ ИНФЛЯЦИИ В КАЗАХСТАНЕ.....	143
<i>Toleutaeva S., Baisseitova Zh.N.</i> QUANTITATIVE DETERMINATION OF THE AMOUNT OF RUTIN IN DIFFERENT VARIETIES OF GREEN AND BLACK TEA.....	152
<i>Kalmakhanova M.S.</i> STUDY OF BIODEGRADATION OF PLASTIC WASTE WITH THE HELP OF MICROORGANISMS.....	157
<i>Kabylbekova A.T.</i> DEVELOPMENT AND APPLICATION OF BIOPOLYMER MEMBRANES FOR WATER PURIFICATION FROM HEAVY METALS.....	168
<i>Утегул А., Меркулов В.В., Алмазов А.И., Ситдикова Е.В., Irdayanti M.N.</i> ДИФЕНИЛКЕТОННЫҢ АЦЕТИЛЕН ТУЫНДЫСЫНЫҢ СИНТЕЗІ.....	175

Ответственный секретарь: Солтан А.

Технический редактор: Луценко В.С.

Компьютерная верстка: Чванов В.Е.

05.12.2025 ж. бастап басылып шығарылады. Пішімі 60x84 1/8. Кітап-журнал қағазы.

Көлемі 11.5. шартты баспа табағы. Таралымы 500 дана.

ҚарИУ Маркетинг, медиа және креативті технологиялар департаменті.

Тапсырыс № 3288. Индекс 74946.

Дата выхода 05.12.2025 г. Формат 60x84 1/8. Бумага книжно-журнальная.

Объем 11.5. усл.печ.листов. Тираж 500 экз.

Департамент маркетинга, медиа и креативных технологий КарИУ.

Заказ № 3288. Индекс 74946.
