



TEMIR TAU TECH
UNIVERSITY

Қарағанды мемлекеттік
индустриялық университетінің
ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК
Карагандинского государственного
индустриального университета

BULLETIN
of the Karaganda state
industrial university

[HTTPS://VESTNIK.TTTU.EDU.KZ](https://vestnik.tttu.edu.kz)

3

(54) 2026

Қарағанды индустриялық университеті



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
ҚАРАҒАНДЫ МЕМЛЕКЕТТІК ИНДУСТРИЯЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

№ 3 (54) 2026 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**

**ШІЛДЕ-ҚЫРКҮЙЕК 2026
JULY–SEPTEMBER 2026
ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ 2026**

**ЖЫЛЫНА 4 РЕТ ШЫҒАДЫ
QUARTERLY JOURNAL
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД**

Теміртау - 2026

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 индустриялық 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 индустриялық 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.

Lutsenko Vitaliy Sergeevich – 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://www.doi.org/10.53002/154>

THERMAL BEHAVIOR, PHASE EVOLUTION, AND VISCOSITY OF MULTICOMPONENT OXIDE MELTS IN THE Cr–Mn SYSTEM: AN EXPERIMENTAL–THERMODYNAMIC APPROACH

Kabyllkanov S.K.

Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan

**Corresponding author e-mail: kabyllkanov04@gmail.com*

Author Information:

Kabyllkanov Sultan Kaiyrbekovich - Junior Researcher at the Laboratory of “Ferroalloys and Reduction Processes,” Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan. ORCID: 0000-0002-1272-2065; e-mail: kabyllkanov04@gmail.com

Abstract — This study investigates the exothermic effects and viscosity properties of multicomponent oxide melts formed during the high-temperature reduction of low-grade chromium and manganese ores. Unlike previous studies focused predominantly on thermodynamic analysis, the present work provides experimental evidence of transient exothermic effects and establishes their relationship with melt properties. High-temperature experiments revealed pronounced exothermic effects in the range of 800–1600 °C. Phase analysis (XRD, SEM-EDS) confirmed the effective reduction of Cr and Mn with their incorporation into Fe–Cr–Mn–Si alloys, as well as a low content of residual oxides in the slag. The effective viscosity, measured by the electrovibrational method in the temperature range of 1400–1650 °C, decreased monotonically with increasing temperature. Arrhenius analysis was applied to determine the activation energies and crystallization onset temperatures (T_{cr}). The results indicate low viscosity and high thermal stability of the slags, ensuring efficient metal-slag separation. These findings confirm the technological feasibility of using low-grade ores for the production of Fe–Cr–Mn alloys and provide a basis for optimizing industrial smelting.

Keywords — multicomponent oxide melts; Cr–Mn system; exothermic reduction reactions; slag viscosity.

Cr–Mn ЖҮЙЕСІНДЕГІ КӨПКOMPONENTTІ OKCIDTІ БАЛҚЫМАЛАРДЫҢ ТЕРМИЯЛЫҚ МІНЕЗ-ҚҰЛҚЫ, ФАЗАЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРІ ЖӘНЕ ТҮТҚЫРЛЫҒЫ: ЭКСПЕРИМЕНТТІК-ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ТӘСІЛ

Кабылканов С.К.

Ж. Әбішев ат. Химия-Металлургия институты, Қарағанды қ., Қазақстан

**Автор-корреспондент e-mail: kabyllkanov04@gmail.com*

Автор туралы ақпарат:

Кабылканов Султан Кайырбекович - Ж. Әбішев ат. Химия-металлургия институты «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Қарағанды қ., Қазақстан. ORCID: 0000-0002-1272-2065; e-mail: kabyllkanov04@gmail.com

Аңдатпа — Бұл зерттеуде құрамында көпкомпонентті оксидті балқымалар түзілетін төмен сапалы хром және марганец кендерін жоғары температурада тотықсыздандыру кезіндегі экзотермиялық әсерлер мен тұтқырлық қасиеттері зерттелді. Бұған дейінгі термодинамикаға бағытталған зерттеулерден айырмашылығы, бұл жұмыста өтпелі экзотермиялық әсерлерге эксперименттік дәлелдер келтіріліп, олардың балқыманың қасиеттерімен өзара байланысы анықталды. Жоғары температурадағы эксперименттер 800–1600 °C аралығында айқын экзотермиялық әсерлердің байқалатынын көрсетті. Фазалық талдау (РФА, СЭМ-ЭДС) Cr және Mn элементтерінің тиімді тотықсызданып, Fe–Cr–Mn–Si қорытпаларына өтетінін, сондай-ақ қож құрамында қалдық оксидтердің мөлшері аз екенін растады. 1400–1650 °C температура аралығында электровибрациялық әдіспен өлшенген тиімді тұтқырлық температураның жоғарылауына байланысты монотонды түрде төмендеді. Аррениус талдауы активтену энергияларын және кристалданудың басталу температураларын ($T_{кр}$) анықтау үшін қолданылды. Нәтижелер қождардың тұтқырлығының төмен және термиялық тұрақтылығының жоғары екенін көрсетті, бұл металл мен қождың тиімді бөлінуін қамтамасыз етеді. Алынған нәтижелер төмен сапалы кендерді Fe–Cr–Mn

қорытпаларын өндіру үшін пайдаланудың технологиялық мүмкіндігін растайды және өнеркәсіптік балқыту үдерісін оңтайландыруға негіз болады.

Түйін сөздер — көпкомпонентті оксидті балқымалар; Cr-Mn жүйесі; экзотермиялық тотықсыздану реакциялары; кождың тұтқырлығы.

ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ, ФАЗОВАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И ВЯЗКОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОКСИДНЫХ РАСПЛАВОВ В СИСТЕМЕ Cr-Mn: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Кабылканов С.К.

Химико-Металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: kabylkanov04@gmail.com*

Информация об авторе:

Кабылканов Султан Кайырбекович - младший научный сотрудник лаборатории «Ферросплавы и процессы восстановления» Химико-металлургического института им. Ж. Абишева, г. Караганда, Казахстан. ORCID: 0000-0002-1272-2065; e-mail: kabylkanov04@gmail.com

Аннотация — В данном исследовании изучены экзотермические эффекты и вязкостные свойства многокомпонентных оксидных расплавов, образующихся при высокотемпературном восстановлении низкокачественных хромовых и марганцевых руд. В отличие от предыдущих исследований, ориентированных преимущественно на термодинамический анализ, в настоящей работе представлены экспериментальные данные о переходных экзотермических эффектах и установлена их взаимосвязь со свойствами расплава. Высокотемпературные эксперименты показали наличие выраженных экзотермических эффектов в диапазоне 800-1600 °С. Фазовый анализ (РФА, СЭМ-ЭДС) подтвердил эффективное восстановление Cr и Mn с переходом в Fe-Cr-Mn-Si сплавы, а также низкое содержание остаточных оксидов в шлаке. Эффективная вязкость, измеренная электровибрационным методом в диапазоне температур 1400–1650 °С, монотонно снижалась с повышением температуры. Анализ Аррениуса применялся для определения энергий активации и температур начала кристаллизации ($T_{кр}$). Полученные результаты свидетельствуют о низкой вязкости и высокой термической стабильности шлаков, что обеспечивает эффективное разделение металла и шлака. Полученные результаты подтверждают технологическую возможность использования низкокачественных руд для производства Fe-Cr-Mn сплавов и создают основу для оптимизации промышленной плавки.

Ключевые слова — многокомпонентные оксидные расплавы; система Cr-Mn; экзотермические восстановительные реакции; вязкость шлака.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында төмен сортты хром және темірлі марганец кендерін алюмосиликотермия тотықсыздандыру кезінде көпкомпонентті қож балқымаларының жылулық және тұтқырлық сипаттамаларының температураға тәуелділігі анықталды. Эксперименттік зерттеулер нәтижесінде 1400 °С температурада марганецтің тотықсыздану дәрежесінің төмен екені, ал 1600 °С температурада металл фазасының түзілуі мен хром және марганецтің тотықсыздануы үшін қолайлы жағдай қалыптасатыны анықталды. 1800 °С-қа дейін температураны жоғарылату марганецтің булануын күшейтіп, оның металл фазасына өту тиімділігінің төмендеуіне әкелетіні белгіленді. Қож балқымаларының эксперименттік тұтқырлық мәндері FactSage 8.4 бағдарламасында есептелген нәтижелермен салыстырылып, олардың температуралық өзгеру заңдылықтары анықталды. Алынған нәтижелер төмен сапалы хром-марганец шикізатын өңдеу кезінде металл-қож фазаларының тиімді бөлінуін қамтамасыз

ететін оңтайлы температуралық режимді негіздеуге мүмкіндік береді.

КІРІСПЕ

XXI ғасырдағы металлургияның даму бағыты өндірістің экономикалық тиімділігін арттырумен ғана шектелмей, энергия және ресурстар шығынын азайтуға, шикізатты кешенді пайдалануға және қоршаған ортаға түсетін әсерді төмендетуге бағытталуда [1-3]. Қазіргі уақытта легірлеуші элементтердің қымбаттауы, энергетикалық ресурстар құнының өсуі және көміртек шығарындыларына қойылатын талаптардың күшеюі металлургиялық кәсіпорындардың дәстүрлі технологияларға балама технологиялық шешімдерді іздеуін талап етеді. Осы тұрғыдан алғанда, төмен сапалы және қиын байытылатын минералдық шикізатты тікелей өңдеу, арзан тотықсыздандырғыштарды пайдалану және бір технологиялық процесте бірнеше бағалы компоненттерді алу

металлургияның өзекті міндеттерінің бірі болып табылады.

Хром және марганец құрамды шикізатты өңдеу саласында бұл мәселе ерекше маңызға ие. Жоғары сапалы кен қорларының біртіндеп азаюы төмен сапалы және көпкомпонентті кендерді пайдалануға қажеттілікті арттырып отыр. Мұндай шикізатты дәстүрлі байыту сатыларынсыз тікелей балқыту шикізатты кешенді пайдалануға мүмкіндік бергенімен, технологиялық процестің жүру жағдайларын күрделендіреді. Кен құрамындағы кремний, алюминий, магний, кальций және темір сияқты ілеспе компоненттердің мөлшері жоғары болған жағдайда балқыту нәтижесінде күрделі құрамды оксидті қож түзіледі. Оның құрамы мен құрылымы металл мен қождың өзара әрекеттесуіне, тотықсыздану реакцияларының жүруіне және алынатын қорытпаның шығымына тікелей әсер етеді.

Мұндай жүйелердегі негізгі технологиялық көрсеткіштердің бірі – қождың тұтқырлығы. Қождың тұтқырлығы шамадан тыс жоғары болған жағдайда металл тамшыларының қождан бөлінуі қиындайды, соның нәтижесінде хром мен марганецтің бір бөлігі қож фазасында қалып, металл шығымы төмендейді. Керісінше, қождың жеткілікті сұйықтығы металл мен қождың тиімді бөлінуін қамтамасыз етіп, тотықсызданған металдың жиналуына қолайлы жағдай жасайды. Сондықтан төмен сапалы көпкомпонентті шикізатты өңдеу кезінде қождың тұтқырлығын басқару металлургиялық процестің тиімділігін анықтайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады.

Хром және марганец қорытпаларының өндірісін экономикалық тұрғыдан негіздеу мәселесі де қазіргі уақытта өзекті болып отыр. Жоғары көміртекті феррохромның бағасы 2015 жылғы шамамен 1100 USD/t деңгейінен 2025 жылы 2300 USD/t-тан жоғары деңгейге дейін өскен, ал жоғары көміртекті ферромарганецтің бағасы осы кезеңде шамамен 1000-ден 1600 USD/t-ға дейін өзгерген. Төмен көміртекті ферроқорытпалардың құны одан да жоғары болып отыр: 2021–2026 жылдары төмен көміртекті феррохромның бағасы шамамен 4200-ден 6000 USD/t-ға дейін, ал төмен көміртекті ферромарганецтің бағасы 1800-ден 2600 USD/t-ға дейін өскен. Бұл үрдістер хром және марганец қорытпаларын өндірудің өзіндік құнын төмендетуге және қымбат бастапқы материалдарды жергілікті және қолжетімді баламалармен алмастыруға бағытталған технологияларды әзірлеудің маңыздылығын көрсетеді.

Экономикалық факторлармен қатар, ферроқорытпа өндірісінің көміртекті сыйымдылығын төмендету мәселесі де барған сайын маңызды болып келеді. Еуропалық одақтың көміртекті шекаралық реттеу тетігінің (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) 2026 жылдан бастап негізгі кезеңге өтуі көміртекті ізі жоғары импорттық металлургиялық өнімдердің бәсекеге қабілеттілігіне қосымша талаптар қояды [4]. Осы жағдайларда энергияны көп қажет ететін және жеке-жеке жүргізілетін феррохром мен ферромарганец өндірістеріне қарағанда, бірнеше легірлеуші элементтерді бір технологиялық циклде алуға мүмкіндік беретін күрделі Cr–Mn лигатураларын өндіру перспективалы бағыт болып табылады.

Көпкомпонентті оксидті балқымалар күрделі жоғары температуралы жүйелерге жатады. Олардың қасиеттері оксидтердің химиялық құрамымен ғана емес, балқымадағы құрылымдық бірліктердің өзара байланысуымен және оксидті тордың полимерлену дәрежесімен де анықталады [5]. CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃ жүйесі негізіндегі қождарда тұтқырлық балқыманың құрылымдық күйіне сезімтал параметрлердің бірі болып саналады [6, 7]. Негізгі оксидтердің арақатынасының өзгеруі балқыманың құрылымына, тұтқырлығына және кристалдану температурасына елеулі әсер етеді [8]. Сондықтан қождың химиялық құрамын, температуралық режимін және тұтқырлығын өзара байланысты түрде зерттеу төмен сапалы шикізатты балқыту технологиясын оңтайландыру үшін қажет.

Сонымен қатар тотықсыздану реакцияларының жылулық әсерлері де қождың қасиеттерін қалыптастыруда маңызды рөл атқарады. Көпкомпонентті жүйелерде бір уақытта бірнеше тотығу-тотықсыздану реакциялары жүруі мүмкін және олардың әрқайсысы белгілі бір мөлшерде жылу бөлуі немесе сіңіруі ықтимал. Нәтижесінде балқымада температураның жергілікті өзгерістері пайда болып, оның фазалық құрамы мен құрылымына әсер етеді. Мұндай жылулық әсерлердің сипатын ескермей, тек бастапқы және соңғы температуралар бойынша процесті бағалау қождың нақты күйін толық сипаттауға мүмкіндік бермейді. Сондықтан күрделі оксидті жүйелердегі реакциялардың энергетикасын термодинамикалық есептеулермен қатар эксперименттік зерттеу қажет [9].

Бұған дейін жүргізілген зерттеулерде авторлар төмен сапалы хром және марганец шикізатын алюмосиликотермиялық әдіспен өңдеу арқылы күрделі хром–марганец лигатурасын алу мүмкіндігін термодинамикалық тұрғыдан негіздеген [10]. Бұл технологияда

тотықсыздандырғыш ретінде жергілікті жоғары күлді көмірлер негізінде алынатын AlSiMn және FeSiAl сияқты кремний–алюминийлі кешенді қорытпаларды пайдалану ұсынылған [11]. Мұндай тотықсыздандырғыштарды қолдану дәстүрлі қымбат тотықсыздандырғыштарды алмастыруға, жергілікті шикізатты пайдалануға және алынатын Cr-Mn лигатурасының өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді.

Алайда осы бағыттағы алдыңғы зерттеулер негізінен термодинамикалық модельдеумен шектелді. Атап айтқанда, алюмосиликотермия тотықсыздану кезінде жүретін экзотермиялық реакциялардың нақты жылулық әсерлері және олардың көпкомпонентті қож балқымасының тұтқырлығына ықпалы жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Тотықсыздану процесі кезінде пайда болатын қарқынды жергілікті жылу бөлінуі қождың құрылымдық күйін және оның аққыштығын өзгертуі мүмкін. Бұл өз кезегінде металл тамшыларының қождан бөлінуіне және хром мен марганецтің металл фазасына өту дәрежесіне әсер етеді. Сондықтан термодинамикалық есептеулерді жоғары температуралық эксперименттермен және қождың реологиялық сипаттамаларымен байланыстыру зерттеудің маңызды ғылыми мәселесі болып табылады.

Зерттеудің мақсаты – алюмосиликотермия тотықсыздану жағдайында Cr-Mn жүйесінің көпкомпонентті оксидті балқымаларының жылулық және тұтқырлық сипаттамаларын эксперименттік зерттеу және олардың температура мен химиялық құрамға тәуелділігін анықтау.

Зерттеу міндеттері:

1. Төмен сапалы хром және темір-марганец кендерінің, сондай-ақ AlSiMn , FeSiAl және FeSiCr негізіндегі тотықсыздандырғыштардың химиялық құрамын анықтау;
2. Әртүрлі шихта құрамдары үшін жоғары температуралық балқыту тәжірибелерін жүргізу;
3. Алюмосиликотермиялық тотықсыздану барысында байқалатын жылулық әсерлердің ерекшеліктерін анықтау;
4. Алынған қождардың тұтқырлығын температураға байланысты эксперименттік түрде анықтау;
5. Эксперименттік нәтижелерді FactSage 8.4 бағдарламасында алынған есептік мәндермен салыстыру;
6. Алынған металл және қож фазаларының фазалық құрамы мен микроструктурасын зерттеу;
7. Қождың тұтқырлық қасиеттері мен металл-қож фазаларының тиімді бөлінуіне әсер ететін негізгі факторларды анықтау.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі әдебиеттерде төмен сапалы хром-марганец шикізатын алюмосиликотермиялық өңдеудің термодинамикалық мүмкіндігі жеткілікті дәрежеде қарастырылғанымен, тотықсыздану реакцияларының жылулық әсерлері мен көпкомпонентті қождың реологиялық қасиеттері арасындағы өзара байланыс толық анықталмаған. Әсіресе алюмосиликотермиялық реакциялар нәтижесінде бөлінетін жылудың қождың тұтқырлығына, фазалық құрамына және металл-қождың бөлінуіне әсері жөніндегі эксперименттік мәліметтер шектеулі. Осы олқылықты толықтыру үшін реакциялардың энергетикалық ерекшеліктерін және қождың тұтқырлық қасиеттерін біртұтас жүйе ретінде зерттеу қажет.

Ғылыми жаңалығы – төмен сапалы хром және темірлі-марганец шикізатын алюмосиликотермиялық тотықсыздандыру кезінде түзілетін көпкомпонентті $\text{Cr-Mn-Fe-Si-Ca-Mg-Al}$ оксидті балқымаларының жылулық және реологиялық қасиеттерінің өзара байланысын эксперименттік тұрғыдан анықтауда. Зерттеу барысында тотықсыздану реакцияларының жылулық әсерлері мен қож тұтқырлығының температураға байланысты өзгерістері кешенді түрде қарастырылып, эксперименттік нәтижелер термодинамикалық есептеулермен салыстырылады. Алынған заңдылықтар қождың құрылымдық күйінің өзгеруін және оның технологиялық аққыштығын бағалауға, сондай-ақ металл-қож фазаларының тиімді бөлінуіне қолайлы жағдайларды анықтауға мүмкіндік береді.

Осылайша, жүргізілген зерттеу термодинамикалық модельдеу нәтижелерін нақты жоғары температуралық эксперименттермен толықтыруға және алюмосиликотермиялық Cr-Mn лигатурасын алу кезінде қождың жылулық және реологиялық мінез-құлқын тереңірек түсіндіруге бағытталған. Зерттеу нәтижелері төмен сапалы жергілікті шикізатты кешенді пайдалануға, металл шығынын азайтуға және энергия тиімділігі жоғары Cr-Mn лигатураларын өндіру технологиясының ғылыми негіздерін жетілдіруге мүмкіндік береді.

МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеу жұмысы барысында Қазақстанның Кемпірсай және Керегетас кен орындарынан алынған төмен сапалы хром және темір-марганец кендері бастапқы шикізат ретінде пайдаланылды. Тотықсыздандырғыш ретінде FeSiAl және AlSiMn қорытпалары, сондай-ақ ферросиликохром өндірісінің ұсақтау кезеңінде түзілетін FeSiCr шаңы қолданылды. Бастапқы

шикізаттар мен тотықсыздандырғыштардың химиялық талдау әдістерімен анықталды. химиялық құрамы Химия-металлургия Сынамалар алдын ала кептіріліп, ұнтақталып институтының ISO/IEC 17025 стандарты және біртекті күйге келтірілді. Химиялық құрам бойынша аккредиттелген зертханасында нәтижелері 1 және 2-ші кестелерде келтірілген.

Кесте 1 – Хром және темірлі-марганец кендерінің химиялық құрамы

Материал	Құрамы, масс. %								
	Cr ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	P ₂ O ₅	S
Хром кені	39,86	-	11,84	10,93	8,85	27,85	0,64	0,01	0,01
Темірлі-марганец кені	-	38,29	39,87	16,74	2,57	0,15	2,34	0,03	0,01

Кесте 2 – Қолданылатын тотықсыздандырғыштардың химиялық құрамы

Материал	Құрамы, масс. %						
	Cr	Mn	Fe	Si	Al	S	P
AlSiMn	-	29,04	13,97	48,39	8,55	0,020	0,021
FeSiAl	-	-	40,52	48,62	10,82	0,010	0,024
FeSiCr шаңы	24,10	-	42,10	32,22	1,51	0,049	0,018

Жоғары температуралық тәжірибелер 16 кВт қуатты және 500 А-ге дейінгі ток күшін қамтамасыз ететін зертханалық индукциялық тигельді қондырғыда жүргізілді. Тәжірибелердің шихта құрамы алдын ала жүргізілген термодинамикалық есептеулер нәтижелеріне сәйкес таңдалып, үш нұсқа бойынша орындалды.

Бірінші нұсқада 100 кг хром кені, 30 кг AlSiMn және 60 кг CaO; екінші нұсқада 50 кг хром кені, 50 кг темір-марганец кені, 30 кг FeSiAl және 90 кг CaO; үшінші нұсқада 100 кг темір-марганец кені, 50 кг FeSiCr шаңы және 100 кг CaO қолданылды. CaO барлық тәжірибелерде қож түзуші флюс ретінде пайдаланылды.

Балқыту алюминий оксидінен жасалған 100 г тигельде жүргізілді. Температура W-Re (5/20) термопарларымен бақыланды. Индуктордың тұрақты жұмыс режимін қамтамасыз ету үшін сумен салқындату жүйесі қолданылды.

Алынған металл және қож үлгілерінің фазалық құрамы PANalytical X'Pert PRO дифрактометрінде Cu K α сәулеленуімен ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), $2\theta = 10\text{--}90^\circ$ аралығында және $0,05^\circ$ кадаммен анықталды. Дифракциялық мәліметтер X'Pert HighScore Plus бағдарламасы және PDF-2 деректер базасы арқылы өңделді.

Үлгілердің микроструктурасы мен элементтік құрамы ZEM20 (ZEPTOOLS, Қытай) сканерлеуші электрондық микроскопында Oxford Instruments EDS детекторымен зерттелді.

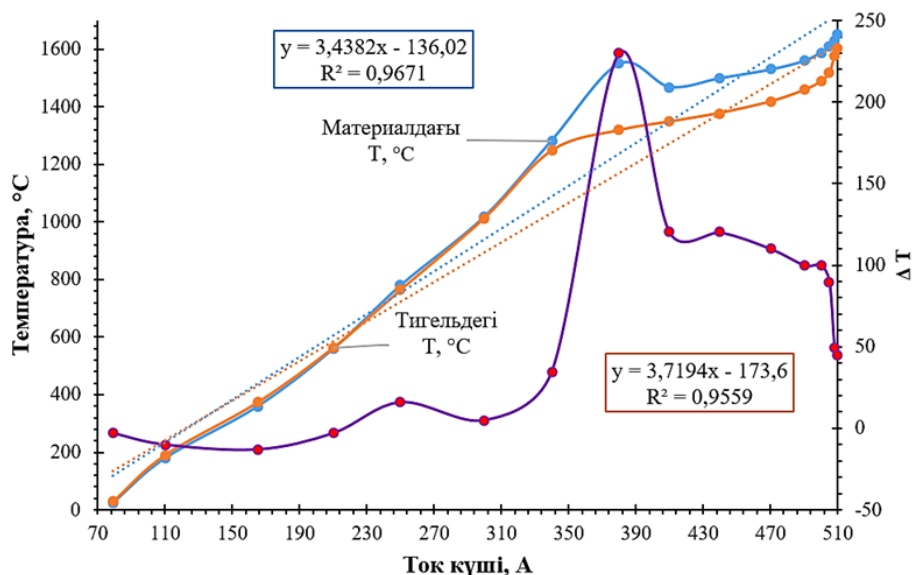
Қож балқымаларының тұтқырлығы жоғары температуралы электровибрациялық вискозиметр

көмегімен салқындату барысында анықталды. Температура молибден термопары арқылы бақыланды. Эксперименттік нәтижелерді салыстыру үшін қождардың тұтқырлығы FactSage 8.4 бағдарламасының Viscosity модулі арқылы есептелді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Үш тәжірибелік нұсқаның барлығында жоғары температуралық тотықсыздану процесі жүріп, құрамында Cr және Mn бар металл фазасы түзілді. Металл мен қождың тығыздықтарының айырмашылығына байланысты балқыту соңында олардың айқын гравитациялық бөлінуі байқалды.

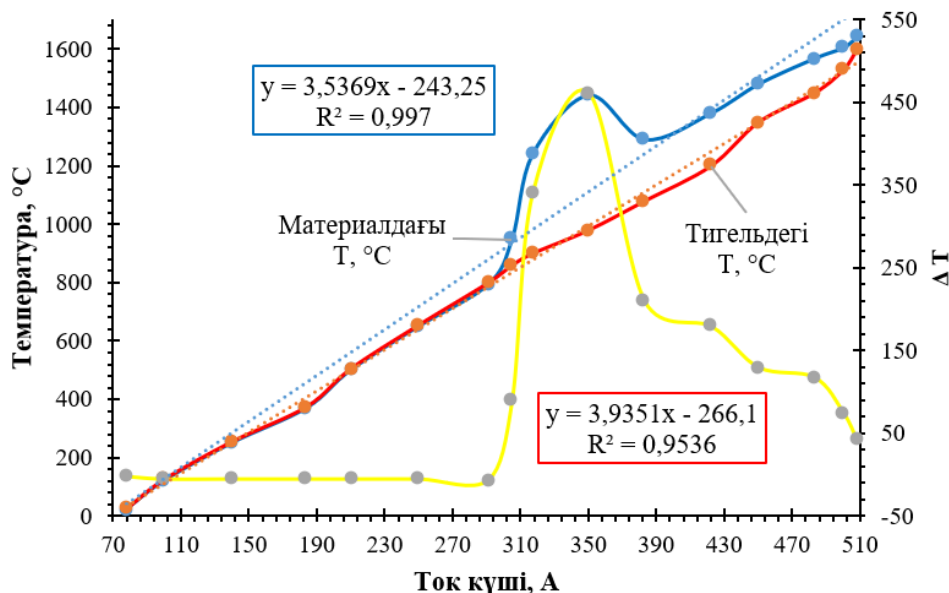
Бірінші нұсқада (хром кені + AlSiMn + CaO) бастапқы қыздыру кезеңінде температура индукциялық токтың жоғарылауына сәйкес бірқалыпты өсті. 340–380 А аралығында сыртқы қыздыру режимі іс жүзінде тұрақты болған кезде балқыма температурасының шамамен 1285-тен 1550 °C-қа дейін күрт жоғарылауы байқалды. Бұл құбылыс тотықсыздану реакциялары нәтижесінде қосымша ішкі жылу бөлінгенін көрсетеді. Жылулық әсер негізінен хром оксидтерінің Al және Si әсерінен тотықсыздануымен байланысты. Алюминийдің Cr₂O₃-пен және кремнийдің Cr₂O₃-пен реакциялары жоғары экзотермиялық сипатта болып, балқымаға қосымша жылу береді. Реакциядан кейін температура шамамен 1470 °C деңгейінде тұрақтанып, соңғы қыздыру кезеңінде 1650 °C-қа жетті (сурет 1).



Сурет 1 - Индукциялық қыздыру жиілігіне байланысты балқыма мен тигель температурасының өзгеруі

Екінші нұсқада (хром кені + темірлі-марганец кені + FeSiAl + CaO) жылулық әсер анағұрлым күрделі сипатта болды. Шамамен 950 °C-тан бастап қыздыру қарқынының өзгеруі байқалып, 300-350 А аралығында балқыма температурасы 1240-тен 1440 °C-қа дейін жоғарылады. Бұл температураның сыртқы қуат тұрақты жағдайдағы күрт өсуі тотықсыздану реакцияларынан бөлінетін ішкі жылудың әсерін көрсетеді. Бұл нұсқада жылу негізінен марганец және хром оксидтерінің алюминиймен тотықсыздануы кезінде бөлінеді, ал

кейінгі кремнийтотықсыздану реакциялары процестің жылулық әсерін жалғастырады. Қалыптасқан SiO₂ қождың силикатты құрамын толықтырып, балқыманың сұйықтығын арттыруға ықпал етеді. Реакциялық кезеңнен кейін температура шамамен 1290 °C деңгейінде тұрақтанып, жүйенің салыстырмалы тұрақты жылулық күйге өткенін көрсетті, ал соңғы қыздыруда 1640 °C-қа жетті (2-сурет).



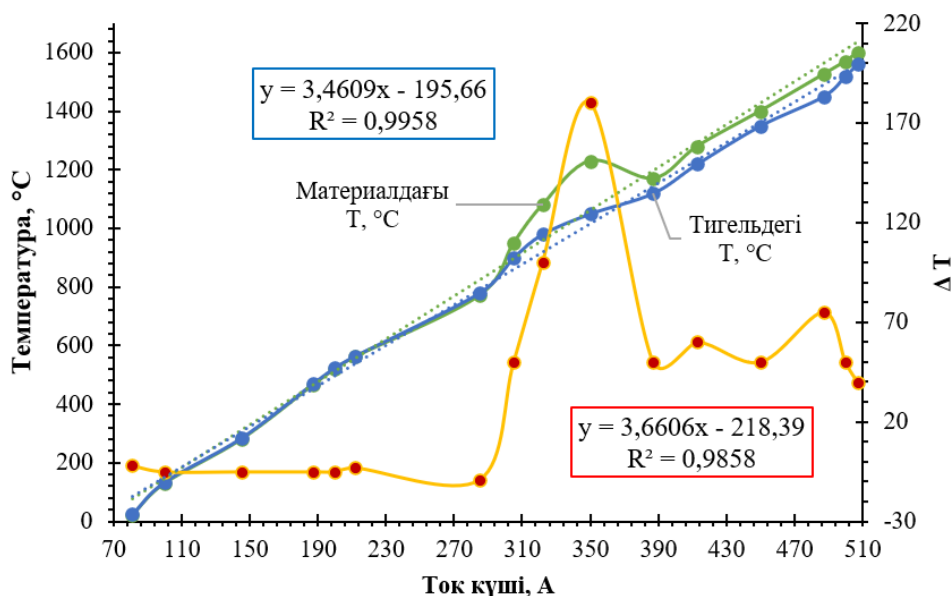
Сурет 2 - Индукциялық қыздыру жиілігіне байланысты балқыма мен тигель температурасының өзгеруі

Үшінші нұсқада (темір-марганец кені + FeSiCr шаңы + CaO) жылулық әсер алдыңғы нұсқаларға қарағанда төмен болды (3-сурет). 290-350 А аралығында балқыма температурасы шамамен 1080-ден 1230 °C-қа дейін көтерілді. Бұл нұсқада

хром FeSiCr шаңында металл күйінде болғандықтан, хром оксидінің тотықсыздануына байланысты қосымша экзотермиялық әсер байқалмайды. Негізгі жылу марганец оксидтерінің тотықсыздануы кезінде кремнийдің қатысуымен

бөлінеді. Сонымен қатар FeSiCr құрамындағы металл компоненттердің балкуы мен қыздырылуына жылудың бір бөлігі жұмсалады.

Реакциялық кезеңнен кейін жүйе біртіндеп жылулық тұрақтанып, соңғы температура шамамен 1600 °C болды.



Сурет 3 - Индукциялық қыздыру жиілігіне байланысты балқыма мен тигель температурасының өзгеруі

Осылайша, үш тәжірибелік нұсқада да тотықсыздану реакцияларының экзотермиялық әсері температураның жергілікті жоғарылауымен сипатталды. Ең қарқынды жылулық әсер хром оксидтерінің алюминий және кремний арқылы тотықсыздануы жүретін бірінші және екінші нұсқаларда байқалды, ал үшінші нұсқада хромның бастапқыда металл күйінде болуы нәтижесінде жылулық импульс әлсіз болды. Бөлінетін реакциялық жылу қож балқымасының құрылымын өзгертіп, оның тұтқырлығын төмендетуге және түзілген металл тамшыларының қождан бөлінуіне қолайлы жағдай қалыптастыруға ықпал етті.

Тотықсыздану және балқыту процестерінен кейін алынған металл және қож фазаларының химиялық құрамы анықталып, негізгі компоненттердің фазалар арасында таралу ерекшеліктері бағаланды. Әрбір тәжірибелік нұсқа бойынша алынған нәтижелердің негізінде металл және қож фазаларының орташа химиялық құрамы есептеліп, салыстырмалы талдау жүргізілді. Негізгі компоненттердің металл және қож фазалары арасында қайта бөлінуі тотықсыздану процесінің тиімділігін және алынған қорытпаның қалыптасу ерекшеліктерін бағалауға мүмкіндік береді (кесте 3).

Кесте 3 – Металл және қождың химиялық құрамы

Нұсқа	Металл					Қож						
	Fe	Cr	Mn	Si	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	FeO	
1	22,92	53,95	19,91	3,20	41,88	21,51	13,59	19,15	0,68	1,97	1,22	
2	44,64	23,92	28,21	3,22	53,60	26,47	9,10	7,09	1,42	1,09	1,24	
3	35,56	20,34	39,51	4,59	59,35	35,51	1,81	0,10	0,54	1,69	1,01	

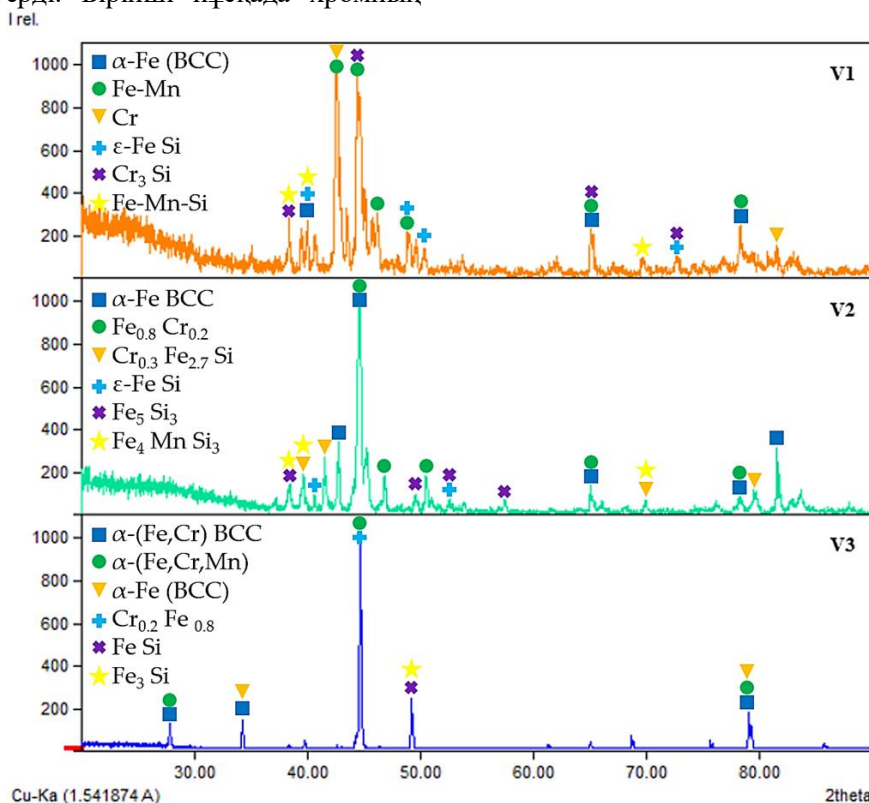
Металл фазасының құрамын талдау барлық үш нұсқада да Fe-Cr-Mn негізіндегі көпкомпонентті қорытпаның түзілгенін көрсетті. Бірінші нұсқада Cr мөлшері 53,95 %, екінші нұсқада 23,92 %, ал үшінші нұсқада 20,34 % болды. Mn мөлшері сәйкесінше 19,91; 28,21 және 39,51 % құрады. Бұл бастапқы шихта құрамының металл фазасының құрамына тікелей әсер ететінін және әрбір тотықсыздандырғыштың процестегі рөлін көрсетеді.

Қож фазасында Cr₂O₃ және MnO қалдықтарының салыстырмалы түрде төмен болуы хром мен марганецтің едәуір бөлігінің металл фазасына өткенін көрсетеді. Cr₂O₃ мөлшері 1,09-1,97 %, ал MnO мөлшері 0,54-1,42 % аралығында болды. Алынған нәтижелер алюмосиликотермия тотықсыздану жағдайында металл фазасының қалыптасуы және оның қождан гравитациялық бөлінуі үшін қолайлы жағдайлардың қалыптасқанын көрсетеді.

Алынған металл фазаларының фазалық құрамы мен микроструктуралық ерекшеліктері рентгендік-фазалық талдау (РФА) және сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ-ЭДС) әдістері арқылы зерттелді. РФА нәтижелері алынған қорытпалардың негізгі кристалдық фазаларын анықтауға мүмкіндік берді. Үш тәжірибелік нұсқаның дифрактограммаларында Fe-Cr-Mn негізіндегі металл фазаларына тән рефлексстермен қатар кремниймен байланысты интерметалдық және силицидтік фазалардың түзілу белгілері байқалды (4 сурет).

РФА нәтижелері барлық үлгілерде Fe-Cr-Mn негізіндегі металл фазасының қалыптасқанын көрсетті. Сонымен қатар дифрактограммаларда кремнийдің қатысуымен түзілетін силицидтік фазаларға тән рефлексстер байқалады. Фазалардың арақатынасы бастапқы шихта құрамына және қолданылған тотықсыздандырғыштың түріне байланысты өзгерді. Бірінші нұсқада хромның

металл фазасындағы жоғары мөлшеріне сәйкес келетін Cr-құрамды фазалардың рефлексстері басым болса, екінші және үшінші нұсқаларда Fe және Mn құрамды фазалардың үлесі жоғарылағаны байқалады. Бұл нәтижелер химиялық талдау арқылы анықталған металл фазасының құрамындағы Cr, Mn, Fe және Si мөлшерлерінің өзгерістерімен жақсы сәйкес келеді. Атап айтқанда, РФА-да байқалған фазалық айырмашылықтар тәжірибелік нұсқаларда қолданылған бастапқы шикізат пен тотықсыздандырғыш құрамының өзгеруіне байланысты металл фазасындағы негізгі элементтердің арақатынасының өзгеруімен түсіндіріледі. Сонымен қатар, анықталған фазалар металл фазасының қалыптасуында Cr және Mn тотықсыздануының, сондай-ақ Si-дің силицидтік қосылыстар түзуге қатысуының маңызды рөл атқарғанын көрсетеді.



Сурет 4 – Әртүрлі тотықсыздандырғыштарды қолдану арқылы алынған үлгілердің РДТ нәтижелері: V1 – АМС қорытпасын қолдану арқылы; V2 – ФСА қорытпасын қолдану арқылы; V3 – ФСХ шаңын қолдану арқылы.

СЭМ-ЭДС зерттеулері алынған металл фазасының біртекті емес микроструктураға ие екенін көрсетті. Металл матрицасында Fe, Cr, Mn және Si элементтері біркелкі таралмаған, жекелеген аймақтарда Cr және Mn концентрацияларының жоғарылауы байқалды. Сонымен қатар кремний мөлшері жоғары локальды аймақтардың болуы силицидтік фазалардың түзілу мүмкіндігін көрсетеді. Мұндай

құрылымдық ерекшеліктер тотықсыздану реакцияларының қарқынды жүруімен, балқыма құрамының біркелкілену дәрежесімен және кейінгі кристалдану жағдайларымен байланысты. СЭМ-ЭДС нәтижелері химиялық талдау мен РФА нәтижелерін толықтырып, алынған металл фазасының көпкомпонентті құрылымын растады.

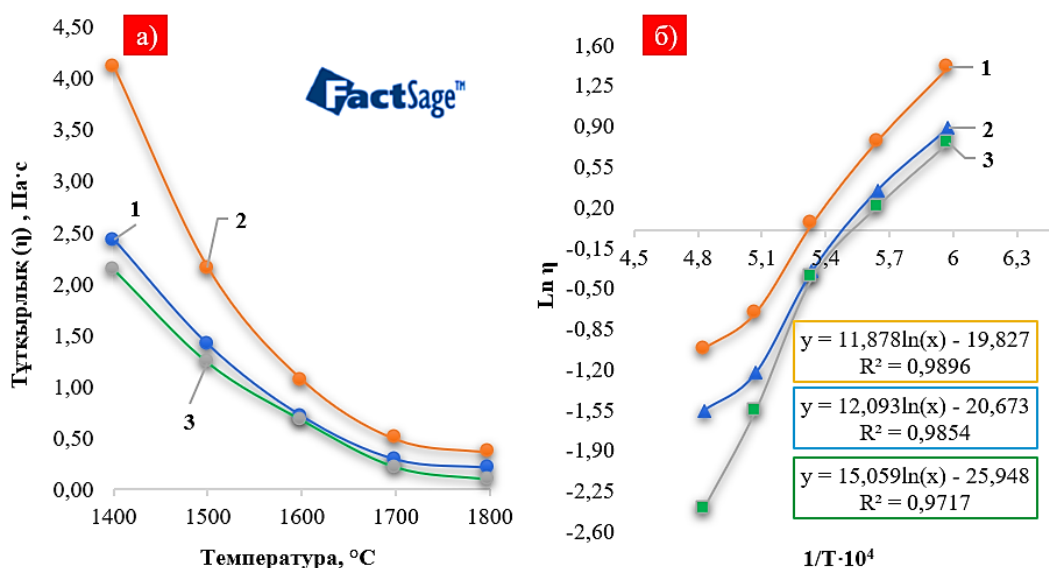
Жалпы алғанда, РФА және СЭМ-ЭДС нәтижелері жоғары температуралық тотықсыздану

барысында Fe-Cr-Mn негізіндегі металл фазасының тұрақты қалыптасқанын және оның құрылымы бастапқы шихта құрамына, тотықсыздандырғыш түріне және балқыту жағдайларына тәуелді екенін көрсетті.

Тотықсыздану реакциялары кезінде түзілетін кождың тұтқырлығы балқыманың химиялық құрамына, оксидті құрылымның күйіне және температураға тәуелді маңызды технологиялық параметр болып табылады. Осыған байланысты Cr-Mn жүйесінде түзілген кождардың тұтқырлық қасиеттері эксперименттік өлшеулер және FactSage 8.4 бағдарламасында жүргізілген термодинамикалық есептеулер арқылы зерттелді. Мұндай кешенді тәсіл қож құрамының және

температураның оның аққыштығына әсерін бағалауға, сондай-ақ есептік және тәжірибелік нәтижелерді салыстыруға мүмкіндік берді.

Алдымен үш тәжірибелік нұсқаға сәйкес кождардың тұтқырлығы 1400–1800 °C температура аралығында FactSage 8.4 бағдарламасы арқылы есептелді. Барлық үш құрам үшін температура жоғарылаған сайын тұтқырлықтың біртіндеп төмендейтіні анықталды (5-сурет). Бұл температура әсерінен оксидті балқыманың құрылымдық торының бұзылуы, оның полимерлену дәрежесінің төмендеуі және сұйық фазадағы құрылымдық бөлшектердің қозғалғыштығының артуымен түсіндіріледі.



Сурет 5 - Зерттелінді қож тұтқырлығының температураға тәуелділігі (а) және $\ln \eta - 1/T$ координаттарындағы тәуелділігі (б)

5-ші суреттен V2 қожының барлық зерттелген температура аралығында ең жоғары тұтқырлық мәндеріне ие екені, ал V1 және V3 құрамдарының салыстырмалы түрде төмен тұтқырлық көрсететіні байқалады. Бұл айырмашылық кождардың химиялық құрамымен және оксидті құрылымның ұйымдасу ерекшеліктерімен байланысты. $\ln(\eta) - 1/T$ координаттарындағы тәуелділіктердің жоғары сызықтылығы ($R^2 > 0,97$) зерттелген температура аралығында тұтқырлықтың температураға тәуелділігін Аррениус типті теңдеумен сипаттауға болатынын көрсетеді. Қисықтардың көлбеу бұрыштарының айырмашылығы кождардың тұтқырлық ағынының активтену энергиялары әртүрлі екенін көрсетеді.

FactSage есептеулері идеалдандырылған біртекті сұйық фазаны сипаттайды және нақты қожда болуы мүмкін қатты бөлшектерді, микрокристалдық фазаларды және құрылымдық біртексіздікті толық ескермейді. Сондықтан

балқыманың нақты технологиялық жағдайдағы күйін бағалау үшін тұтқырлықтың эксперименттік тиімді мәндері анықталды.

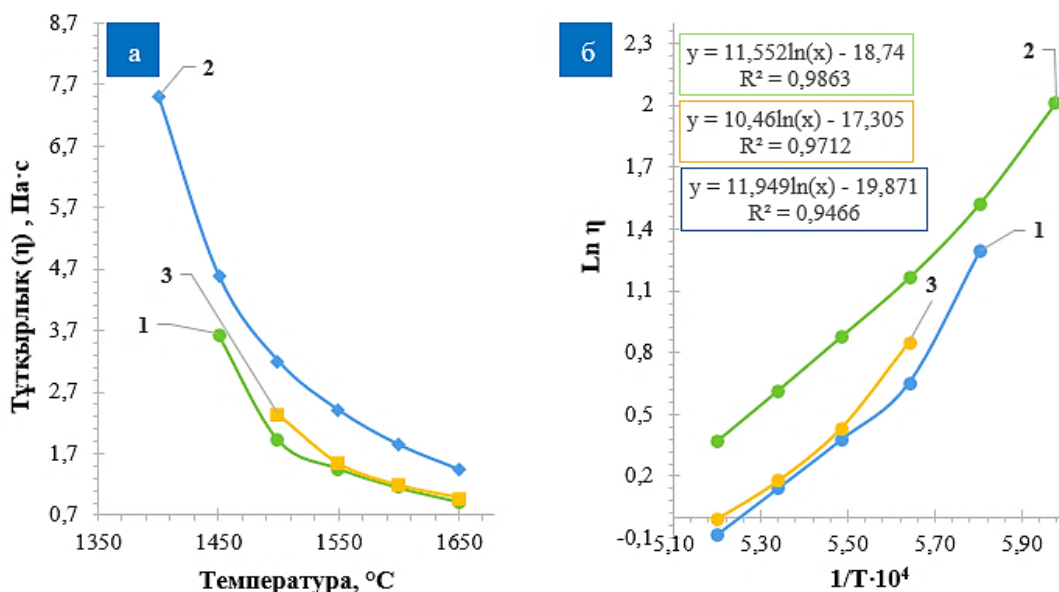
Эксперименттік өлшеулер графит қыздырғышы бар қарсылықты пешке орнатылған электровибрациялық вискозиметр көмегімен жүргізілді. Ұсақталған қож үлгілері 30–50 г мөлшерінде молибден тигельге орналастырылды. Үлгілер 1550–1650 °C температура аралығында толық балқытылып, балқыманың химиялық және температуралық біртектілігін қамтамасыз ету үшін шамамен 5 минут араластырылды. Одан кейін молибден зонд балқыманың орталық бөлігіне енгізіліп, тұтқырлық бақыланатын салқындату жағдайында анықталды. Өлшеу салқындату жылдамдығы 3–5 °C/мин болған кезде қату басталғанға дейін жүргізілді.

Эксперименттік түрде анықталған тиімді тұтқырлықтың температураға тәуелділігі 6-шы суретте көрсетілген.

Барлық үш нұсқада температура жоғарылаған сайын қож тұтқырлығының монотонды төмендеуі байқалды. Бұл жоғары температура әсерінен силикатты-алюминатты құрылымдағы байланыстардың әлсіреуімен және оксидті тордың полимерлену дәрежесінің төмендеуімен байланысты. Нәтижесінде Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} және Mn^{2+} сияқты модификатор-катиондардың қозғалғыштығы артып, балқыманың аққыштығы жоғарылайды.

1400–1450 °C аралығында қож құрамдарының арасындағы айырмашылық айқын байқалды. V2

нұсқасында тиімді тұтқырлық шамамен 7,5 Па·с мәніне дейін жетіп, зерттелген үш құрамның ішіндегі ең жоғары көрсеткішті көрсетті. Бұл қож құрылымының салыстырмалы түрде жоғары дәрежеде полимерленгенін көрсетеді. V1 және V3 қождарында тұтқырлық төменірек болды. Температура 1550 °C-тан жоғарылаған кезде үш нұсқаның тұтқырлық қисықтары бір-біріне жақындай бастады, бұл балқыманың құрылымдық біртектілігінің артуымен және қатты немесе микрокристалдық қосылыстардың әсерінің азаюымен байланысты.



Сурет 6 - Зерттелген қождардың эффективті тұтқырлығының температураға тәуелділігі (а) және Френкель-Андрасе тәуелділіктері (б)

Аррениус теңдеуі координаттарындағы эксперименттік тәуелділіктер жоғары температура аймағында жақсы сызықтылық көрсетті, мұнда корреляция коэффициенттері $R^2 = 0,94-0,98$ аралығында болды. Температураның кристалдану аймағына жақындауына қарай тәуелділіктен ауытқу байқалады. Бұл балқыманың біртекті сұйық күйден құрылымдық біртекті емес күйге ауысуымен және алғашқы кристалдық фазалардың түзілуімен байланысты.

Тұтқырлықтың температураға сезімталдығы қождың химиялық құрамына, әсіресе CaO және MgO сияқты құрылым модификаторларының мөлшеріне және қышқылдық-құрылым түзуші оксидтердің арақатынасына тәуелді екені анықталды. Осыған сәйкес қождың реологиялық қасиеттері оның оксидті торының полимерлену дәрежесімен және иондар арасындағы байланыстардың беріктігімен анықталады.

Эксперименттік нәтижелерді сандық сипаттау үшін Аррениус теңдеуінің параметрлері және тұтқырлық ағынының активтену энергиясы анықталды. V1 үшін негізділік $B = 1,74$,

кристалданудың басталу температурасы 1415 °C, ал тұтқырлық ағынының активтену энергиясы $E_a = 189,8$ кДж/моль болды. V2 қожы үшін $B = 1,69$, $T_{кр} = 1380$ °C және $E_a = 175,8$ кДж/моль анықталды. V3 құрамында $B = 1,66$, $T_{кр} = 1435$ °C және $E_a = 161,7$ кДж/моль мәндері алынды.

Тұтқырлықтың активтену энергиясының V1-ден V3-ке қарай 189,8-ден 161,7 кДж/мольге дейін төмендеуі қож құрылымының әлсіреуін және оның полимерлену дәрежесінің азаюын көрсетеді. V1 қожы салыстырмалы түрде берік силикатты-алюминатты құрылымымен сипатталса, V3 құрамында құрылымдық бөлшектердің қозғалғыштығы жоғары және температура өзгерісіне сезімтал балқыма қалыптасады. V2 осы екі құрамның арасында аралық сипат көрсетті.

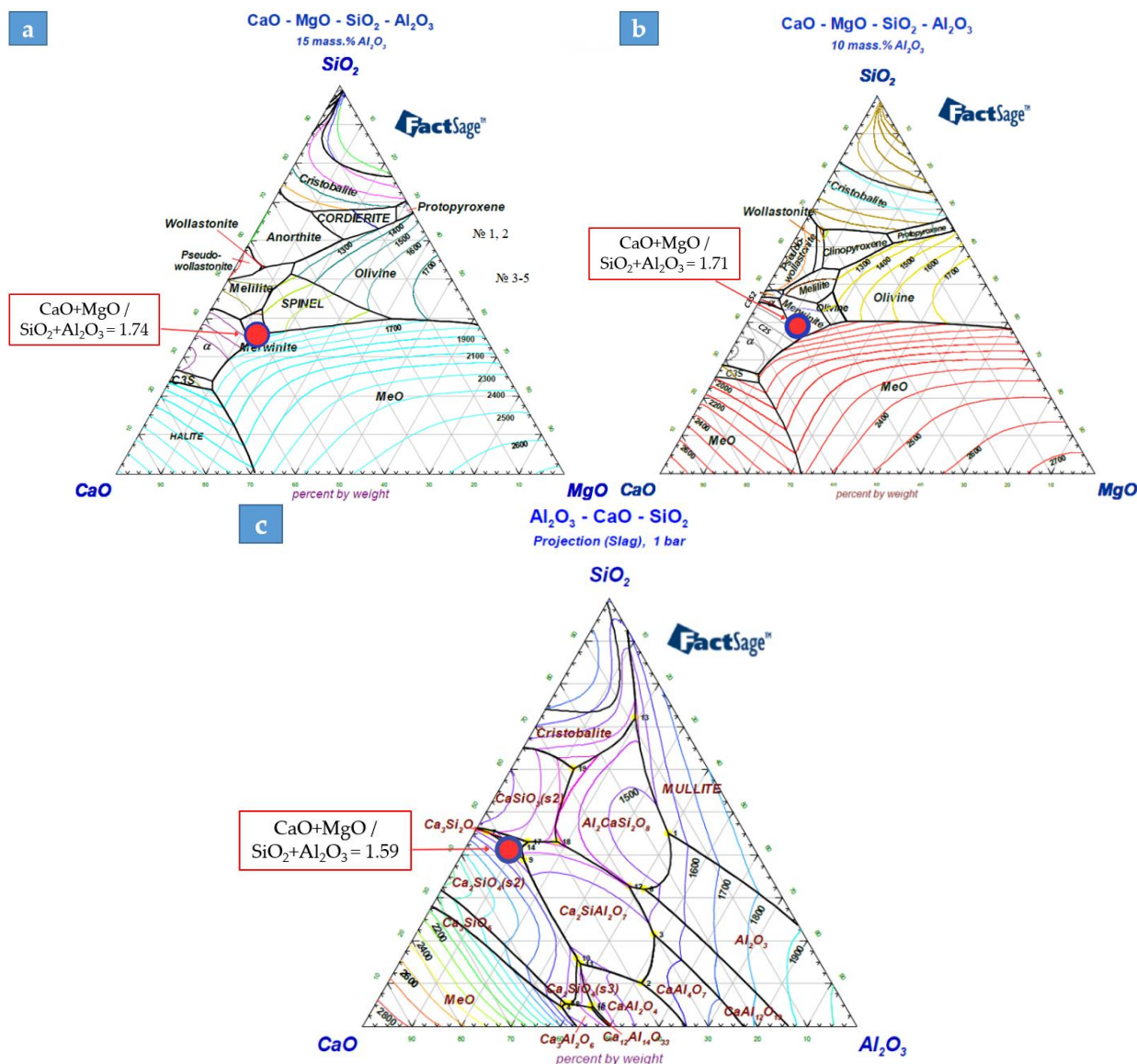
Кристалданудың басталу температураларының айырмашылығы да қождардың технологиялық қасиеттеріне әсер етеді. Ең төмен $T_{кр} = 1380$ °C V2 нұсқасында, ал V1 және V3 үшін бұл температуралар сәйкесінше 1415 және 1435 °C болды. Бұл мәндер қождардың салқындау кезінде қатты фазалардың түзілуі

басталатын температуралық шекараларды сипаттайды.

Жалпы алғанда, үш қож құрамының барлығы шамамен 1600 °С жұмыс температурасында жеткілікті сұйықтықты және тұрақты балқыма күйін қамтамасыз етеді. Тұтқырлық, активтену энергиясы және кристалдану температурасы бойынша алынған нәтижелер металл мен қож фазаларының тиімді бөлінуіне қолайлы жағдай

қалыптасатынын көрсетеді. Бұл әсіресе Cr-Mn лигатурасын балқыту кезінде металл тамшыларының қож арқылы қозғалып, бірігуі және гравитациялық жолмен бөлінуі үшін маңызды.

Зерттелген қож құрамдарының фазалық диаграммалардағы орналасуы олардың тұтқырлық қасиеттерін қосымша түсіндіруге мүмкіндік береді (7-ші сурет).



Сурет 7 - Зерттелген қож жүйелерінің фазалық диаграммалары: а – V1; б – V2; с – V3.

V1 құрамы Merwinite/Periclase фазаларының шекарасына жақын орналасып, шамамен 1550-1600 °С аралығындағы ликвидус температурасымен сипатталады. Мұндай орналасу оның жұмыс температурасындағы салыстырмалы жоғары сұйықтығын түсіндіреді. V2 құрамы Merwinite аймағынан тыс өтпелі аймақта орналасып, ликвидус температурасы 1600–1650 °С аралығында болады. Бұл оның эксперименттік түрде анықталған жоғары тұтқырлығымен және

жоғары активтену энергиясымен сәйкес келеді. V3 құрамы Rankinite/Belite фазаларының шекарасында орналасып, ликвидус температурасы шамамен 1600 °С болды. Фазалық диаграммалардағы бұл орналасу барлық үш құрамның балқыту жағдайларындағы тұрақтылығын растайды, ал V1 және V3 металл-қож фазаларының тиімді бөлінуіне неғұрлым қолайлы жағдай қалыптастырады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу барысында Cr-Mn жүйесіндегі көпкомпонентті оксидті балқымалардың жылулық әсерлері, фазалық өзгерістері және тұтқырлық қасиеттері эксперименттік және термодинамикалық әдістерді біріктіре отырып кешенді түрде зерттелді. Жоғары температуралық тәжірибелер нәтижесінде Cr және Mn оксидтерінің тотықсыздануы кезінде қысқа мерзімді экзотермиялық жылулық импульстердің пайда болатыны анықталды. Олардың қарқындылығы бастапқы шихтаның құрамына және қолданылған тотықсыздандырғыштың түріне тәуелді болды.

Фазалық талдау нәтижесінде Fe-Cr-Mn-Si негізіндегі көпкомпонентті металл фазаларының түзілгені анықталды. Хром мен марганецтің негізгі бөлігі металл фазасына өтіп, олардың қождағы қалдық оксидтерінің мөлшері төмен деңгейде сақталды. РФА және СЭМ-ЭДС нәтижелері тотықсыздану реакциялары мен кейінгі кристалдану жағдайларына байланысты күрделі, біртекті емес металл құрылымдарының қалыптасқанын көрсетті.

Қождардың тұтқырлығы FactSage 8.4 бағдарламасындағы термодинамикалық есептеулер және жоғары температуралық электровибрациялық вискозиметрия әдісімен анықталды. 1400–1650 °C температура аралығында барлық зерттелген құрамдар үшін температураның жоғарылауымен тұтқырлықтың біртіндеп төмендейтіні белгіленді. Бұл құбылыс силикатты-алюминатты қож құрылымының термиялық деполимерленуімен байланысты. Тұтқырлықтың активтену энергиясы мен кристалданудың басталу температураларын талдау қождардың құрылымдық және реологиялық ерекшеліктерінің олардың химиялық құрамына тәуелді екенін көрсетті.

Алынған нәтижелер зерттелген қож жүйелерінің жұмыс температураларында

жеткілікті сұйықтыққа және термиялық тұрақтылыққа ие екенін көрсетті. Қождың төмен тұтқырлығы металл тамшыларының бірігуі мен олардың қождан гравитациялық бөлінуіне қолайлы жағдай қалыптастырады. Осы нәтижелер Cr-Mn құрамды қорытпаларды алу кезінде металл-қож фазаларының тиімді бөлінуін қамтамасыз ететін технологиялық режимдерді негіздеуге және төмен сапалы хром-марганец шикізатын жоғары температурада өңдеу процесін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз жүргізілді.

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 © 2026 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.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] D. Raabe, “The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys,” *Chem. Rev.*, vol. 123, pp. 2436–2608, 2023, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00799.
- [2] A. J. Whitworth, J. Vaughan, G. Southam, A. van der Ent, P. N. Nkrumah, X. Ma, and A. Parbhakar-Fox, “Review on metal extraction technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes,” *Miner. Eng.*, vol. 182, Art. no. 107537, 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107537.
- [3] M. N. Tolmachev, “Retrospective Analysis of the Global Metal Production,” *Account. Anal. Audit.*, vol. 12, no. 2, pp. 40–51, 2025, doi: 10.26794/2408-9303-2025-12-2-40-51.
- [4] J. C. Williams, “High Performance Materials Development in the 21st Century: Trends and Directions,” *Mater. Sci. Forum*, vols. 449–452, pp. 7–12, 2004, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.449-452.7.
- [5] European Commission, “EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)—Carbon Tax on Embedded Emissions for Carbon-Intensive Products Effective from 1 January 2026,” 2026. [Online]. Available: https://taxation-customs.ec.europa.eu/news/cbam-successfully-entered-force-1-january-2026-2026-01-14_en. Accessed: Dec. 25, 2025.

[6] Y. Makhambetov, A. Zhakan, A. Zhunusov, S. Kabyllkanov, A. Burumbayev, Z. Sadyk, A. Akhmetov, and B. Uakhitova, “Resource-Efficient Smelting Technology for FeCrMnSi Ferroalloy Production from Technogenic Wastes in an Ore-Thermal Furnace,” *Metals*, vol. 15, Art. no. 1318, 2025, doi: 10.3390/met15121318.

[7] Y. Makhambetov, Z. Sadyk, A. Zhakan, A. Burumbayev, S. Kabyllkanov, A. Myrzagaliyev, D. Aubakirov, N. Lu, and A. Akhmetov, “Electric Arc Metallothermic Smelting of FeCr Using FeAlSiCa as a Reductant,” *Materials*, vol. 18, Art. no. 4221, 2025, doi: 10.3390/ma18184221.

[8] P. Papale, R. Moretti, and A. Paonita, “Thermodynamics of Multi-Component Gas–Melt Equilibrium in Magmas: Theory, Models, and Applications,” *Rev. Mineral. Geochem.*, vol. 87, pp. 431–556, 2022, doi: 10.2138/rmg.2022.87.10.

[9] K.-D. Lee, W.-G. Seo, A. Gupta, and S.-H. Choi, “Effect of composition and temperature on the viscosity and electrical conductivity of ferronickel slags,” *Metals*, vol. 15, Art. no. 1237, 2025, doi: 10.3390/met15111237.

[10] Z. Xin, J. Zhang, and Q. Liu, “Effects of Basicity, MgO, and Al₂O₃ on Thermodynamic and Physicochemical Properties of CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃ Slag System,” *Molecules*, vol. 30, Art. no. 4275, 2025, doi: 10.3390/molecules30214275.

[11] H. Kim, H. Matsuura, F. Tsukihashi, W. Wang, D. J. Min, and I. Sohn, “Effect of Al₂O₃ and CaO/SiO₂ on the viscosity of calcium–silicate-based slags containing 10 mass % MgO,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 44, pp. 5–12, 2013, doi: 10.1007/s11663-012-9759-7.

REFERENCES

[1] D. Raabe, “The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys,” *Chem. Rev.*, vol. 123, pp. 2436–2608, 2023, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00799.

[2] A. J. Whitworth, J. Vaughan, G. Southam, A. van der Ent, P. N. Nkrumah, X. Ma, and A. Parbhakar-Fox, “Review on metal extraction technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes,” *Miner. Eng.*, vol. 182, Art. no. 107537, 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107537.

[3] M. N. Tolmachev, “Retrospective Analysis of the Global Metal Production,” *Account. Anal. Audit.*, vol. 12, no. 2, pp. 40–51, 2025, doi: 10.26794/2408-9303-2025-12-2-40-51.

[4] J. C. Williams, “High Performance Materials Development in the 21st Century: Trends and Directions,” *Mater. Sci. Forum*, vols. 449–452, pp. 7–12, 2004, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.449-452.7.

[5] European Commission, “EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)—Carbon Tax on Embedded Emissions for Carbon-Intensive Products Effective from 1 January 2026,” 2026. [Online]. Available: https://taxation-customs.ec.europa.eu/news/cbam-successfully-entered-force-1-january-2026-2026-01-14_en. Accessed: Dec. 25, 2025.

[6] Y. Makhambetov, A. Zhakan, A. Zhunusov, S. Kabyllkanov, A. Burumbayev, Z. Sadyk, A. Akhmetov, and B. Uakhitova, “Resource-Efficient Smelting Technology for FeCrMnSi Ferroalloy Production from Technogenic Wastes in an Ore-Thermal Furnace,” *Metals*, vol. 15, Art. no. 1318, 2025, doi: 10.3390/met15121318.

[7] Y. Makhambetov, Z. Sadyk, A. Zhakan, A. Burumbayev, S. Kabyllkanov, A. Myrzagaliyev, D. Aubakirov, N. Lu, and A. Akhmetov, “Electric Arc Metallothermic Smelting of FeCr Using FeAlSiCa as a Reductant,” *Materials*, vol. 18, Art. no. 4221, 2025, doi: 10.3390/ma18184221.

[8] P. Papale, R. Moretti, and A. Paonita, “Thermodynamics of Multi-Component Gas–Melt Equilibrium in Magmas: Theory, Models, and Applications,” *Rev. Mineral. Geochem.*, vol. 87, pp. 431–556, 2022, doi: 10.2138/rmg.2022.87.10.

[9] K.-D. Lee, W.-G. Seo, A. Gupta, and S.-H. Choi, “Effect of composition and temperature on the viscosity and electrical conductivity of ferronickel slags,” *Metals*, vol. 15, Art. no. 1237, 2025, doi: 10.3390/met15111237.

[10] Z. Xin, J. Zhang, and Q. Liu, “Effects of Basicity, MgO, and Al₂O₃ on Thermodynamic and Physicochemical Properties of CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃ Slag System,” *Molecules*, vol. 30, Art. no. 4275, 2025, doi: 10.3390/molecules30214275.

[11] H. Kim, H. Matsuura, F. Tsukihashi, W. Wang, D. J. Min, and I. Sohn, “Effect of Al₂O₃ and CaO/SiO₂ on the viscosity of calcium–silicate-based slags containing 10 mass % MgO,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 44, pp. 5–12, 2013, doi: 10.1007/s11663-012-9759-7.

STUDY OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF CARBONACEOUS MATERIALS**Zhakan A.***Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan***Corresponding author e-mail: armat.medetuly@gmail.com***Author information:****Zhakan Armat**, Junior Researcher, Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: armat.medetuly@gmail.com

Abstract — This paper presents the results of an investigation of the electrical resistivity of coals from the Borly and Saryadyr deposits over the temperature range of 200-1600 °C. The experimental study was carried out using a high-temperature laboratory Tammann furnace and a method for determining the electrical resistance of materials during heating. It was established that the electrical resistivity of both investigated coals decreases systematically with increasing temperature, indicating an increase in their electrical conductivity. Characteristic temperature regions associated with moisture removal, volatile matter release, and structural transformations of the carbonaceous phase were identified. The Borly coal was found to exhibit lower electrical resistivity than the Saryadyr coal over most of the investigated temperature range. At elevated temperatures, the difference between the samples gradually decreases. The obtained results are of practical importance for the selection of carbonaceous reducing agents and the assessment of the electrical characteristics of furnace charge materials during ferroalloy production in electric ore-thermal furnaces.

Keywords — electrical resistivity, coal, electrical conductivity, temperature, carbonaceous reducing agent, electric ore-thermal furnace, ferroalloys.

КӨМІРТЕКТІ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ МЕНШІКТІ ЭЛЕКТРЛІК КЕДЕРГІСІН ЗЕРТТЕУ**Жақан А.М.***Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., Қазақстан***Автор-корреспондент e-mail: armat.medetuly@gmail.com***Автор туралы ақпарат:****Жақан Армат Медетұлы**, Кіші ғылыми қызметкер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., Қазақстан, e-mail: armat.medetuly@gmail.com

Аңдатпа — Мақалада 200-1600 °C температура аралығында Борлы және Сарыадыр кен орындарының көмірлерінің меншікті электрлік кедергісін зерттеу нәтижелері келтірілген. Эксперименттік зерттеулер жоғары температуралы зертханалық Тамман пеші негізінде жасалған қондырғыда материалдардың қыздыру кезіндегі электрлік кедергісін анықтау әдісі арқылы жүргізілді. Температураның жоғарылауымен зерттелген екі көмірдің де меншікті электрлік кедергісінің заңды түрде төмендейтіні анықталды, бұл олардың электрөткізгіштігінің жоғарылағанын көрсетеді. Ылғалдың жойылуына, ұшқыш компоненттердің бөлінуіне және көміртекті фазаның құрылымдық өзгерістеріне байланысты электрлік кедергінің өзгеруінің негізгі температуралық аймақтары анықталды. Зерттелген температура диапазонының басым бөлігінде Борлы көмірінің меншікті электрлік кедергісі Сарыадыр көміріне қарағанда төмен екені анықталды. Жоғары температураларда зерттелген үлгілер арасындағы айырмашылық азаяды. Алынған нәтижелер ферроқорытпаларды кенді-термиялық пештерде балқыту кезінде көміртекті тотықсыздандырғыштарды таңдауға және шикіқұрамның электрлік сипаттамаларын бағалауға практикалық негіз болып табылады.

Түйін сөздер — меншікті электрлік кедергі, көмір, электрөткізгіштік, температура, көміртекті тотықсыздандырғыш, кенді-термиялық пеш, ферроқорытпалар.

ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Жақан А.М.

Химико-металлургический институт имени Ж.Абишева, г. Караганда, Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: armat.medetuly@gmail.com

Информация об авторе:

Жақан Армат Медетұлы, Младший научный сотрудник, Химико-металлургический институт имени Ж.Абишева, г. Караганда, Казахстан, e-mail: armat.medetuly@gmail.com

Аннотация — В статье представлены результаты исследования удельного электрического сопротивления углей месторождений Борлы и Сарыадыр в диапазоне температур 200-1600 °С. Экспериментальные исследования выполнены на установке на базе высокотемпературной лабораторной печи Таммана с использованием метода определения электрического сопротивления материалов при нагревании. Установлено, что с повышением температуры удельное электрическое сопротивление обоих исследуемых углей закономерно снижается, что свидетельствует об увеличении их электропроводности. Выделены характерные температурные области изменения электрического сопротивления, связанные с удалением влаги, выделением летучих компонентов и структурными преобразованиями углеродистой фазы. Показано, что уголь Борлы характеризуется более низким удельным электрическим сопротивлением по сравнению с углем Сарыадыр в большей части исследованного температурного диапазона. При высоких температурах различия между образцами уменьшаются. Полученные результаты имеют практическое значение для выбора углеродистых восстановителей и оценки электрических характеристик шихты при производстве ферросплавов в рудно-термических печах.

Ключевые слова — удельное электрическое сопротивление, уголь, электропроводность, температура, углеродистый восстановитель, рудно-термическая печь, ферросплавы.

KEY FINDINGS

The regularities of changes in the electrical resistivity of carbonaceous materials as a function of temperature were established. The effect of temperature on the electrophysical properties of the studied materials was demonstrated, and characteristic ranges of variation in their electrical resistivity were determined. The obtained results can be used to assess the electrical conductivity of carbonaceous materials under high-temperature conditions and to substantiate rational parameters for the electric-thermal processing of raw materials in ore-thermal furnaces.

INTRODUCTION

Analysis of the global raw material base for the metallurgical industry indicates a continuous depletion of high-quality mineral resources, while the requirements for the quality of metals and ferroalloys are becoming increasingly stringent. Under these conditions, the development of efficient technologies for processing complex and lower-grade raw materials requires a comprehensive understanding of their physicochemical properties. In particular, the electrical properties of raw materials play an important role in the operation of electric ore-thermal furnaces used for the production of ferroalloys and other metallurgical products.

The efficiency and applicability of ferroalloys are determined not only by their chemical composition, including the concentrations of the main elements and accompanying impurities, but also by a

range of physicochemical properties such as particle size distribution, density, surface characteristics, melting temperature, reducibility, and electrical conductivity. In industrial steelmaking practice, these properties significantly affect the behavior of charge materials during melting and, consequently, the efficiency of alloying and the overall performance of the metallurgical process.

The value of mineral raw materials is determined by a combination of economic and metallurgical characteristics. The economic value is associated with the costs of extraction and preliminary preparation of the raw material, including crushing, classification, and beneficiation. The metallurgical value is determined by the content of the main valuable elements, the amount and composition of gangue, the resulting slag composition and volume, the presence of harmful impurities such as phosphorus and sulfur, the amenability of the material to beneficiation, as well as its physical and physicochemical characteristics. Among the latter, strength, particle size distribution, porosity, moisture capacity, reducibility, melting temperature, and electrical resistivity are of particular importance for electric furnace processes.

The electrical resistivity of charge materials has considerable practical importance in the production of ferroalloys in electric ore-thermal furnaces. Changes in the electrical resistivity of the charge located in the furnace are directly associated with changes in the operating voltage, which is one of the principal electrical parameters of the furnace. The

furnace power, electrical and thermal losses, power factor ($\cos \phi$), and, consequently, the specific electrical energy consumption, which is one of the key technical and economic indicators of the process, depend on the operating voltage and the electrical characteristics of the charge.

Numerous studies have been devoted to the electrical resistivity of individual charge components used in electric ore-thermal furnaces. During the development of high-power electric furnaces for ferroalloy production, particular attention was paid to the electrical resistivity of individual concentrates and complex charge materials used for the smelting of various ferroalloys [1-6]. The electrical resistivity of manganese minerals [1,2,7], manganese concentrates, and charge mixtures for the production of manganese alloys [4-6] has been investigated. S. Morgulev [8] studied the electrical resistivity of carbonaceous reducing agents. S.I. Khitrik and Ya.F. Tsybakin [9] investigated the electrical resistivity of charge mixtures and individual charge components used in ferrosilicon production. A.S. Mikulinsky and L.V. Yumanova [10], as well as R.A. Chuguryan [11], studied the electrical conductivity of charge materials and their individual components used in calcium carbide production. M. Dermel and V. Marinchek [12] investigated the electrical conductivity of raw materials used in electric blast-furnace smelting.

Despite the considerable amount of research devoted to the electrical properties of metallurgical charge materials, the electrical resistivity of individual carbonaceous materials can vary significantly depending on their geological origin, petrographic composition, ash content, moisture content, porosity, degree of metamorphism, and temperature. Therefore, obtaining experimental data on the electrical resistivity of specific coal grades is important for assessing their suitability as carbonaceous reducing agents in electric ore-thermal processes.

In this regard, the study of the electrical resistivity of coals from the Saryadyr and Borly deposits is of practical and scientific interest. Determination of the temperature dependence of their electrical resistivity makes it possible to establish their electrical behavior under conditions relevant to high-temperature furnace processes and to assess the influence of the charge electrical characteristics on the energy parameters of electric ore-thermal furnaces.

Research Objective. The objective of this study is to investigate the electrical resistivity of coals from the Saryadyr and Borly deposits as a function of temperature and to determine the characteristic features of their electrical behavior under conditions relevant to electric ore-thermal processes.

Research Tasks. To achieve the stated objective, the following tasks were formulated:

1. To determine the electrical resistivity of the studied coals over the investigated temperature range and establish its temperature dependence.
2. To compare the electrical behavior of the Saryadyr and Borly coals and identify the characteristic temperature ranges of changes in their electrical resistivity.
3. To assess the practical significance of the obtained electrical characteristics for the use of these coals as carbonaceous reducing agents in electric ore-thermal furnace processes.

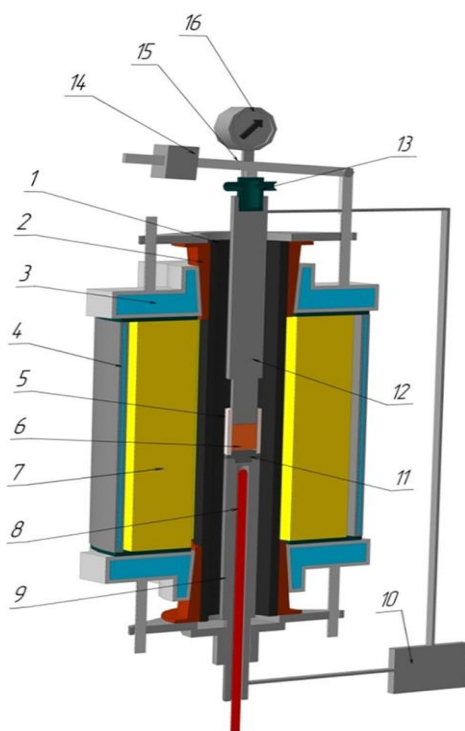
Scientific Novelty. The scientific novelty of the study consists in establishing the temperature dependence of the electrical resistivity of coals from the Saryadyr and Borly deposits and in identifying the characteristic features of their electrical behavior under heating conditions. The obtained experimental data provide a basis for comparative assessment of the electrical properties of the studied coals and can be used to improve the selection and proportioning of carbonaceous reducing agents in electric ore-thermal furnace charge materials.

MATERIALS AND METHODS

The experimental study employed the method proposed by V. I. Zhuchkov, which enables the determination of the electrical resistivity of materials at high temperatures while simultaneously recording the degree of their softening (shrinkage) [2].

For measurements of electrical resistivity during heating, the particle size of the initial material was maintained at 3-5 mm. The measurements were carried out in a Tammann high-temperature laboratory furnace. The electrical conductivity of the charge materials was investigated over a temperature range of 25-1600 °C at a heating rate of 15 °C/min. According to the Agroskin-Shumilov method, electrical resistance measurements were performed at 50 °C intervals. To increase the information content of the experimental data, automatic recording of electrical resistance values in the computer memory at 30-second intervals was implemented.

For this purpose, a special circuit was developed for connecting the measuring transducers to the Tammann laboratory furnace (Figure 1).



- 1 – carbon-graphite tube; 2 – copper clamping ring;
 3 – water-cooled cover; 4 – water-cooled housing;
 5 – alundum tube; 6 – investigated charge material;
 7 – protective lining; 8 – thermocouple; 9 – lower
 electrode; 10 – digital ohmmeter; 11 – graphite base
 for the alundum tube; 12 – upper electrode;
 13 – water cooling; 14 – load; 15 – lever;
 16 – electronic device for measuring shrinkage.

Figure 1 – Experimental setup for determining electrical resistivity and shrinkage (cross-sectional view).

The experimental setup consisted of a Tammann furnace in which the investigated material was heated. A sample with a height of 4 cm was placed in a cavity of an alundum crucible (5) with an internal diameter of 3 cm installed inside the furnace.

Data acquisition was performed using transducers connected to a thermocouple (8), electrodes (9, 12), and a device for measuring sample shrinkage. Graphite electrodes (9, 12), one of which was equipped with a hole for the thermocouple (8), were positioned on opposite sides of the sample to apply an electrical voltage across the material. The lower electrode was fixed in position, whereas the upper electrode was allowed to move downward as the material contracted under heating. A load (14) continuously pressed the upper electrode against the sample, ensuring reliable electrical contact. The pressure applied to the material was maintained at 0.02-0.04 MPa. The thermocouple was positioned through the lower electrode and electrically insulated from the alundum tube.

RESULTS AND DISCUSSION

A.A. Agroskin and S.N. Lyandyros investigated changes in the electrical resistivity of coal during cooling after preliminary heating. The studies showed that, when coal heated to 400 °C is subsequently cooled, its electrical resistivity returns to its initial value. For coal heated to 600 °C, the value of $\lg \rho$ at room temperature decreases by approximately two times compared with the initial value and corresponds to the electrical resistivity of coal at 400 °C. The electrical resistivity of coal heated to 800 °C partially recovers during cooling, whereas for coal heated to 1000 °C, the electrical resistivity remains practically unchanged [13].

The electrical resistivity of coal depends on its degree of metamorphism. Coals at an intermediate stage of metamorphism exhibit the highest electrical resistivity. Coals at a lower stage of metamorphism are characterized by somewhat higher electrical conductivity, whereas materials at an advanced stage of carbonization exhibit the lowest electrical resistivity [13].

The amount of mineral impurities also affects the electrical resistivity. With increasing ash content, the electrical resistivity of low- and medium-rank coals at room temperature decreases, whereas at elevated temperatures it increases. This phenomenon can be explained by the fact that, in low-rank coals, the electrical resistivity of the organic matter is considerably higher than that of the mineral impurities. Upon heating, the electrical resistivity of all coals increases with increasing ash content [13].

The electrical resistivity of a bulk layer of carbonaceous material consists of the intrinsic resistivity of the material and the resistance of transitional contacts between individual reducing-agent particles. The electrical resistivity of the charge increases with decreasing particle size of the carbonaceous reducing agent. The bath of a ferroalloy furnace acts as a bulk electrical conductor, and the distribution of current and power within it depends primarily on the electrical resistivity of the charge, which, in turn, is determined largely by the electrical conductivity of the reducing agent.

A high electrical resistivity of the charge makes it possible to increase the operating voltage and, consequently, the furnace power. At a given furnace power, an increase in the conductive-current component of the charge reduces the arc-current component. High electrical conductivity in the upper part of the furnace bath can lead to heating and sintering of the upper charge layer (the so-called “hot shock”) and to insufficient electrode penetration. In contrast, the use of a carbonaceous reducing agent with high electrical resistivity promotes deeper and more stable electrode penetration, reduces the conductive-current component of the charge, and contributes to

greater heat concentration in the lower zones of the furnace bath [13].

Figure 2 shows the dependence of the electrical resistivity of the Borly and Saryadyr coals on temperature.

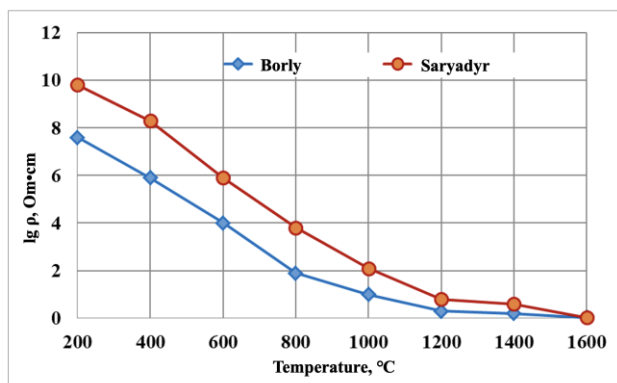


Figure 2 – Electrical Resistivity of Coals as a Function of Temperature

Figure 2 presents the temperature dependence of the electrical resistivity of the Borly and Saryadyr coals. The obtained curves demonstrate a pronounced decrease in electrical resistivity with increasing temperature, indicating a significant increase in the electrical conductivity of both carbonaceous materials. Based on the character of the curves, three characteristic temperature regions can be distinguished. The first region extends from 200 to 400 °C and is characterized by a relatively moderate decrease in electrical resistivity. The second region covers 400–1000 °C, where a more pronounced decrease in resistivity is observed. The third region corresponds to 1200–1600 °C and is characterized by very low resistivity values and a gradual approach of the curves toward similar values.

The change in electrical resistivity in the 200–400 °C range can be associated primarily with the removal of physically bound moisture and the initial thermal transformation of the organic matter. At the initial stage of heating, moisture evaporation and changes in the contact conditions between individual particles affect the electrical transport through the sample. As the temperature increases, the contribution of moisture to electrical conduction decreases, while the influence of the carbonaceous phase becomes increasingly dominant.

In the 400–1000 °C range, the electrical resistivity continues to decrease as a result of progressive thermal decomposition of the organic structure and the release of volatile components. These processes are accompanied by carbonization and structural rearrangement of the carbonaceous phase, which promote the formation of more electrically conductive pathways within the material. A particularly

pronounced decrease in electrical resistivity is observed at approximately 800 °C [14], which may indicate intensive structural transformations and an increase in the degree of carbonization of the coal.

At temperatures above 1000 °C, the resistivity of both samples decreases to very low values. In the 1200–1600 °C range, the difference between the Borly and Saryadyr coals becomes considerably smaller, and at 1600 °C their electrical resistivity approaches nearly the same value. This behavior indicates that at high temperatures the electrical properties of the samples are increasingly controlled by the thermally transformed carbonaceous phase rather than by their initial structural and compositional differences.

Throughout most of the investigated temperature range, the Saryadyr coal exhibits higher electrical resistivity than the Borly coal. At 200 °C, the values of $\lg \rho$ are approximately 9.8 and 7.6 Ohm·cm for the Saryadyr and Borly coals, respectively. At 800 °C, these values decrease to approximately 3.8 and 1.9 Ohm·cm, respectively. Thus, the Borly coal demonstrates higher electrical conductivity over a substantial part of the investigated temperature range. The observed difference may be related to variations in the petrographic composition, ash content, volatile matter content, degree of metamorphism, and structural characteristics of the two coals.

The pronounced decrease in electrical resistivity with increasing temperature is of practical importance for the application of these materials as carbonaceous reducing agents in electric ore-thermal furnaces. A decrease in charge resistivity leads to an increase in the conductive component of the electric current and can affect the distribution of electrical power and heat within the furnace bath. Therefore, the experimentally determined temperature dependence of electrical resistivity should be considered when selecting carbonaceous reducing agents and designing the electrical operating conditions of ferroalloy furnaces.

CONCLUSIONS

The electrical resistivity of the Borly and Saryadyr coals was investigated over the temperature range of 200–1600 °C. The results demonstrated a pronounced decrease in electrical resistivity with increasing temperature for both materials, indicating a significant increase in their electrical conductivity under heating.

The temperature dependence of electrical resistivity can be divided into three characteristic regions. The first region (200–400 °C) is associated mainly with moisture removal and initial thermal transformations of the coal structure. The second region (400–1000 °C) is characterized by a more pronounced decrease in resistivity, which can be attributed to the release of volatile matter and progressive carbonization. A particularly significant

decrease in electrical resistivity was observed at approximately 800 °C. At temperatures above 1000 °C, the resistivity decreased to very low values, and at 1600 °C the electrical properties of the two coals became close to each other.

Throughout most of the investigated temperature range, the Borly coal exhibited lower electrical resistivity than the Saryadyr coal. Consequently, Borly coal is characterized by higher electrical conductivity, whereas Saryadyr coal possesses comparatively higher electrical resistivity. The observed difference may be related to variations in the composition, ash content, degree of metamorphism, volatile matter content, and structural characteristics of the coals.

From the perspective of electric ore-thermal furnace operation, the obtained results indicate that the two coals may have different technological effects on the electrical characteristics of the furnace charge. The higher electrical resistivity of Saryadyr coal may be advantageous for increasing the operating voltage, reducing the conductive component of the current, and promoting deeper and more stable electrode penetration. In contrast, the higher electrical conductivity of Borly coal may contribute to a greater conductive-current component within the charge.

Therefore, Saryadyr coal can be considered more promising when a carbonaceous reducing agent with relatively high electrical resistivity is required for stable operation of an electric ore-thermal furnace, while Borly coal may be preferable in applications

where higher electrical conductivity of the charge is required. However, the final selection of a reducing agent should also take into account its chemical composition, fixed carbon content, ash content, volatile matter, reactivity, particle-size distribution, and mechanical properties.

FUNDING

This research was conducted without external funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to the Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev for its organizational, scientific, and methodological support during the research and preparation of this article.

Copyright © 2026 by the author(s). This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0). The license permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the material in any medium, provided that appropriate credit is given to the original author(s) and that the same license is applied to any derivative materials.

REFERENCES

- [1] D.A. Kissin, A.G. Yashchenok, and N.M. Moskaleva, *Metallurgicheskiye svoystva margantsevykh mineralov* [Metallurgical Properties of Manganese Minerals]. In: *Fiziko-khimicheskiye osnovy metallurgii margantsa* [Physicochemical Fundamentals of Manganese Metallurgy]. Moscow, Russia, 1977, pp. 233–236. (In Russian).
- [2] V.I. Zhuchkov and A.S. Mikulinsky, *Metodika opredeleniya elektricheskogo soprotivleniya materialov i shikht* [Method for Determining the Electrical Resistance of Materials and Charge Mixtures]. In: *Eksperimentalnaya tekhnika i metody vysokotemperaturnykh izmereniy* [Experimental Techniques and Methods of High-Temperature Measurements]. Moscow, Russia, 1966, pp. 43–46. (In Russian).
- [3] S.M. Mazmishvili, V.I. Zhuchkov, A.T. Khvichiya, and Z.Kh. Muradova, “Elektrosoprotivleniye monoshikhty na osnove margantsevykh flotokontsentratorov” [Electrical Resistance of a Mono-Charge Based on Manganese Flotation Concentrates], *Trudy Gruzinskogo Politehnicheskogo Instituta*, no. 6, pp. 8–13, 1976. (In Russian).
- [4] G.U. Nikolaishvili and M.A. Kekelidze, “Ustanovka dlya odnovremennogo opredeleniya elektricheskogo soprotivleniya i razmyagcheniya rudnykh i nerudnykh materialov” [Apparatus for Simultaneous Determination of the Electrical Resistance and Softening of Ore and Non-Ore Materials], *Tekhnicheskaya informatsiya. Metallurgiya*, no. 4, pp. 31–37, 1967. (In Russian).
- [5] T.A. Chubinidze and G.G. Arevadze, “Sposob opredeleniya metallurgicheskikh svoystv ferrosplavnykh shikht” [Method for Determining the Metallurgical Properties of Ferroalloy Charge Materials]. In: *Sbornik trudov Respublikanskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference]. Dnepropetrovsk, Ukraine, 1985, pp. 40–41. (In Russian).
- [6] M.A. Runov et al., “Ob izvlechenii margantsa pri vyplavke silikomargantsa” [On Manganese Recovery during Silicomanganese Smelting]. In: *Fiziko-khimicheskiye osnovy metallurgii margantsa* [Physicochemical Fundamentals of Manganese Metallurgy]. Moscow, Russia, 1977, pp. 187–191. (In Russian).
- [7] V.I. Gryaznov, “Skorostnoy metod mineralogicheskoy diagnostiki margantsevykh rud po elektroprovodnosti” [Rapid Method for Mineralogical Diagnosis of Manganese Ores Based on Electrical Conductivity], *Doklady Akademii Nauk SSSR*, vol. 121, no. 1, 1958. (In Russian).

- [8] S.A. Morgulev, “Regulirovaniye elektricheskogo soprotivleniya shikhty v pechakh rudno-termicheskogo tipa v tselyakh povysheniya ikh proizvoditelnosti” [Control of the Electrical Resistance of the Charge in Ore-Thermal Furnaces to Increase Their Productivity], *Stal*, nos. 4–5, 1937. (In Russian).
- [9] S.I. Khitrik and YaF. Tsybakin, “Elektricheskoye soprotivleniye shikhty pri vyplavke ferrosilitsiya” [Electrical Resistance of the Charge during Ferrosilicon Smelting], *Teoriya i praktika metallurgii*, no. 3, 1938. (In Russian).
- [10] A.S. Mikulinsky and L.V. Yumanova, “K voprosu prokhozheniya toka v karbidnoy pechi” [On the Passage of Electric Current in a Carbide Furnace], *Trudy UNIKHIM*, vol. II. Moscow, Russia: Goskhimizdat, 1954. (In Russian).
- [11] R.A. Chuguryan, *Elektroprovodnost shikhty karbida kaltsiya* [Electrical Conductivity of Calcium Carbide Charge Materials]. Ph.D. dissertation, Institute of Electrical Engineering, Academy of Sciences of the Armenian SSR, Yerevan, Armenia, 1960, 145 p. (In Russian).
- [12] M. Dermel and V. Marinchek, “Elektroprovodnost syrykh materialov elektrodomennoi plavki” [Electrical Conductivity of Raw Materials for Electric Blast-Furnace Smelting], *Referativnyy Zhurnal. Metallurgiya*, no. 10, 1960, 22709. (In Russian).
- [13] Ye. Makhambetov, A.M. Abdirashit, Ye. Kuatbay, O. Yucel, and Ye. Tazhiyev, “Research of electrophysical properties of charge materials for smelting a complex alloy of aluminosilicomanganese,” *Engineering Journal of Satbayev University*, vol. 144, pp. 15–21, 2022. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i2.03>.
- [14] E.N. Makhambetov, *Razrabotka tekhnologii vyplavki kompleksnykh kaltsiisoderzhashchikh ferrosplavov iz otvalnykh metallurgicheskikh shlakov i vysokozolnykh ugley* [Development of a Technology for Smelting Complex Calcium-Containing Ferroalloys from Metallurgical Slags and High-Ash Coals]. Ph.D. dissertation, Karaganda, Kazakhstan, 2021, 125 p. (In Russian).

Metallurgy, new materials technologies

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/156>

INVESTIGATION OF THE THERMAL TRANSFORMATIONS OF RICE HUSK BY DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS FOR THE PRODUCTION OF SILICON CARBIDE

Sadyk Zh.

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

*Corresponding author email: sadzhad03@gmail.com

Author information:

Sadyk Zhadiger, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia, e-mail: sadzhad03@gmail.com

Abstract — The thermal transformations of rice husk obtained from rice cultivated in the Kyzylorda Region were investigated to determine the appropriate conditions for its preliminary thermal treatment prior to silicon carbide production. The study was conducted using differential thermal analysis (DTA) with a high-temperature simultaneous thermal analyzer STA300. The main temperature ranges of the thermal transformations of rice husk were determined. The DTA curve revealed an endothermic effect with a maximum at 150 °C, associated with moisture removal, as well as exothermic effects in the range of 300-440 °C and at higher temperatures, which were attributed to the sequential removal and transformation of organic components. It was established that the main mass loss occurred in the temperature range of 300-600 °C. Based on the results of thermoxidative treatment, the maximum removal of volatile components was achieved at 600-700 °C with a treatment duration of 10-20 min. The obtained results provide a basis for selecting the temperature conditions for the preliminary preparation of rice husk and can be used in the development of a technology for its further application as a silicon- and carbon-containing raw material for silicon carbide production.

Keywords — rice husk, thermal analysis, differential thermal analysis, DTA, thermal transformations, pyrolysis, thermoxidative treatment, volatile components, silicon carbide.

КРЕМНИЙ КАРБИДІН АЛУ ҮШІН КҮРІШ ҚАУЫЗЫНЫҢ ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫ-ТЕРМИЯЛЫҚ ТАЛДАУ ӘДІСІМЕН ТЕРМИЯЛЫҚ ТҮРЛЕНУЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

Садық Ж.О.

«МИСиС» Ұлттық ғылым және технологиялар университеті, Мәскеу, Ресей

*Корреспондент автор e-mail: sadzhad03@gmail.com

Автор туралы ақпарат:

Садық Жәдігер Орысбайұлы, «МИСиС» Ұлттық ғылым және технологиялар университеті, Мәскеу, Ресей, e-mail: sadzhad03@gmail.com

Аңдатпа — Зерттеу жұмысында Қызылорда облысында өсірілген күріштен алынған күріш қауызының термиялық түрленулері зерттеліп, оны кремний карбидін алу алдында алдын ала термиялық өңдеудің тиімді жағдайлары анықталды. Зерттеу жоғары температуралы STA300 бір мезгілдегі термиялық анализаторын қолдана отырып, дифференциалды-термиялық талдау (ДТА) әдісімен жүргізілді. Күріш қауызының негізгі термиялық түрлену процестері жүретін температуралық аралықтар анықталды. ДТА қисығында 150 °C температурада максимумға жететін, ылғалдың жойылуымен байланысты эндотермиялық әсер, сондай-ақ 300-440 °C және жоғары температуралар аймағында органикалық компоненттердің біртіндеп жойылуы мен түрленуіне байланысты экзотермиялық әсерлер анықталды. Негізгі масса жоғалуы 300-600 °C температура аралығында жүретіні белгіленді. Термототықтырғыш өңдеу нәтижелері бойынша ұшпа компоненттердің барынша жойылуы 600-700 °C температурада 10-20 минут өңдеу ұзақтығында қамтамасыз етілетіні анықталды. Алынған нәтижелер күріш қауызына алдын ала өңдеу жүргізудің температуралық режимдерін негіздеуге мүмкіндік береді және оны кремний карбидін алу үшін құрамында кремний мен көміртегі бар шикізат ретінде одан әрі пайдалану технологиясын әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер — күріш қауызы, термиялық талдау, дифференциалды-термиялық талдау, ДТА, термиялық түрленулер, пиролиз, термототықтырғыш өңдеу, ұшына компоненттер, кремний карбиді.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Садық Ж.О.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

*Автор корреспонденции e-mail: sadzhad03@gmail.com

Информация об авторе:

Садық Жәдігер Орысбайұлы, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: sadzhad03@gmail.com

Аннотация — В работе исследованы термические превращения рисовой шелухи, полученной из риса, выращенного в Кызылординской области, с целью определения рациональных условий ее предварительной термической обработки для последующего получения карбида кремния. Исследование проводили методом дифференциально-термического анализа с использованием высокотемпературного одновременного термического анализатора STA300. Установлены основные температурные интервалы протекания термических превращений рисовой шелухи. На ДТА-кривой выявлен эндотермический эффект с максимумом при 150 °С, связанный с удалением влаги, а также экзотермические эффекты в области 300-440 °С и при повышенных температурах, обусловленные последовательным удалением и превращением органических компонентов. Установлено, что основная потеря массы происходит в температурном диапазоне 300-600 °С. По результатам термоокислительной обработки определено, что максимальное удаление летучих компонентов достигается при температуре 600-700 °С и продолжительности обработки 10-20 мин. Полученные результаты позволяют обосновать температурный режим предварительной подготовки рисовой шелухи и могут быть использованы при разработке технологии ее дальнейшего применения в качестве кремний- и углеродсодержащего сырья для получения карбида кремния.

Ключевые слова — рисовая шелуха, термический анализ, дифференциально-термический анализ, ДТА, термические превращения, пиролиз, термоокислительная обработка, летучие компоненты, карбид кремния.

KEY FINDINGS

The thermal transformations of rice husk were investigated by differential thermal analysis using a STA300 analyzer. The main temperature ranges of thermal effects and mass loss were established, and the conditions for thermoxidative treatment ensuring maximum removal of moisture and volatile components at 600-700 °C for 10-20 min were determined. The obtained results can be used to justify the preliminary preparation of rice husk as a silicon- and carbon-containing raw material for silicon carbide production.

INTRODUCTION

Silicon carbide (SiC), owing to its unique properties, including high hardness and refractoriness, is widely used in electrical engineering, semiconductor, radio engineering, tooling, and other industrial applications. Existing industrial methods for producing silicon carbide from mineral raw materials are highly energy-intensive and costly, while the resulting silicon carbide does not always meet the required quality standards [1].

The Acheson process [2] is an industrial method for producing silicon carbide. The synthesized silicon carbide obtained by this method is used in the manufacture of abrasive tools, as a vapor source for crystal growth by the Lely method, and for the production of silicon carbide-based products by pressing and slip casting. According to this method, low-ash coke or petroleum coke is added to silicon dioxide, followed by heat treatment in which an electric current is passed through carbon electrodes and the core at a temperature of 2500–2600 °C. The process duration is approximately 40 h. Green or black polycrystalline silicon carbide is also added to the charge.

Until the early 1980s, the Lely method [3] was the only industrial method for producing silicon carbide crystals for the semiconductor industry. Even today, SiCrystal (Germany) uses the Lely method to produce polished 6H- and 15R-SiC crystals. The Lely method is based on the evaporation of polycrystalline silicon carbide at temperatures of 2500–2650 °C, followed by vapor condensation on randomly formed nuclei.

The spontaneous nucleation characteristic of the Lely method results in the uncontrolled formation of

a large number of small crystals. The use of seed crystals eliminates these limitations and enables the growth of large-diameter bulk single crystals. Currently, this approach is known as the Physical Vapor Transport (PVT) method. The method is based on the condensation of a supersaturated vapor generated by the sublimation of synthesized silicon carbide onto a single-crystal seed.

Industrial silicon carbide is produced in two main varieties, distinguished by color: green and black. They differ relatively little in chemical composition and abrasive properties; however, green silicon carbide contains fewer impurities and is considered a higher-quality abrasive than black silicon carbide. The production of silicon carbide by carbothermic reduction [4] can be represented by the following equation:



The formation of silicon carbide involves the interaction of silicon dioxide with carbon at a temperature of 2200-2300 °C. In the present study, the production of silicon carbide from rice husk is considered. Rice husk obtained from rice cultivated in the Kyzylorda Region was used as the raw material. To determine the main physicochemical characteristics of the pyrolyzed rice husk, the samples were subjected to thermal analysis using differential thermal analysis (DTA).

Research Gap. Although rice husk has been widely studied as a renewable silicon- and carbon-containing raw material, insufficient attention has been given to the detailed characterization of its thermal transformations under controlled heating conditions for subsequent silicon carbide production. In particular, the temperature ranges of the main thermal effects, the stages of moisture and volatile component removal, and the relationship between thermal behavior and the conditions of preliminary thermoxidative treatment require further clarification. Therefore, a detailed DTA-based study of rice husk is necessary to establish rational conditions for its thermal preparation prior to silicon carbide production..

Scientific Novelty. The scientific novelty of this study lies in the identification of the main thermal transformation stages of rice husk using differential thermal analysis (DTA) and the determination of the corresponding temperature ranges. The temperature conditions and duration of thermoxidative treatment required for the effective

removal of moisture and volatile components were established. The obtained results provide a scientific basis for the preliminary thermal preparation of rice husk as a silicon- and carbon-containing raw material for subsequent silicon carbide production..

MATERIALS AND METHODS

Differential thermal analysis (DTA) is a thermal analysis technique used to investigate thermal effects occurring in a material during heating or cooling. The method is based on the simultaneous measurement of the temperatures of the sample and an inert reference material under a controlled temperature program and determination of the temperature difference between them:

$$\Delta T = T_s - T_r \quad (2)$$

where T_s is the temperature of the sample and T_r is the temperature of the reference material.

In the absence of thermal effects, the temperatures of the sample and reference material change in a similar manner. When a physical or chemical transformation occurs in the sample, a temperature difference develops between the sample and the reference material, which is recorded as a peak on the DTA curve.

Differential thermal analysis was performed using a high-temperature simultaneous thermal analyzer STA300 (Figure 1). The method is based on recording the temperature difference between the investigated sample and the inert reference material under a controlled temperature program. During heating, changes in the thermal behavior of the sample associated with physical and chemical transformations were recorded.

The analysis was performed over a temperature range from room temperature to 1250 °C. The heating rate was set within the range of 1–80 °C/min, depending on the experimental conditions. The instrument is equipped with a controlled gas supply system that allows measurements to be performed under inert, oxidizing, or reducing atmospheres, as well as under static or dynamic conditions. The temperature resolution of the instrument is 0.1 °C, while the DTA/DSC measurement range is 0 to ±500 mW.

The obtained thermal curves were used to determine the onset, peak, and endset temperatures of endothermic and exothermic effects, as well as to establish the temperature ranges in which the corresponding physicochemical transformations occurred.

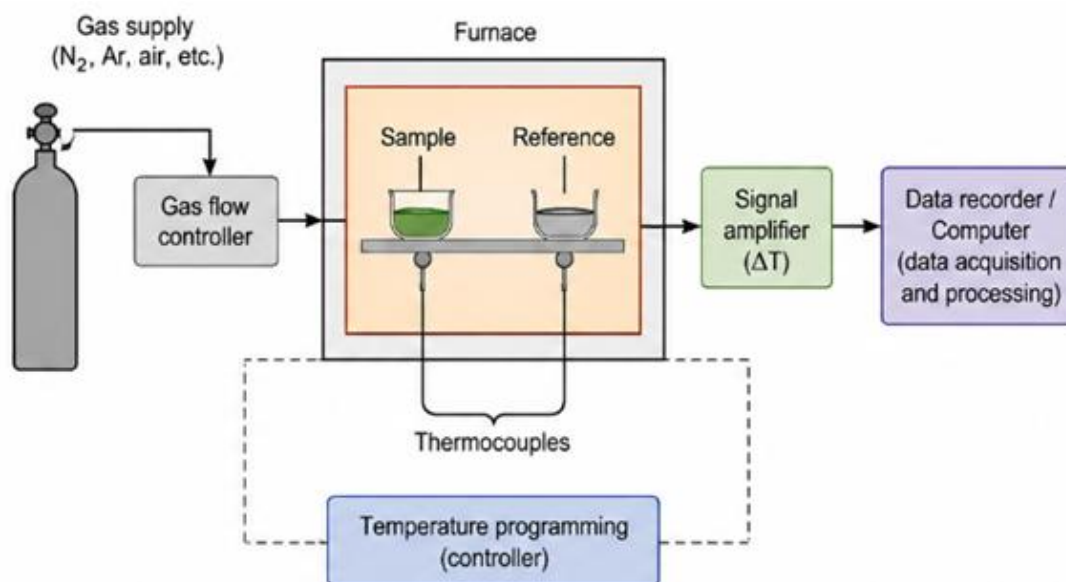


Figure 1 – Schematic diagram of the DTA equipment

RESULTS AND DISCUSSION

Within the investigated temperature range, the DTA curve (Figure 2) shows a pronounced endothermic effect with a maximum at 150 °C, which is associated with moisture evaporation. An exothermic effect at 300 °C is also observed,

indicating the onset of volatile component release and continuing through the temperature range of 390, 440, and 790 °C. The mass loss associated with moisture removal and the release of volatile components amounted to 7.5-10% and 50-60%, respectively.

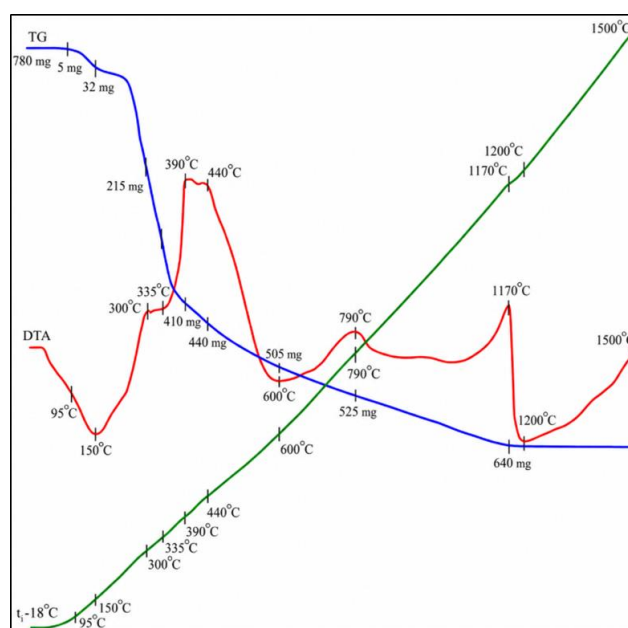


Figure 2 – DTA curve of the thermal transformations of rice husk

Thermoxidative treatment (pyrolysis) of rice husk (RH) was investigated to determine the mass loss associated with moisture and volatile organic components during heat treatment in the temperature

range of 150–700 °C, at atmospheric pressure, and for treatment durations of 10–60 min. It was established that the mass loss of RH at 150, 200, 300, 400, 500, 600, and 700 °C was 7.02 and 11.88%, 7.07 and 10.53%, 23.92 and 43.46%, 52.32 and 52.74%, 57.32

and 61.20%, 62.38 and 62.34%, and 62.20 and 61.84%, respectively, for treatment durations of 10 and 60 min. Therefore, to achieve maximum removal of volatile components from RH, thermoxidative treatment should be carried out in the temperature range of 600-700 °C for 10-20 min.

CONCLUSIONS

1. Differential thermal analysis of pyrolyzed rice husk was performed using a high-temperature simultaneous thermal analyzer STA300. The main temperature ranges of thermal transformations and the corresponding endothermic and exothermic effects were determined.

2. A pronounced endothermic effect with a maximum at 150 °C was identified on the DTA curve, primarily associated with moisture removal. With further heating, exothermic effects were observed in the range of 300-440 °C, as well as at higher temperatures around 790 °C, indicating successive thermal transformations of the organic components of rice husk.

3. It was established that the main mass loss of rice husk occurs in the temperature range of 300-600 °C. During thermoxidative treatment, the mass loss increased with increasing temperature and reached maximum values at 600-700 °C, after which further temperature increases resulted in only minor changes in mass.

4. Based on the results of thermoxidative treatment, a temperature range of 600-700 °C with a treatment duration of 10-20 min was identified as

optimal for the maximum removal of moisture and volatile organic components from rice husk. The obtained results can be used to substantiate the conditions for the preliminary thermal treatment of rice husk prior to its further use as a silicon- and carbon-containing raw material..

AUTHOR CONTRIBUTION

The author independently performed the formulation of the research objectives, experimental studies, processing and analysis of the obtained results, and preparation of the manuscript.

CONFLICT OF INTERESTS

The author declares no conflict of interest.

ACKNOWLEDGMENTS

The author expresses sincere gratitude to the National University of Science and Technology “MISIS” (Moscow, Russia) for providing scientific and technical support in conducting the research.

Copyright © 2026 belongs to the author(s).

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0). The license permits the free use, distribution, and reproduction of the material in any medium or format, provided that appropriate credit is given to the author(s) and the same license is retained for any derivative materials.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Г. Г. Гнесин, Карбидокремниевые материалы. Москва, Россия: Металлургия, 1977. – 216 с.
- [2] О. А. Агеев, А. Е. Беляев, Н. С. Болтовец и др., Карбид кремния: технология, свойства, применение. Харьков, Украина: ИСМА, 2010. – 532 с.
- [3] Л. Я. Марковский, Д. Л. Оршанский, В. П. Прянишников, Химическая электротермия. Ленинград, СССР: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1952. – 408 с.
- [4] И. С. Кайнарский, Э. В. Дегтерева, Карборундовые огнеупоры. Москва, Россия: Металлургиздат, 1963. – С. 9–14..

REFERENCES

- [1] G. G. Gnesin, Carbide-Silicon Materials. Moscow, Russia: Metallurgy, 1977, 216 p.
- [2] O. A. Ageev, A. E. Belyaev, N. S. Boltovets, et al., Silicon Carbide: Technology, Properties, Applications. Kharkov, Ukraine: ISMA, 2010, 532 p.
- [3] L. Ya. Markovsky, D. L. Orshansky, and V. P. Pryanishnikov, Chemical Electrothermy. Leningrad, USSR: State Scientific and Technical Publishing House of Chemical Literature, 1952, 408 p.
- [4] I. S. Kaynarsky and E. V. Degtereva, “Carborundum Refractories,” Moscow, Russia: Metallurgizdat, 1963, pp. 9–14.

Машина жасау, технологиялық машиналар және көлік, құрылысDOI: <https://www.doi.org/10.53002/157>**REFINEMENT OF BEAM BENDING THEORIES: A SIMPLIFIED METHOD FOR STRUCTURAL ANALYSIS**¹*S. Akhazhanov*, ²*A. Kasenova*, ³*B. Kaldanova*¹*E. Buketov Karaganda National Research University, Karaganda, Kazakhstan*²*Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan*³*Department of Civil Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan*** Corresponding author e-mail: kasenova.aigerim@mail.ru***Author information:****Akhazhanov S.** - Laboratory of Applied Mechanics and Robotics, E. Buketov Karaganda National Research University, Karaganda, Kazakhstan. E-mail: akhazhanov.S@karnu-buketov.edu.kz**Kasenova A.** - Department of Civil Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: kasenova.aigerim@mail.ru**Kaldanova B.** - Department of Civil Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: b.kaldanova@ttu.edu.kz

Abstract. This study develops a refined beam theory aimed at overcoming the limitations of classical models, such as the Euler–Bernoulli and Timoshenko beam theories. These classical models often neglect transverse shear deformation and rotary inertia effects, which become particularly important in the analysis of thick beams or beams made of advanced materials. The proposed theory considers a beam with a constant rectangular cross-section made of a linear elastic, homogeneous, and isotropic material. While retaining the simplicity and widely accepted principles of the classical Euler–Bernoulli theory, the proposed theory provides high accuracy in the bending analysis of beams. A simplified governing equation is formulated as a practical and efficient tool for engineering calculations. Analytical solutions are obtained for thick isotropic beams under various boundary conditions. The considered cases include simply supported, cantilever, and clamped beams subjected to uniformly and non-uniformly distributed loads. Explicit expressions are derived for transverse displacements, strain and stress components, as well as internal force resultants. The accuracy of the proposed theory is validated through comparison with advanced beam theories that account for transverse shear deformation. The results demonstrate that the proposed theory provides reliable predictions while reducing computational complexity. Furthermore, the applicability of the theory is demonstrated through representative numerical examples, confirming its effectiveness for the practical design and analysis of structures. The obtained results indicate that the proposed theory can improve the accuracy of engineering calculations, particularly in the analysis of thick beams and complex beam systems.

Keywords: refined beam theory; structural analysis; transverse displacement; longitudinal stress; transverse shear stress; thick beams; analytical solutions.

АРҚАЛЫҚТАРДЫҢ ІІЛУ ТЕОРИЯЛАРЫН НАҚТЫЛАУ: КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЕСЕПТЕУДІҢ ЖЕҢІЛДЕТІЛГЕН ӘДІСІ¹*Ахажанов С.Б.*, ²*Касенова А.Н.*, ³*Калданова Б.О.*¹*Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қарағанды, Қазақстан*²*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан*³*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан*** Автор-корреспондент e-mail: kasenova.aigerim@mail.ru***Авторлар туралы ақпарат:****Ахажанов С.Б.** - Қолданбалы механика және робототехника, Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қарағанды, Қазақстан. E-mail: akhazhanov.S@karnu-buketov.edu.kz**Касенова А.Н.** - Құрылыс кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: kasenova.aigerim@mail.ru**Калданова Б.О.** - Құрылыс кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: b.kaldanova@ttu.edu.kz

Аңдатпа. Бұл зерттеуде euler-bernoulli және тимошенко теориялары сияқты классикалық модельдердің шектеулерін жою мақсатында арқалықтардың нақтыланған теориясы әзірленді. Аталған классикалық модельдер көбінесе көлденең ығысу деформациясын және айналмалы инерция әсерлерін ескермейді. Бұл әсерлер қалың арқалықтарды немесе заманауи материалдардан жасалған арқалықтарды талдау кезінде ерекше маңызды. Ұсынылған теория көлденең қимасы тұрақты тікбұрышты пішінді, сызықтық серпімділі, біртекті және изотропты материалды қарастырады. Классикалық euler-bernoulli теориясының қарапайымдылығы мен кеңінен қолданылатын қағидаларын сақтай отырып, ұсынылған теория арқалықтардың иілуін талдау кезінде жоғары дәлдікті қамтамасыз етеді. Инженерлік есептеулер үшін тәжірибелік әрі тиімді құрал ретінде жеңілдетілген негізгі теңдеу тұжырымдалды. Өртүрлі шекаралық шарттар жағдайындағы қалың изотропты арқалықтар үшін аналитикалық шешімдер алынды. Қарастырылған жағдайларға шарнирлі тірелген, консольді және қатаң бекітілген арқалықтар жатады. Арқалықтарға біркелкі және біркелкі емес жүктемелер әсер етеді. Зерттеуде көлденең жылжулар, деформациялар мен кернеулер компоненттері, сондай-ақ ішкі күштік факторлар үшін айқын өрнектер ұсынылған. Ұсынылған теорияның дәлдігі ығысу деформациясын ескеретін заманауи теориялармен салыстыру арқылы расталды. Нәтижелер ұсынылған теорияның есептеу күрделілігін төмендеті отырып, сенімді нәтижелер беретінін көрсетті. Сонымен қатар, теорияның қолдану мүмкіндігі нақты есептік мысалдар арқылы көрсетіліп, оның конструкцияларды тәжірибелік жобалау мен талдаудағы тиімділігі дәлелденді. Алынған нәтижелер ұсынылған теорияның инженерлік есептеулерде, әсіресе қалың арқалықтар мен күрделі арқалықтық жүйелерді талдау кезінде, конструкцияларды есептеудің дәлдігін арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Түйін сөздер: нақтыланған арқалық теориясы; конструкцияларды талдау; көлденең жылжу; бойлық кернеу; көлденең ығысу кернеуі; қалың арқалықтар; аналитикалық шешімдер.

УТОЧНЕНИЕ ТЕОРИЙ ИЗГИБА БАЛОК: УПРОЩЁННЫЙ МЕТОД РАСЧЁТА КОНСТРУКЦИЙ

¹Ахажанов С.Б., ²Касенова А.Н., ³Калданова Б.О.

¹ Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан

²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

³Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

* Автор-корреспондент e-mail: kasenova.aigerim@mail.ru

Информация об авторах:

Ахажанов С.Б. - Лаборатория прикладной механики и робототехники, Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан. E-mail: akhazhanov.S@karnu-buketov.edu.kz

Касенова А.Н. - Кафедра «Строительство», Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: kasenova.aigerim@mail.ru

Калданова Б.О. - Кафедра «Строительство», Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: b.kaldanova@tttu.edu.kz

Аннотация. В данном исследовании разработана уточнённая теория балок, направленная на устранение ограничений классических моделей, таких как теории Эйлера–Бернулли и Тимошенко. Указанные классические модели зачастую не учитывают деформации поперечного сдвига и эффекты вращательной инерции, которые приобретают особое значение при анализе толстых балок или балок, изготовленных из современных материалов. Предлагаемая теория рассматривает линейно-упругий, однородный и изотропный материал балки постоянного прямоугольного поперечного сечения. Сохраняя простоту и широко применяемые принципы классической теории Эйлера–Бернулли, предложенная теория обеспечивает высокую точность при анализе изгиба балок. В качестве практического и эффективного инструмента для инженерных расчётов сформулировано упрощённое основное уравнение. Получены аналитические решения для толстых изотропных балок при различных граничных условиях. Рассмотрены шарнирно опёртые, консольные и жёстко защемлённые балки, находящиеся под действием равномерно и неравномерно распределённых нагрузок. В исследовании представлены явные выражения для определения поперечных перемещений, компонентов деформаций и напряжений, а также внутренних силовых факторов. Точность предложенной теории подтверждена путём сравнения с современными теориями, учитывающими деформации поперечного сдвига. Полученные результаты показали, что предложенная теория обеспечивает надёжные результаты при снижении вычислительной сложности. Кроме того, применимость теории продемонстрирована на конкретных расчётных примерах, что подтверждает её эффективность для практического проектирования и анализа конструкций. Полученные результаты показывают, что предложенная теория может быть использована для повышения точности инженерных расчётов конструкций, особенно при анализе толстых балок и сложных балочных систем.

Ключевые слова: уточнённая теория балок; анализ конструкций; поперечное перемещение; продольное напряжение; касательное напряжение поперечного сдвига; толстые балки; аналитические решения.

ЖАЛПЫ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеуде қалың изотропты арқалықтардың иілуін есептеуге арналған нақтыланған арқалық теориясы әзірленді. Теория негізінде жеңілдетілген негізгі теңдеу алынып, әртүрлі шекаралық шарттар мен жүктемелер үшін аналитикалық шешімдер ұсынылды. Көлденең жылжу, деформация, кернеу және ішкі күштік факторларды анықтауға арналған өрнектер алынды. Ұсынылған теорияның дәлдігі қолданыстағы ығысу деформациясын ескеретін теориялармен салыстыру арқылы тексерілді.

КІРІСПЕ

Арқалықтардың иілуін талдау құрылыс механикасы мен инженерлік жобалаудың негізгі аспектілерінің бірі болып табылады және әртүрлі жүктеме жағдайларындағы арқалықтардың мінез-құлқын түсінудің негізін құрайды. Euler-Bernoulli және Тимошенко модельдері сияқты классикалық теориялар ұзақ уақыт бойы иілу механикасын талдаудың сенімді негізін қамтамасыз етіп келеді [1–2]. Алайда бұл теориялар көлденең ығысу деформациясы мен айналмалы инерция әсерлерін ескермеу сияқты бірқатар жеңілдетуші болжамдарға негізделген. Бұл модельдер иілгіш арқалықтар үшін тиімді болғанымен, аталған шектеулер оларды қалың арқалықтарға немесе күрделі механикалық қасиеттері бар материалдарға қолдану мүмкіндігін төмендетеді. Осыған байланысты анағұрлым жетілдірілген модельдерді әзірлеу қажеттілігі туындайды.

Осы мәселелерді шешу үшін зерттеушілер жоғары ретті ығысу деформациясы теорияларын (HSDT) әзірледі. Бұл модельдер классикалық теориялардың бастапқы болжамдарынан асып, көлденең ығысу деформациясының әсерін дәлірек ескеру үшін қосымша мүшелерді қамтиды. Осы бағыттағы маңызды жетістіктерге Levinson [3], Shames және т.б. [4], Rehfield және Murty [5], Krishna Murty [6], Baluch, Azad, және Khidir [7], сондай-ақ Bhimaraddi and Chandrashekhara [8] ұсынған параболалық ығысу деформациясы теориялары жатады. Бұл теорияларда қалыңдық координатасы бойынша бойлық жылжулардың нақтыланған таралуы енгізіледі, соның нәтижесінде арқалықтың жоғарғы және төменгі беттерінде жанама кернеулердің нөлге тең болу шекаралық шарттары автоматты түрде қанағаттандырылады. Осыған байланысты ығысуға түзету коэффициенттерін қолдану қажеттілігі жойылып, арқалықтың деформациясын модельдеудің анағұрлым дәл тәсілі қамтамасыз етіледі.

Қалың немесе қысқа арқалықтарды талдау кезінде көлденең ығысу деформациясын ескерудің маңызы айқын байқалады. Иілгіш арқалықтармен салыстырғанда ығысу деформациясының әсері иілулердің едәуір артуына, орнықтылықты жоғалтудың қауіпті жүктемелерінің төмендеуіне және меншікті тербеліс жиіліктерінің азаюына әкелуі мүмкін. Бұл әсерлерді сандық бағалау үшін өлшемсіздендіруді қолдану маңызды, бұл Shimpri және т.б. [9] еңбегінде атап өтілген. Сонымен қатар, [10–12] зерттеулерінде деформацияның өзгеруін дәл болжауда көлденең ығысудың маңызды рөлі көрсетілген. Бірінші ретті

ығысу деформациясы теорияларының шектеулерін еңсеру мақсатында зерттеушілер жоғары ретті ығысу деформациясының көптеген теорияларын әзірледі [13–15]. Бұл теориялар арқалықтардың деформациясын дәлірек бағалауға мүмкіндік береді, алайда көбінесе қосымша басқарушы теңдеулер мен белгісіз функцияларды енгізуді талап етеді, нәтижесінде есептеу шығындары артады. Wang және т.б. [16] мұндай модельдердің күрделілігі олардың тәжірибелік қолданылуына кедергі келтіруі мүмкін екенін атап өтіп, дәлдік пен есептеу тиімділігі арасындағы тепе-теңдікті сақтаудың маңыздылығын көрсеткен.

Осы бағытты дамыта отырып, Ghugal және Sharma [17] статикалық және динамикалық талдау үшін гиперболалық ығысу деформациясы теориясын ұсынды, ал Ghugal және Dahake [18] және басқа зерттеушілер [19–20] әртүрлі жүктеме және бекіту жағдайларындағы иілу мінез-құлқын талдау үшін тригонометриялық модельдерді қолданды. Бұл әзірлемелер бұрынғы модельдердің шектеулерін еңсерудегі маңызды қадам болып табылады. Осы салаға елеулі үлес қосқан Canales және Mantari [21] әртүрлі шекаралық шарттар жағдайында қалың изотропты тікбұрышты арқалықтардың статикалық иілуін зерттеудің аналитикалық тәсілін әзірледі. Шекаралық үзілісті Фурье қатарларын ығысу деформациясы теорияларымен біріктіру арқылы олар кернеулер мен жылжулардың шешімдерін алды. Алайда олардың жұмысында кейбір аспектілер, атап айтқанда, қатаң бекітілген ұштардағы иілу және көлденең ығысу кернеулерінің таралуы толық зерттелмеген, бұл аталған тәсілді одан әрі жетілдіру мүмкіндігін көрсетеді.

Ghugal және Shimpri [22] және Sayyad және Ghugal [23] жүргізген кешенді шолулар ғылыми әдебиеттерде шарнирлі тірелген арқалықтар үшін Навье типті тұйық аналитикалық шешімдердің басым екенін көрсетеді. Қатаң бекітілген ұштары немесе арнайы жүктеме жағдайлары бар арқалықтарға арналған аналитикалық шешімдер әлі де шектеулі, бұл осы бағытта зерттеулерді жалғастыру және жаңа тәсілдерді әзірлеу қажеттілігін көрсетеді. Сонымен қатар, көлденең жылжуларды жеке құрамдастарға бөлу сияқты балама әдістемелер де ұсынылған. [24–25] зерттеулерінде динамикалық есептер үшін инерциялық байланысқан, ал статикалық есептер үшін ажыратылған екі басқарушы теңдеуден тұратын жүйе ұсынылған. Осыған ұқсас тәсілдер [26–29] еңбектерінде де қарастырылып, ығысу деформациясына байланысты есептерді шешуге жаңа көзқарас ұсынады. Ығысу әсерінен болатын шектеуге төзімді ақырлы элементтерді әзірлеуге де айтарлықтай зерттеулер жүргізілді [30–31]. Соңғы зерттеулер [32–39] ығысу деформациясы теорияларының үздіксіз дамып келе жатқанын көрсетіп, олардың заманауи конструкциялық талдаудағы өзектілігін айқындайды. Бұл жетістіктер зерттеу бағытының белсенді дамуын қамтамасыз етеді, өйткені ғалымдар қолданыстағы модельдерді үнемі жетілдіріп, олардың күрделі инженерлік есептерге қолдану аясын кеңейтуде.

Болашақ зерттеулерде бұл жеңілдетілген теорияны қолдану аясын кеңейтуге болады. Ол серпімділігі негіздегі арқалықтардың мінез-құлқын талдау үшін

берік негіз болып табылады [40–42]. Оны қолдану есептеу тиімділігін сақтай отырып, негіздің қаттылығын және арқалық пен негіздің өзара әрекеттесу әсерлерін ескеру сияқты күрделі конструкциялық мәселелерді шешуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, теорияны біртекті емес негіздер немесе динамикалық жүктеме жағдайлары сияқты күрделі жағдайларды зерттеуге бейімдеуге болады.

Бұл жұмыстың мақсаты – классикалық теорияның кемшіліктерін ескеретін нақтыланған теорияны әзірлеу және негізгі тәуелділіктерді қарапайым әрі тәжірибелік түрде, инженерлік есептеулерде іске асыруға ыңғайлы түрде ұсыну. Теориялық тұжырымдар тікбұрышты көлденең қимасы бар жазық элементтер үшін жүргізілді. Алайда геометриялық сипаттамаларды өзгерту арқылы ұсынылған теорияны көлденең қимасы кез келген пішіндегі элементтерге қолдануға болады. Қатаң бекітілген шекаралық шарттары бар арқалықтардың статикалық иілуіне арналған аналитикалық шешімдер алынды. Ұсынылған теорияның тиімділігін көрсету мақсатында ығысу деформациясы ескерілетін изотропты тікбұрышты арқалықтардың статикалық иілуіне арналған есептік мысалдар келтірілді. Сандық нәтижелер басқа нақтыланған теориялар негізінде алынған нәтижелермен салыстырылды. Бұл ұсынылған тәсілдің дәлдігі мен сенімділігін растауға мүмкіндік береді.

ТЕОРИЯНЫҢ НЕГІЗГІ БОЛЖАМДАРЫ

Ұсынылған модельдің теориялық тұжырымдамасының негізінде жатқан болжамдар төмендегідей:

1) 1-суретте көрсетілген қарастырылып отырған арқалық $0 - x_1 - x_2 - x_3$ декарттық координаталар жүйесінде орналасқан және келесі аумақты қамтиды:

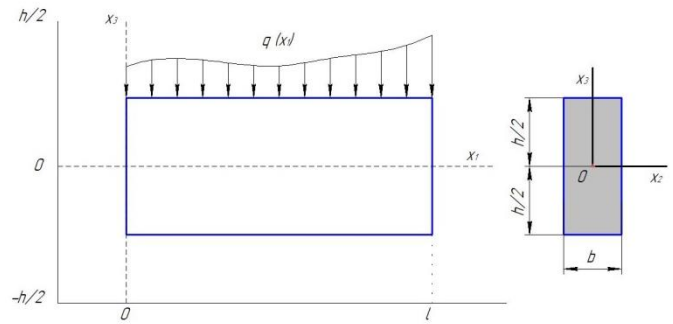
$$0 \leq x_1 \leq l, -\frac{b}{2} \leq x_2 \leq \frac{b}{2}, -z \leq x_3 \leq z, z = \frac{h}{2}$$

мұндағы, x_1, x_2 және x_3 декарттық координаталар, ал l және b сәйкесінше x_1 - және x_2 бағыттарындағы арқалықтың ұзындығы мен ені. x_3 өсі бойындағы арқалықтың қалыңдығы h арқылы белгіленеді.

2) Арқалық біртекті, сызықтық серпімділі, изотропты материалдан тұрады, ал оған түсірілген жүктемелер статикалық болып табылады және арқалықтың ұзындығы бойымен біркелкі немесе біркелкі емес таралады.

3) Арқалықтың шекаралық шарттары $x_1=0$ және $x_1=l$, шеттерінде беріледі, мұнда вариациялық тұрғыдан келісілген шекаралық шарттар қолданылады.

4) x_3 өсі бойындағы деформациялар мен кернеулердің таралуы берілген заңдылықтарға сәйкес өзгереді және нақтыланған арқалық теориясының қағидаларымен сәйкестікті қамтамасыз етеді.



1-Сурет. Арқалықтың геометриясы және координаттар жүйесі.

5) Көлденең ығысу деформациясы берілген функцияға сәйкес өзгереді, бұл оның қалыңдық координатасына тәуелділігін ескеруге мүмкіндік береді.

6) Көлденең жылжулар U_1 компоненті созылу немесе сығылу деформациясына ұшырамайды, бұл арқалықтың осьтік жұмыс істеу сипатын сақтауды қамтамасыз етеді.

ҚОЛДАНЫСТАҒЫ ТЕОРИЯ: ЖЫЛЖУ ФУНКЦИЯСЫ, ДЕФОРМАЦИЯЛАР, КЕРНЕУЛЕР, КӨЛДЕНЕҢ ҚИМАНЫҢ ИІЛУ МОМЕНТІ ЖӘНЕ КӨЛДЕНЕҢ КҮШ

Теорияны әзірлеу

Нақты қойылымдағы кернеулік-деформациялық күй серпімділік теориясының келесі қатынастары арқылы анықталады [1, 2]:

- Кернеу компоненттері арқылы өрнектелген тепе-теңдік теңдеулері:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{13}}{\partial x_3} + X = 0, \quad \frac{\partial \tau_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_3}{\partial x_3} + Z = 0, \quad (1)$$

мұндағы σ_1, σ_3 сәйкес координаталық осьтер

бойымен бағытталған қалыпты кернеулер; X_1, X_3, τ_{13} сәйкес осьтерге перпендикуляр жазықтықтарда әсер ететін жанама кернеулер, X, Z координаталық бағыттар бойымен әсер ететін көлемдік күштердің компоненттері. Кинематикалық қатынастар (Коши):

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial U_1}{\partial x_1}, \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial U_3}{\partial x_3}, \quad \gamma_{13} = \frac{\partial U_1}{\partial x_3} + \frac{\partial U_3}{\partial x_1}, \quad (2)$$

мұндағы $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ сызықтық деформациялар, ығысу деформациялар, ал U_1, U_3 - x_1, x_3 сәйкес координаталық осьтер бойындағы жылжулар компоненттері. Физикалық қатынастар (Гук заңы):

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu \sigma_3), \quad \varepsilon_3 = \frac{1}{E}(\sigma_3 - \nu \sigma_1), \quad (3)$$

$$\gamma_{13} = \frac{\tau_{13}}{G}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

мұндағы E серпімділік модулі, және ν Пуассон коэффициенті. Бұл теория кернеулер мен жылжулардың интегралдық сипаттамаларына негізделген

$$\begin{aligned}
M &= \int_{-z}^z \sigma_1 x_3 dx_3, \quad Q = \int_{-z}^z \tau_{13} dx_3, \\
M_\sigma &= \int_{-z}^z \sigma_3 x_3 dx_3, \quad N = \int_{-z}^z \sigma_1 dx_3, \\
N_\sigma &= \int_{-z}^z \sigma_3 dx_3, \quad W_0 = \frac{1}{h} \int_{-z}^z U_3 dx_3, \\
\theta &= \frac{U_1^+ - U_1^-}{h} = \frac{12}{h^3} \int_{-z}^z U_1 \cdot x_3 \cdot dx_3,
\end{aligned} \quad (4)$$

мұндағы M_σ , N_σ қалыпты кернеуінен σ_3 туындайтын иілу моменті мен бойлық күш, N бойлық күш, W_0 , θ қалыпты жылжу және көлденең қиманың бұрылу бұрышы, U_1^+ , U_1^- тиісінше $U_1(x_1, x_3)$ $x_3=z$ және $x_3=-z$ осьтрі бойындағы көлденең жылжулар

(1) теңдеуін интегралдау және көлемдік күштер болмаған жағдайда (4) қатынасын ескеру арқылы ішкі күштер түріндегі тепе-теңдік теңдеулерін аламыз:

$$\frac{dM}{dx_1} - Q = 0, \quad \frac{dQ}{dx_1} + q = 0, \quad q = \sigma_3|_{-z}^z \quad (5)$$

Осылайша, Гук заңынан (3) және (4) белгілеулерін ескере отырып, келесі өрнектер алынады:

$$\begin{aligned}
M &= EJ \frac{d\theta}{dx_1} + \nu M_\sigma, \quad Q = A(\theta + \frac{dW_0}{dx_1}), \\
J &= \frac{bh^3}{12}, \quad A = Gh,
\end{aligned} \quad (6)$$

мұндағы EJ иілу қатаңдығы, ал A ығысу қатаңдығын білдіреді.

(6) өрнектерін (5) жүйесінің бірінші теңдеуіне қойсақ, келесі өрнекті аламыз:

$$EJ \frac{d^2\theta}{dx_1^2} + \nu \frac{dM_\sigma}{dx_1} - A(\theta + \frac{dW_0}{dx_1}) = 0 \quad (7)$$

(7) теңдеуін операторлық түрде қайта жазуға болады:

$$\begin{aligned}
L(\theta) - \frac{d}{dx_1}(P) &= 0, \\
L(\theta) &= \frac{EJ}{A} \frac{d^2\theta}{dx_1^2} - \theta, \quad P = W_0 - \nu \frac{M_\sigma}{A},
\end{aligned} \quad (8)$$

мұндағы L сызықтық оператор.

(8) теңдеуінің шешімін келесі түрде өрнектеуге болады:

$$\theta = -\frac{dP}{dx_1} \frac{1}{L},$$

Осыдан жылжулар компоненттерін аламыз:

$$P = W - \frac{EJ}{A} \frac{d^2W}{dx_1^2}, \quad \theta = -\frac{dW}{dx_1} \quad (9)$$

(5) жүйесінің екінші теңдеуінен (6) және (9) өрнектерін ескере отырып, $W(x_1)$ функциясын анықтауға арналған негізгі теңдеу алынады:

$$EJ \frac{d^4W}{dx_1^4} = q + \nu \frac{d^2M_\sigma}{dx_1^2} \quad (10)$$

Гук заңының (3) пайдаланылмаған теңдеуін интегралдау және (4) қатынастарын ескеру арқылы келесіні аламыз:

$$U_3^+ + U_3^- = 2W_0 - \frac{2J\nu}{h} \frac{d\theta}{dx_1} + \frac{2(1-\nu^2)}{Eh} M_\sigma \quad (11)$$

Сол заңның тағы бір интегралы келесі түрде жазылады:

$$\begin{aligned}
\int_{-z}^z \varepsilon_3 dx_3 &= \frac{1}{E} \int_{-z}^z (\sigma_3 - \nu \sigma_1) dx_3, \\
U_3^+ - U_3^- &= \frac{1}{E} (N_\sigma - \nu N),
\end{aligned} \quad (12)$$

мұндағы U_3^+ , U_3^- сәйкесінше $U_3(x_1, x_3)$ $x_3=z$ және $x_3=-z$ осьтері бойындағы тік жылжулар.

(11) және (12) өрнектерінен U_3^+ және U_3^- жылжулар анықталады. Классикалық Euler-Bernoulli аркалықтар теориясы шенберінде кернеулерді келесідей көрсетуге болады [1]:

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= \frac{x_3}{J} M, \quad \sigma_3 = \delta(x_3) q, \quad \tau_{13} = \frac{h^2 f(x_3)}{J} Q, \\
f(x_3) &= \frac{1}{8} - \frac{1}{2} \frac{x_3^2}{h^2}, \quad \delta(x_3) = \frac{1}{2} + \frac{3}{2} \cdot \frac{x_3}{h} - 2 \frac{x_3^3}{h^3},
\end{aligned} \quad (13)$$

мұндағы $f(x_3)$ көлденең жанама кернеулердің таралу функциясы, ал $\delta(x_3)$ қалыпты көлденең кернеулердің таралу функциясы. σ_3 кернеуін (13) түрінде қабылдай отырып, келесіні аламыз:

$$M_\sigma = \frac{h^2}{10} \cdot q, \quad N_\sigma = \frac{qh}{2}$$

Жылжулар өрісі:

А Жоғарыда келтірілген болжамдар мен алынған нәтижелер негізінде қарастырылып отырған аркалық теориясындағы жылжулар өрісі келесі түрде анықталады:

$$\begin{aligned}
U_1(x_1, x_3) &= -x_3 \frac{dW}{dx_1} = x_3 \theta, \\
U_3^+(x_1) &= W(x_1) + \frac{J}{h} \left(\nu - \frac{Eh}{A} \right) \frac{d^2 W}{dx_1^2} + \\
&+ \frac{qh^2}{10} \left[\frac{\nu}{A} + \frac{(1-\nu^2)}{Eh} \right] + \frac{qh}{4E}, \\
U_3^-(x_1) &= W(x_1) + \frac{J}{h} \left(\nu - \frac{Eh}{A} \right) \frac{d^2 W}{dx_1^2} + \\
&+ \frac{qh^2}{10} \left[\frac{\nu}{A} + \frac{(1-\nu^2)}{Eh} \right] - \frac{qh}{4E}, \\
W_0(x_1) &= W - \frac{EJ}{A} \frac{d^2 W}{dx_1^2} + \nu \frac{qh^2}{10A}, \quad \theta = -\frac{dW}{dx_1},
\end{aligned} \quad (14)$$

мұндағы $W(x_1)$ иілу функциясы, G арқалық материалының ығысу модулі, q сыртқы жүктеменің қарқындылығы.

Деформацияларға арналған өрнектер

Сызықтық серпімділік теориясы шеңберінде (13) және (14) теңдеулерімен сипатталатын жылжулар өрісінен алынған қалыпты және ығысу деформациялары келесідей өрнектеледі:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= -x_3 \frac{d^2 W}{dx_1^2}, \quad \varepsilon_3 = \frac{(1-\nu)}{E} \delta(x_3) q + \nu x_3 \frac{d^2 W}{dx_1^2}, \\
\gamma_{13} &= \frac{h^2 f(x_3)}{GJ} Q, \quad \gamma_{13}^0 = \frac{1}{h} \int_{-z}^z \gamma_{13} dx_3 = \theta + \frac{dW_0}{dx_1}.
\end{aligned} \quad (15)$$

Кернеулерге арналған теңдеулер

Қалыпты иілу кернеулері мен көлденең ығысу кернеулері (13) және (15) бірлестірімі физикалық тәуелділіктерді пайдалана отырып анықталады және келесідей өрнектеледі:

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= -Ex_3 \frac{d^2 W}{dx_1^2} + \nu \delta(x_3) q, \\
\sigma_3 &= \delta(x_3) q, \quad \tau_{13} = \frac{h^2 f(x_3)}{J} Q
\end{aligned} \quad (16)$$

Қима бойынша иілу моменті көлденең күшке арналған өрнектер

Арқалықтың көлденең қимасындағы иілу моменті мен көлденең күш келесідей анықталады:

$$\begin{aligned}
M &= -EJ \frac{d^2 W}{dx_1^2} + \nu \frac{qh^2}{10}, \\
Q &= -EJ \frac{d^3 W}{dx_1^3} + \frac{\nu h^2}{10} \frac{dq}{dx_1},
\end{aligned} \quad (17)$$

мұндағы M , Q сәйкесінше иілу моменті және көлденең күш.

Негізгі дифференциалдық теңдеу және шекаралық шарттар

(17) теңдеудің екінші теңдеуін (5) теңдеудің екінші теңдеуіне қойып, негізгі теңдеуді аламыз:

$$EJ \frac{d^4 W}{dx_1^4} = q + \frac{\nu h^2}{10} \frac{d^2 q}{dx_1^2} \quad (18)$$

Оған сәйкес келетін үйлесімді табиғи шекаралық шарттар келесі түрде жазылады:

1) Егер арқалықтың ұштары шарнирлі тірелген болса, шекаралық шарттар келесідей болады:

$$W = 0, \quad M = 0 \quad (19)$$

2) Егер арқалықтың ұштары қатаң бекітілген болса, шекаралық шарттар келесідей болады:

$$W = 0, \quad \theta = 0 \quad (20)$$

3) Егер арқалықтың ұштары еркін бекітілген болса, шекаралық шарттар келесідей болады:

$$M = 0, \quad Q = 0 \quad (21)$$

Осылайша, ұсынылған нақтыланған теория арқалықтың кернеулік-деформациялық күйін анықтауға мүмкіндік береді, арқалықтарды классикалық иілу теориясындағы қайшылықтарды жояды және осылайша есептеулерді нақтыланған қойылымда жүргізуге мүмкіндік береді.

Арқалықты есептеу алгоритмі.

Ұсынылған нақтыланған теория бойынша кез келген арқалықты есептеу келесі алгоритм бойынша жүзеге асырылады:

1) Арқалықтың иілу функциясы (18) теңдеуін (19)-(21) теңдеулерінде келтірілген шекаралық шарттардың бірін қанағаттандыру арқылы шешу нәтижесінде анықталады.

2) Жылжулар компоненттері (14) формула бойынша есептеледі.

3) Деформация компоненттері (15) формула бойынша есептеледі.

4) Кернеу компоненттері (16) формула бойынша анықталады.

5) Арқалықтағы ішкі күштер (17) формулаға сәйкес есептеледі.

САНДЫҚ НӘТИЖЕЛЕР

Бұл бөлімде ығысу деформациясын ескеретін изотропты призмалық тікбұрышты арқалықтардың статикалық иілуіне қатысты сандық нәтижелер берілген. Нәтижелер кестелік түрде де, графикалық түрде де ұсынылған.

Арқалық үшін өлшемсіз жылжу W , өлшемсіз бойлық қалыпты кернеу σ_1 , және өлшемсіз көлденең жанама кернеу τ_{13} келесідей анықталады:

$$\bar{W} = \frac{WEJ}{q_0 l^4}, \quad \bar{\sigma}_1 = \frac{\sigma_1 b}{q_0}, \quad \bar{\tau}_{13} = \frac{\tau_{13} b}{q_0} \quad (22)$$

1-3 мысалдар үшін ұсынылған теорияны пайдала отырып, арқалық қалыңдығының оның ұзындығына қатынасының (h/l) әртүрлі мәндері кезінде есептелген $\bar{W}$, $\bar{\sigma}_1$ және $\bar{\tau}_{13}$ үшін сандық нәтижелер 1-7 кестелерде келтірілген. Ұсынылған тәсілдің әсілдің тиімділігін көрсету мақсатында алынған нәтижелер келесі теориялар бойынша алынған сәйкес мәндермен салыстырылады: серпімділік екіөлшемді теориясымен, арқалықтың бірпараметрлі теориясымен, екіпараметрлі теориясымен, Levinson арқалығының теориясымен, Тимошенко арқалығының теориясымен, Euler-Bernoulli арқалығының теориясымен.

1-7-кестелерде және 2-7-суреттерде келтірілген нәтижелерді алу кезінде келесі жағдайлар ескерілді:

1) Пуассон коэффициенті 0.3 деп қабылданады.

2) 1 және 2-мысалдар үшін арқалықтың ұзындығы тұрақты болып $l=1\text{м}$, ал ені $b=1\text{м}$ деп қабылданады. Арқалықтың биіктігі (h) өзгермелі болып, келесі мәндер қабылданады: $h=0.01\text{м}$, $h=0.05\text{м}$, $h=0.10\text{м}$ және $h=0.15\text{м}$. Сәкесінше, арқалық биіктігінің оның ұзындығына қатынасы (h/l) келесі мәндерге тең 0.01, 0.05, 0.10, және 0.15. 3 мысалда арқалықтың биіктігі $h=1\text{м}$ және ені $b=1\text{м}$ тұрақты деп қабылданды. Арқалықтың ұзындығы (l) өзгермелі болып, келесі мәндер қабылданды: $l=4\text{м}$ және $l=10\text{м}$. Сәйкесінше, ұзындықтың қалыңдыққа қатынасы ($S=l/h$) 4 және 10 мәндерге тең деп қабылданды.

3) Levinson арқалығының теориясы мен бірпараметрлі арқалық теориясы негізінде алынған $\bar{W}$, сондай-ақ бірпараметрлі арқалық теориясы негізінде алынған $\bar{\sigma}_1$ және $\bar{\tau}_{13}$ бойынша сандық нәтижелер Shimpri және т.б. еңбегінде келтірілген [9].

4) $\bar{W}$, $\bar{\sigma}_1$, және $\bar{\tau}_{13}$ үшін серпімділіктің екіөлшемді теориясын (жазық кернеулі күй), екіпараметрлі теорияны, Тимошенко арқалығының теориясын және Bernoulli-Euler арқалығының теориясын пайдалана отырып алынған сандық нәтижелер авторлар [37] тарапынан есептелген.

а) Бұл есептеулерді жүргізу үшін кестелерде көрсетілген тиісті әдебиеттерде келтірілген өрнектер пайдаланылды.

б) Тимошенко арқалығының теориясында ығысуға түзету коэффициенті $\sqrt{5/6}$ мәніне тең деп қабылданды.

1-мысал. Біркелкі таралған көлденең жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген арқалық (SS арқалық) Бұл мысалда арқалықтың $x_1=0$ және $x_1=l$ нүктелеріндегі ұштары шарнирлі тірелген. SS арқалығына сәйкес W үшін шекаралық шарттар келесідей болады:

1. Арқалықтың $x_1=0$ ұшындағы шекаралық шарттар:

$$W(0) = 0, \quad M(0) = -EJ \frac{d^2 W}{dx_1^2} + \nu \frac{qh^2}{10} \Big|_{x_1=0} = 0 \quad (23)$$

2. Арқалықтың $x_1=l$ ұшындағы шекаралық шарттар:

$$W(l) = 0, \quad M(0) = -EJ \frac{d^2 W}{dx_1^2} + \nu \frac{qh^2}{10} \Big|_{x_1=l} = 0 \quad (24)$$

1-кесте. 1-мысал үшін өлшемсіз көлденең жылжу ($\bar{W}$) (шарнирлі тірелген арқалық, 1-сурет), ұсынылған теория бойынша есептелген және (h/l) әртүрлі мәндер үшін белгілі нәтижелермен салыстырылған $\nu=0.3$

Теориялар	Өлшемсіз көлденең жылжу кезінде $x=l/2, \bar{W}=WEJ/(q_0 l^4)$			
	(Жақшадағы мәндер пайыздық айырмашылықты көрсетеді)			
	$h/l=0.01$	$h/l=0.05$	$h/l=0.10$	$h/l=0.15$
Ұсынылған	0.01302 (0.00 %)	0.01308 (-0.15 %)	0.01329 (-0.22 %)	0.01364 (-0.37 %)

Bernoulli-Euler [4]	0.01302 (0.00 %)	0.01302 (-0.61 %)	0.01302 (-2.25 %)	0.01302 (-4.89 %)
Тимошенко [4]	0.01302 (0.00 %)	0.01310 (0.00 %)	0.01335 (0.23 %)	0.01375 (0.44 %)
Levinson [9]	0.01302 (0.00 %)	0.01310 (0.00 %)	0.01335 (0.23 %)	-
Бірпараметрлі теория [9]	0.01302 (0.00 %)	0.01310 (0.00 %)	0.01335 (0.23 %)	-
Екіпараметрлі теория [37]	0.01302 (0.00 %)	0.01310 (0.00 %)	0.01335 (0.23 %)	0.01375 (0.44 %)
Серпімділік теориясы [43]	0.01302	0.01310	0.01332	0.01369

2-кесте. 1- мысал үшін өлшемсіз осьтік кернеу ($\bar{\sigma}_1$) ұсынылған теория бойынша есептелген және әртүрлі мәндері үшін қолданыстағы нәтижелермен салыстырылған $\nu=0.3$

Теориялар	Өлшемсіз осьтік кернеу кезінде $x=l/2, z=h/2, \bar{\sigma}_1=(\sigma_1 b)/q_0$			
	(Жақшадағы мәндер пайыздық айырмашылықты көрсетеді)			
	$h/l=0.01$	$h/l=0.05$	$h/l=0.10$	$h/l=0.15$
Ұсынылған	7500.12 (0.00 %)	300.12 (0.00 %)	75.12 (0.00 %)	33.45 (0.00 %)
Bernoulli-Euler [4]	7500.00 (0.00 %)	300.00 (-0.07 %)	75.00 (-0.27 %)	33.33 (-0.60 %)
Тимошенко [4]	7500.00 (0.00 %)	300.00 (-0.07 %)	75.00 (-0.27 %)	33.33 (-0.60 %)
Бірпараметрлі теория [9]	7500.00 (0.00 %)	300.26 (0.02 %)	75.26 (0.08 %)	-
Екіпараметрлі теория [37]	7500.26 (0.00 %)	300.26 (0.02 %)	75.26 (0.08 %)	33.59 (0.18 %)
Серпімділік теориясы [43]	7500.20	300.20	75.20	33.53

3-кесте. 1 -мысал үшін өлшемсіз жанама кернеу ($\bar{\tau}_{13}$) (шарнирлі тірелген арқалық, 1-сурет) ұсынылған теория бойынша есептелген және $\nu=0.3$ қолданыстағы нәтижелермен салыстырылған.

Теориялар	Өлшемсіз жанама кернеу кезінде $x=0, z=h/2, \bar{\tau}_{13}=(\tau_{13} b)/q_0$			
	(Жақшадағы мәндер пайыздық айырмашылықты көрсетеді)			
	$h/l=0.01$	$h/l=0.05$	$h/l=0.10$	$h/l=0.15$
Ұсынылған	75.00 (0.00 %)	15.00 (0.00 %)	7.50 (0.00 %)	5.00 (0.00 %)
Bernoulli-Euler [4]	75.00 (0.00 %)	15.00 (0.00 %)	7.50 (0.00 %)	5.00 (0.00 %)
Тимошенко [4]	50.00 (-33.33 %)	10.00 (-33.33 %)	5.00 (-33.33 %)	3.33 (-33.33 %)
	75.00	15.00	7.50	-

Бірпараметрлі теория [9]	(0.00 %)	(0.00 %)	(0.00 %)	
Екіпараметрлі теория [37]	74.92 (-0.11 %)	14.92 (-0.53 %)	7.42 (-1.07 %)	4.92 (-1.60 %)
Серпімділік теориясы [43]	75.00	15.00	7.50	5.00

2-мысал: Біркелкі таралған көлденеі жүктеме әсеріндегі консольді арқалық (FC арқалық) Бұл мысалда арқалықтың $x_1=0$ нүктесіндегі шеті еркін, ал $x_1=l$ нүктесіндегі шеті қатаң бекітілген. FC – арқалыққа сәйкес W үшін шекаралық шарттар келесідей болады:

1. Арқалықтың $x_1=0$ шетіндегі шекаралық шарттар:

$$M(0) = -EJ \frac{d^2 W}{dx_1^2} + \nu \frac{qh^2}{10} \Big|_{x_1=0} = 0, \quad (25)$$

$$Q(0) = -EJ \frac{d^3 W}{dx_1^3} + \frac{\nu h^2}{10} \cdot \frac{dq}{dx_1} \Big|_{x_1=0} = 0$$

2. Арқалықтың $x_1=l$ шетіндегі шекаралық шарттар:

$$W(l) = 0, \quad \theta = -\frac{dW}{dx_1} \Big|_{x_1=l} = 0 \quad (26)$$

4-кесте. 2-мысал үшін өлшемсіз көлденең жылжу ($\bar{W}$) (консольді арқалық, 1-сурет), ұсынылған теория бойынша анықталған және $\nu=0.3$ үшін қолданыстағы нәтижелермен салыстырылған.

Теориялар	Өлшемсіз көлденең жылжу кезінде $x=0, \bar{W} = WEJ / (q_0 l^4)$			
	(Жақшадағы мәндер пайыздық айырмашылықты көрсетеді)			
	$h/l = 0.01$	$h/l = 0.05$	$h/l = 0.10$	$h/l = 0.15$
Ұсынылған	0.12500 (-0.02 %)	0.12545 (-0.06 %)	0.12690 (-0.13 %)	0.12858 (-0.82 %)
Bernoulli-Euler [2, 4]	0.12500 (-0.02 %)	0.12500 (-0.41 %)	0.12500 (-1.62 %)	0.12500 (-3.58 %)
Timoshenko [3, 4]	0.12501 (-0.01 %)	0.12533 (-0.15 %)	0.12630 (-0.60 %)	0.12793 (-1.32 %)
Levinson [9]	0.12502 (0.00 %)	0.12549 (-0.02 %)	0.12695 (-0.09 %)	-
Бірпараметрлі теория [9]	0.12502 (0.00 %)	0.12549 (-0.02 %)	0.12695 (-0.09 %)	-
Екіпараметрлі теория [37]	0.12501 (-0.01 %)	0.12533 (-0.15 %)	0.12630 (-0.60 %)	0.12793 (-1.32 %)
Серпімділік теориясы [43]	0.12502	0.12552	0.12706	0.12964

5-кесте. 2-мысал үшін өлшемсіз осьтік кернеу ($\bar{\sigma}_1$) (консольді арқалық, 1-сурет) ұсынылған теория бойынша анықталған және $\nu=0.3$ үшін қолданыстағы нәтижелермен салыстырылған.

Теориялар	Өлшемсіз осьтік кернеу кезінде $x=l, z=h/2, \bar{\sigma}_1 = (\sigma_1 b) / q_0$			
	(Жақшадағы мәндер пайыздық айырмашылықты көрсетеді)			
	$h/l = 0.01$	$h/l = 0.05$	$h/l = 0.10$	$h/l = 0.15$

Ұсынылған	-29999.88 (0.00 %)	-1199.88 (0.01 %)	-299.88 (0.03 %)	-133.21 (0.06 %)
Bernoulli-Euler [2, 4]	-30000.00 (0.00 %)	-1200.00 (0.02 %)	-300.00 (0.07 %)	-133.33 (0.15 %)
Тимошенко [3, 4]	-30000.00 (0.00 %)	-1200.00 (0.02 %)	-300.00 (0.07 %)	-133.33 (0.15 %)
Бірпараметрлі теория [9]	-29999.74 (0.00 %)	-1199.74 (-0.01 %)	-299.74 (-0.02 %)	-
Екіпараметрлі теория [37]	-30000.00 (0.00 %)	-1200.00 (0.02 %)	-300.00 (0.07 %)	-133.33 (0.15 %)
Серпімділік теориясы [43]	-29999.80	-1199.80	-299.80	-133.13

6-кесте. 2-мысал үшін өлшемсіз жанама кернеу ($\bar{\tau}_{13}$) (консольді арқалық, 1-сурет) ұсынылған теория бойынша анықталған және $\nu=0.3$ үшін қолданыстағы нәтижелермен салыстырылған.

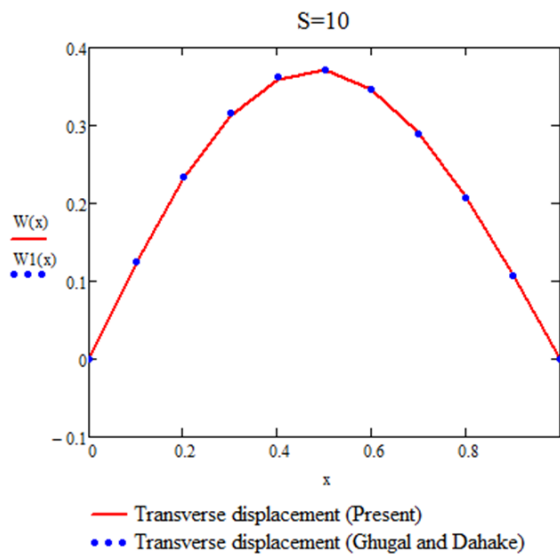
Теориялар	Өлшемсіз жанама кернеу кезінде $x=l, z=0, \bar{\tau}_{13} = (\tau_{13} b) / q_0$			
	(Жақшадағы мәндер пайыздық айырмашылықты көрсетеді)			
	$h/l = 0.01$	$h/l = 0.05$	$h/l = 0.10$	$h/l = 0.15$
Ұсынылған	-150.00 (0.00 %)	-30.00 (0.00 %)	-15.00 (0.00 %)	-10.00 (0.00 %)
Bernoulli-Euler [2, 4]	-150.00 (0.00 %)	-30.00 (0.00 %)	-15.00 (0.00 %)	-10.00 (0.00 %)
Тимошенко [3, 4]	-100.00 (-33.33 %)	-20.00 (-33.33 %)	-10.00 (-33.33 %)	-6.67 (-33.33 %)
Бірпараметрлі теория [9]	-150.00 (0.00 %)	-30.00 (0.00 %)	-15.00 (0.00 %)	-
Екіпараметрлі теория [37]	-149.92 (-0.05 %)	-29.92 (-0.27 %)	14.92 (-0.53 %)	-9.92 (-0.80 %)
Серпімділік теориясы [43]	-150.00	-30.00	-15.00	-10.00

3-мысал: Өзгермелі жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген арқалық. Шарнирлі тірелген арқалық сол жақ тіректен басталып, $x_1=0$ және $x_1=l$, нүктелерінде тіреледі. оның ұзындығы бойымен $q(x_1) = q_0(1 - \frac{x_1}{l})$ өзгермелі жүктеме әсер етеді. W үшін шекаралық шарттар (23) және (24) өрнектерімн анықталады.

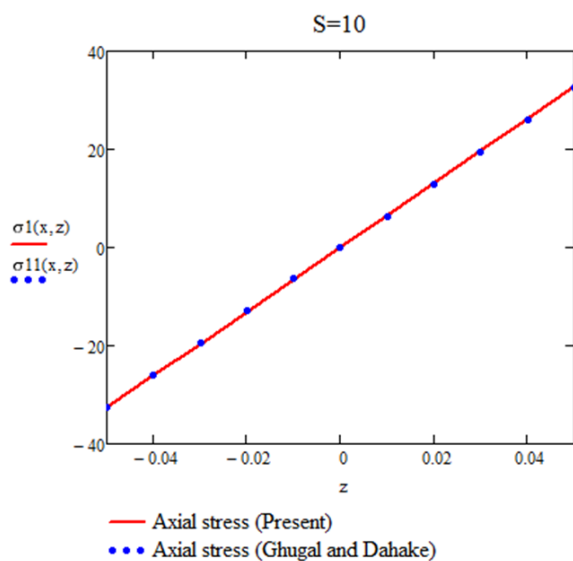
7-кесте. 3-мысал үшін өлшемсіз көлденең жылжу ($\bar{W}$) $x=0.25l, z=0$, сезінде осьтік кернеу ($\bar{\sigma}_1$), $x=0.25l, z=h/2$ кезінде жанама кернеу ($\bar{\tau}_{13}$), $x=0, z=0$ (шарнирлі тірелген арқалық, 1-сурет), ұсынылған теория бойынша есептелген $\nu=0.3$ және үшін қолданыстағы нәтижелермен салыстыру

Дереккөздер	$\bar{W}$		$\bar{\sigma}_1$		$\bar{\tau}_{13}$	
	S=4	S=10	S=4	S=10	S=4	S=10
Ұсынылған	0.6865	0.5979	5.4456	32.7212	2.0000	5.0000
Bernoulli-Euler [4]	0.5811	0.5811	5.2500	32.8125	-	-
Тимошенко [4]	0.6877	0.5981	5.2500	32.8125	0.3452	0.8631
Ghugal және Sharma [17]	0.6870	0.5980	5.4406	33.0032	1.9253	4.9159

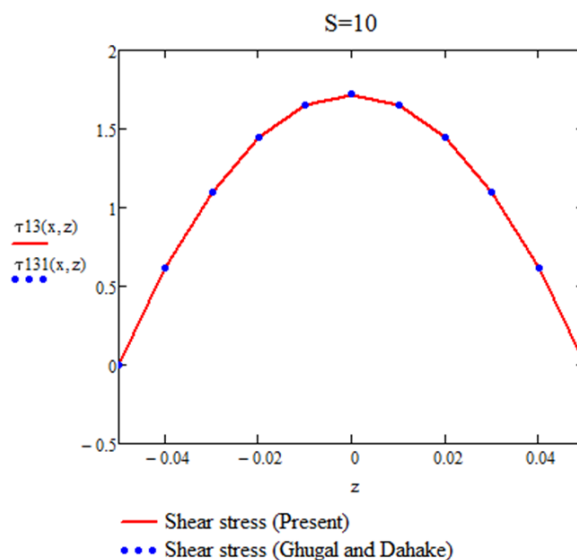
Krishna Murty [6]	0.6867	0.5980	5.4403	33.0029	1.9166	4.7917
Ghugal және Dahake [36]	0.6864	0.5979	5.4517	32.6939	1.9685	5.0646



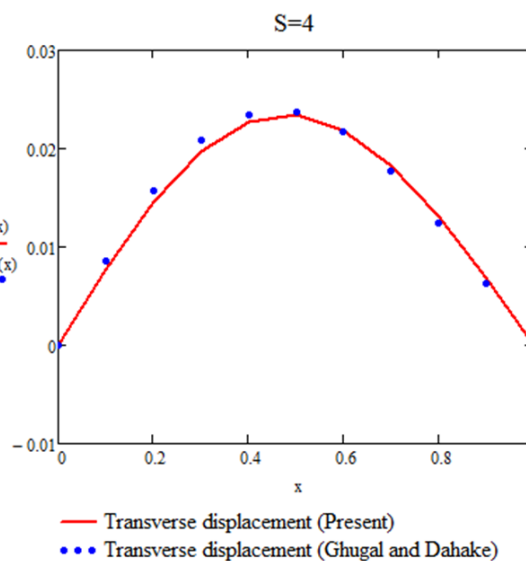
2-Сурет. $S=10$ өлшемдік қатынастағы (3-мысал) өзгермелі жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген арқалықтың $x=0.251$ нүктесінде қалыңдығы бойымен z координатасына байланысты көлденең жылжуларының (W) өзгеруі.



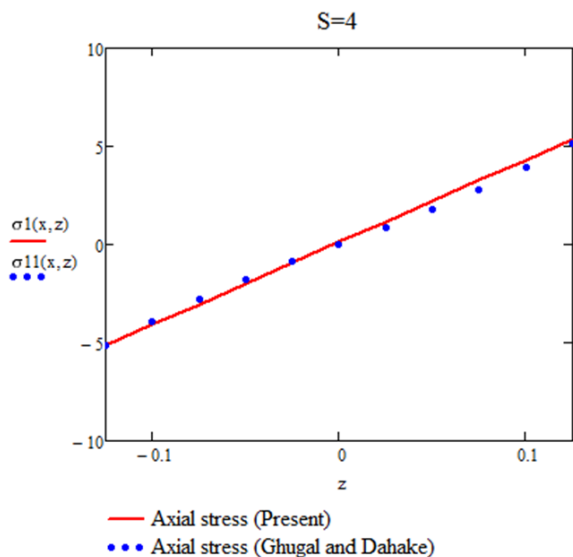
3-Сурет. $S=10$ өлшемдік қатынастағы (3-мысал) өзгермелі жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген арқалықтың $x=0.251$ нүктесінде қалыңдығы бойымен z координатасына байланысты осьтік кернеудің (σ_1) өзгеруі.



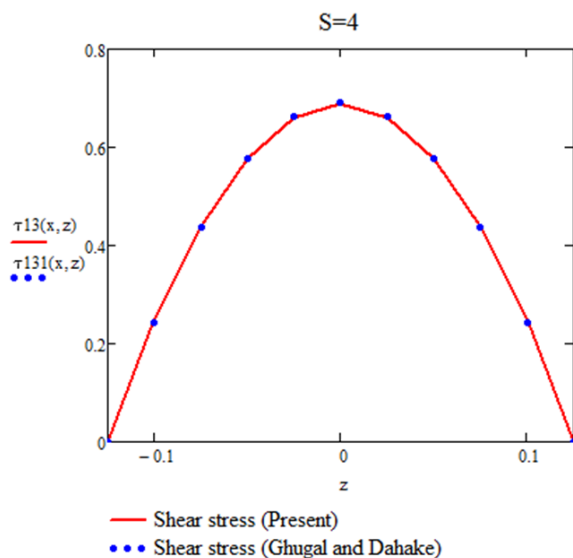
4-Сурет. $S=10$ өлшемдік қатынастағы (3-мысал) өзгермелі жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген арқалықтың $x=0.251$ нүктесінде қалыңдығы бойымен z координатасына байланысты жанама кернеудің (τ_{13}) өзгеруі.



5-Сурет. $S=4$ өлшемдік қатынастағы (3-мысал) өзгермелі жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген арқалықтың $x=0.251$ нүктесінде қалыңдығы бойымен z координатасына байланысты көлденең жылжуының (W) өзгеруі.



6-Сурет. $S=4$ өлшемдік қатынастағы (3-мысал) өзгермелі жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген арқалықтың $x=0.25l$ нүктесінде қалыңдығы бойымен z координатасына байланысты осьтік кернеудің (σ_1) өзгеруі.



7-Сурет. $S=4$ өлшемдік қатынастағы (3-мысал) өзгермелі жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген арқалықтың $x=0.25l$ нүктесінде қалыңдығы бойымен z координатасына байланысты жанама кернеудің (τ_{13}) өзгеруі.

АРҚАЛЫҚТЫҢ СТАТИКАЛЫҚ ИЛУІНІҢ САНДЫҚ НӘТИЖЕЛЕРІН ТАЛҚЫЛАУ

Бұл бөлімде ығысу деформациясын ескеретін изотропты призмалық тікбұрышты арқалықтардың статикалық илуіне қатысты сандық нәтижелерге талдау жүргізіледі (1-3-мысалдар, 1-7-кестелерде және 2-7-суреттерде келтірілген). Қазіргі заманғы арқалық теориялары бойынша жүргізілген соңғы зерттеулер [44] көлденең ығысу деформациясының әсерін жоғары дәлдікпен ескеретін модельдеу әдістерін жетілдіру қажеттілігін көрсетеді.

1–7 кестелерде өлшемсіз көлденең илу $\bar{W}$, өлшемсіз осьтік кернеу $\bar{\sigma}_1$ және өлшемсіз жанама кернеу $\bar{\tau}_{13}$ үшін сандық нәтижелер келтірілген. 1–7-кестелерде өлшемсіз көлденең илу, өлшемсіз осьтік кернеу және өлшемсіз жанама кернеу үшін сандық нәтижелер келтірілген. Бұл нәтижелер шарнирлі тірелген (SS) және консольді (FC, қатаң бекітілген-еркін) арқалықтарға сәйкес келеді. Алынған сандық нәтижелер негізінде келесі тұжырымдар жасауға болады:

1. 1-3 кестелерде келтірілген шарнирлі тірелген SS арқалықтың (1-мысал) сандық нәтижелерін талдау. Ұсынылған теория бойынша есептелген шарнирлі тірелген (SS) арқалық үшін өлшемсіз көлденең илуді $\bar{W}$ анықтаудағы максималды пайыздық айырмашылық -0.37% ($h/l=0.15$ кезінде), өлшемсіз осьтік кернеуді анықтауда $\bar{\sigma}_1$ - 0.00% ($h/l=0.15$ кезінде), ал өлшемсіз

жанама кернеуді анықтауда $\bar{\tau}_{13}$ - 0.00% ($h/l=0.15$ кезінде). Арқалық қалыңдығының оның ұзындығына қатынасының басқа мәндері үшін ($h/l=0.01$, $h/l=0.05$, және $h/l=0.10$), пайыздық айырмашылықтар да өте аз.

2. 4-6 кестелерде келтірілген консольді FC арқалық (2-мысал) сандық нәтижелерін талдау. Ұсынылған теория бойынша есептелген консольді (FC) арқалық үшін өлшемсіз көлденең илуді $\bar{W}$ анықтаудағы максималды пайыздық айырмашылық -0.82% ($h/l=0.15$ кезінде), өлшемсіз осьтік кернеуді анықтауда $\bar{\sigma}_1$ - 0.06% ($h/l=0.15$ кезінде), ал өлшемсіз жанама кернеуді анықтауда $\bar{\tau}_{13}$ - 0.00% ($h/l=0.15$ кезінде). Арқалық қалыңдығының оның ұзындығына қатынасының басқа мәндерінде ($h/l=0.01$, $h/l=0.05$, және $h/l=0.10$), пайыздық айырмашылықтар минималды болып табылады. Бұл шекаралық шарттардың осы түрі жағдайында ығысу деформациясына ұшырайтын арқалықтардың мінез-құлқын сипаттауда ұсынылған теорияның тұрақтылығы мен дәлдігін көрсетеді.

3. Біркелкі емес таралған жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген SS арқалықтың (3-мысал) нәтижелері. Біркелкі емес таралған жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген (SS) арқалықтың нәтижелері 7-кестеде және 2-7-суреттерде келтірілген. Ұсынылған теория бойынша есептелген біркелкі емес таралған жүктеме әсеріндегі шарнирлі тірелген (SS) арқалық үшін және $l/h=10$ кезінде кезінде өлшемсіз көлденең жылжу $\bar{W}$, өлшемсіз осьтік кернеу $\bar{\sigma}_1$ және өлшемсіз жанама кернеу $\bar{\tau}_{13}$ үшін максималды пайыздық айырмашылықтар елеусіз. Бұл нәтижелер өзгермелі жүктеме жағдайында арқалықтардың әрекетін болжау кезінде ұсынылған тәсілдің дәлдігі мен сенімділігін көрсетеді. Шарнирлі тірелген (SS) және консольді (FC) арқалықтар үшін ұсынылған теория бойынша алынған нәтижелер серпімділіктің екіпараметрлі теориясы негізінде алынған дәл шешімдермен өте жақсы сәйкес келеді. Бұл сәйкестік жұқа арқалықтар үшін де, ығысу деформациясы ескерілетін арқалықтар үшін де байқалады. Сонымен қатар, ұсынылған теорияның нәтижелері ығысу деформациясы ескерілетін арқалықтар үшін Levinson арқалығының теориясы, бірпараметрлі арқалық теориясы және екіпараметрлі

теория бойынша алынған сәйкес нәтижелермен жақсы үйлеседі.

Ұсынылған теорияның негізгі ерекшелігі – оның көлденең ығысу деформациясын ескеру мүмкіндігі. Бұл көлденең жанама кернеулерді жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік береді. Бұл кернеулер арқалықтың қалыңдығы бойынша квадраттық заңдылықпен өзгереді және $z=\pm h/2$ беттеріндегі кернеулердің нөлге тең болу шекаралық шарттарын қанағаттандырады. Бұл классикалық теориялармен, атап айтқанда Bernoulli-Eule және Тимошенко теорияларымен салыстырғанда маңызды артықшылық болып табылады. Өйткені аталған теориялар ығысу деформациясын не ескермейді, не оны жеңілдетілген түрде қарастырады, нәтижесінде кернеулерді анықтау дәлдігі төмендейді. Сонымен қатар, ығысуға түзету коэффициентін қолдану қажеттілігінің болмауына байланысты ұсынылған теория ығысу деформациясына ұшырайтын арқалықтарды талдаудың физикалық тұрғыдан негізделген және сенімді әдісін қамтамасыз етеді [45]. Қорытындылай келе, алынған нәтижелер ұсынылған теорияның әртүрлі жүктемелер мен шекаралық шарттар жағдайында жұқа және қалың арқалықтардың мінез-құлқын жоғары дәлдікпен болжау мүмкіндігін көрсетеді. Бұл нәтижелердің серпімділіктің дәл шешімдерімен және басқа да заманауи арқалық теорияларымен жүргізілген салыстырулар арқылы расталуы ұсынылған тәсілдің сенімділігін және практикалық қолдану тиімділігін дәлелдейді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Ұсынылған арқалықтың иілуінің нақтыланған теориясы классикалық тәсілдермен байланысты мәселелерді шешуде маңызды кадам болып табылады. Көлденең ығысу деформациясының әсерін ескеру және ығысуға түзету коэффициенттерін қолданудан бас тарту арқылы бұл теория жоғары дәлдікті және кең қолдану мүмкіндігін қамтамасыз етеді, әсіресе қалың және ығысу деформациясына бейім арқалықтар үшін. Қарапайым әрі үйлесімді түрде тұжырымдалған негізгі теңдеулер шекаралық шарттарды қанағаттандыратын және әртүрлі жүктеме жағдайларын ескеретін дәл шешімдерді алуға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, қолданыстағы нақтыланған теориялармен және серпімділіктің екіпараметрлі теориясы бойынша алынған шешімдермен жүргізілген салыстырмалы талдау ұсынылған теорияның тиімділігін растайды. Сандық мысалдар оның әртүрлі арқалық конструкциялары үшін, соның ішінде шарнирлі тірелген, қатаң бекітілген және консольді арқалықтар үшін, біркелкі және біркелкі емес жүктемелер жағдайында қолдануға болатындығын көрсетеді. Қарапайымдылық, дәлдік және тәжірибелік тиімділіктің үйлесуі ұсынылған теорияның конструкцияларды модельдеу және инженерлік жобалау үдерістерін жетілдірудегі әлеуетін көрсетеді.

Болашақта бұл тәсілдің икемділігі мен сенімділігі одан әрі зерттеулер жүргізуге мүмкіндік береді. Теорияны күрделі геометриялы арқалықтарға, анизотропты материалдарға және динамикалық жүктемелерге кеңейту оның қолдану аясын едәуір кеңейтіп, теориялық әзірлемелер мен нақты инженерлік қолданбалар арасындағы алшақтықты одан әрі азайтуға мүмкіндік береді.

Болашақ зерттеулер шеңберінде неғұрлым күрделі шекаралық шарттарды теориялық модельге енгізу және теорияны тәжірибелік инженерлік есептерге қолдану жоспарланады. Атап айтқанда, көпқабатты жүйелердегі арқалықтарды есептеу, жылулық жүктемелер, сызықтық емес әсерлер және ақауларды талдау мәселелері қарастырылады. Сонымен қатар, серпімділігі негіздегі арқалықтар зерттеліп, негіздің қаттылығының арқалықтың жұмыс істеу сипатына әсері бағаланады, бұл инженерлік жобалау үшін маңызды нәтижелер алуға мүмкіндік береді.

Соңында, конструкциялық элементтердің жобалау сапасы мен пайдалану тиімділігін арттыру мақсатында теориялық модельге оңтайландыру әдістерін енгізу жоспарланады. Бұл ретте алынған шешімдердің нақты инженерлік жобаларда тәжірибелік қолданылу мүмкіндігі қамтамасыз етіледі.

МУДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ

Авторлар осы зерттеу жұмысын орындау және мақаланы дайындау барысында зерттеу нәтижелеріне ықпал етуі мүмкін қандай да бір жеке, кәсіби немесе қаржылық мүдделер қайшылығының болмағанын мәлімдейді.

АВТОРЛАРДЫҢ ҮЛЕСІ

Авторлар зерттеу жұмысының орындалуына елеулі үлес қосты. Авторлардың үлесі зерттеу тұжырымдамасы мен әдістемесін әзірлеуді, есептік міндеттерді қоюды, теориялық және аналитикалық есептеулер жүргізуді, алынған нәтижелерді талдау мен түсіндіруді, оларды қолданыстағы теориялармен салыстыруды, сондай-ақ мақала мәтінін дайындау және редакциялауды қамтыды. Авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Бұл зерттеу жұмысы арнайы қаржыландырусыз орындалды. Зерттеуді жүргізу және мақаланы дайындау барысында мемлекеттік, коммерциялық немесе өзге де ұйымдар тарапынан қаржылық қолдау көрсетілген жоқ.

АЛҒЫС

Авторлар зерттеу жұмысын орындау барысында көрсеткен ғылыми-әдістемелік қолдауы, құнды кеңестері мен зерттеу нәтижелерін талқылауға қосқан үлесі үшін Ахажанов С.Б.-ға шынайы алғысын білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] E. Carrera; G. Giunta, and M. Petrolo, *Beam Structures: Classical and Advanced Theories*. New Delhi, India: A John Wiley and Sons Ltd Publication, 2011, pp. 1-42.
- [2] S.P. Timoshenko, J.N. Goodier, *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, Singapore: Third Int. Ed, 1970

- [3] M. A. Levinson, "New rectangular beam theory," *J. of Sound and Vibration*, vol. 74, pp. 81-87, 1981, [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(81\)90493-4](https://doi.org/10.1016/0022-460X(81)90493-4).
- [4] I.H. Shames, C.L. Dym, *Energy and Finite Element Methods in Structural Mechanics*. Washington, WA, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1985, pp. 185-204.
- [5] L.W. Rehfield, P.L.N. Murthy, "Toward a new engineering theory of bending: fundamentals," *AIAA J.*, vol. 20, no. 5, pp. 693-699, May. 1982, <https://doi.org/10.2514/3.7938>.
- [6] A.V. Krishna Murty, "Towards a consistent beam theory," *AIAA J.*, vol. 22, no. 6, pp. 811-816, Jun. 1984, <https://doi.org/10.2514/3.8685>.
- [7] M.H. Baluch, A.K. Azad, M.A. Khidir, "Technical theory of beams with normal strain," *ASCE J. of Engineering Mechanics*, vol. 110, no. 8, pp. 1233-1237, Aug. 1984, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1984\)110:8\(1233\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1984)110:8(1233)).
- [8] A. Bhimaraddi, K. Chandrashekhara, "Observations on higher order beam Theory," *ASCE J. of Aerospace Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 408-413, Oct. 1993, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(1993\)6:4\(408\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(1993)6:4(408)).
- [9] R.P. Shimpi, R.A. Shetty, A.A. Guha, "Simple Single Variable Shear Deformation Theory for a Rectangular Beam," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 231, pp. 4576-4591, Sept. 2017, <https://doi.org/10.1177/0954406216670682>.
- [10] P.D. Simão, "Influence of Shear Deformations on the Buckling of Columns using the Generalized Beam Theory and Energy Principles," *European Journal of Mechanics - A/Solids*, vol. 61, pp. 216-234, Jan.-Feb. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.09.015>.
- [11] J. Kiendl, F. Auricchio, T.J.R. Hughes, A. Reali, "Single-variable Formulations and Isogeometric Discretizations for Shear Deformable Beams," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 284, pp. 988-1004, Feb. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.11.011>.
- [12] K.S. Saoud, P-Le. Grogne, "An Enriched 1D Finite Element for the Buckling Analysis of Sandwich Beam-columns," *Computational Mechanics*, vol. 57, pp. 887-900, Feb. 2016, <https://doi.org/10.1007/s00466-016-1267-1>.
- [13] Y.-M. Xia, S.-R. Li, Z.-Q. Wan, "Bending Solutions of FGM Reddy–Bickford Beams in Terms of Those of the Homogenous Euler–Bernoulli Beams," *Acta Mechanica Sinica*, vol. 32, no.4, pp. 499 – 516, Jun. 2019, <https://doi.org/10.1007/s10338-019-00100-y>.
- [14] S. Chen, R. Geng, W. Li, "Vibration analysis of functionally graded beams using a higher-order shear deformable beam model with rational shear stress distribution" *Composite Structures*, vol. 277, pp. 114586, Dec. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114586>.
- [15] K. Khorshidi, M. Rezaeisaray, M. Karimi, "Analytical approach to energy harvesting of functionally graded higher-order beams with proof mass," *Acta Mechanica*, vol. 233, no. 20, pp. 4273 – 4293, Sept. 2022, <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03324-1>.
- [16] C.M. Wang, J.N. Reddy, K.H. Lee, *Shear Deformable Beams and Plates*, New York, NY, USA: Relationships with Classical Solutions, Elsevier Science Ltd, 2000, pp. 1-7.
- [17] Y.M. Ghugal, R. Sharma, "A refined shear deformation theory for flexure of thick beams," *Latin Ame. Jl. of Solids and Strucs.*, Vol. 8, no. 2, pp. 183–193, Jun. 2011, <https://doi.org/10.1590/S1679-78252011000200005>.
- [18] Y.M. Ghugal, A.G. Dahake, "Flexure of simply supported thick beams using refined shear deformation theory," *Intl. Jl. of Civ., Envir., Struct., Construct. and Architect. Engg.*, vol. 7, no. 1, pp. 99–108, Jan. 2013,
- [19] A.G. Dahake, Y.M. Ghugal, "A trigonometric shear deformation theory for flexure of thick beam," *Procedia Engg., Elsevier*, vol. 51, no. 8, pp. 1–7, Dec. 2013, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.004>.
- [20] V.A. Jadhav, A.G. Dahake, "Bending analysis of deep beam using refined shear deformation theory," *Intl. Jl. of Engg. Res.*, vol. 5, no. 3, pp. 526–531, Feb. 2016, <https://doi.org/10.17950/ijer/v5i3/003>.
- [21] F.G. Canales, J.L. Mantari, "Boundary discontinuous Fourier analysis of thick beams with clamped and simply supported edges via CUF," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 30, no. 5, pp. 1708-1718, Jul. 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2017.06.014>.
- [22] Y.M. Ghugal, R.P. Shmipi, "A review of refined shear deformation theories for isotropic and anisotropic laminated beams," *Jl. of Reinfor. Plast. and Compos.*, vol. 20, pp. 255–272, Feb. 2001, <https://doi.org/10.1177/073168401772678283>.
- [23] A.S. Sayyad, Y.M. Ghugal, "Bending, buckling and free vibration of laminated composite and sandwich beams: A critical review of literature," *Jl. of Compos. Strucs.*, vol. 171, pp. 486–504, Jul. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.053>.
- [24] R.P. Shimpi, "Refined Plate Theory and Its Variants," *AIAA Journal*, vol. 40, no. 1, pp. 137-146, Jun. 2002, <https://doi.org/10.2514/2.1622>.
- [25] R.P. Shimpi, H.G. Patel, H. Arya, "New First-order Shear Deformation Plate Theories," *ASME Journal of Applied Mechanics*, vol. 74, pp. 523-533, May. 2007, <https://doi.org/10.1115/1.2916894>.
- [26] N. El Meiche, A. Tounsi, N. Ziane, I. Mechab, E.A. Adda Bedia, "A New Hyperbolic Shear Deformation Theory for Buckling and Vibration of Functionally Graded Sandwich Plate," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 53, no. 9, pp. 237-247, May. 2011, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.10.045>.
- [27] T.H. Daouadi, A.H. Henni, A. Tounsi, E.A. Adda Bedia, "A New Hyperbolic Shear Deformation Theory for Bending Analysis of Functionally Graded Plates," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 6, pp. 29, Oct. 2012, <http://dx.doi.org/10.1155/2012/159806>.

- [28] T.H. Daouadji, A. Tounsi, E.A. Adda Bedia, "A New Higher Order Shear Deformation Model for Static Behavior of Functionally Graded Plates," *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 5, pp. 351-364, Jan. 2013, <http://dx.doi.org/10.4208/aamm.11-m11176>.
- [29] R.P. Shimpi, P.J. Guruprasad, K.S. Pakhare, "Single Variable New First-order Shear Deformation Theory for Isotropic Plates," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 15, no. 10, pp. 1-25, Aug. 2018, <https://doi.org/10.1590/1679-78254842>.
- [30] J.N. Reddy, "On Locking-free Shear Deformable Beam Finite Elements," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 149, pp. 113-132, 1997, [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(97\)00075-3](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(97)00075-3).
- [31] M. Ainsworth, K. Pinchedez, "The hp-MITC Finite Element Method for the Reissner–Mindlin Plate Problem," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 148, no. 2, pp. 429-462, Nov. 2002, [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(02\)00560-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(02)00560-5).
- [32] F.G. Canales, J.L. Mantari, "Buckling and Free Vibration of Laminated Beams with Arbitrary Boundary Conditions using a Refined HSDT," *Composites Part B: Engineering*, vol. 100, pp. 136-145, Sept. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.024>.
- [33] A.S. Sayyad, Y.M. Ghugal, N.S. Naik, "Bending Analysis of Laminated Composite and Sandwich Beams According to Refined Trigonometric Beam Theory," *Curved and Layered Structures*, vol. 2, pp. 279-289, Mar. 2015, <https://doi.org/10.1515/cls-2015-0015>.
- [34] A.S. Sayyad, Y.M. Ghugal, P.N. Shinde, "Stress Analysis of Laminated Composite and Soft Core Sandwich Beams using a Simple Higher Order Shear Deformation Theory," *Journal of Serbian Society for Computational Mechanics*, vol. 9, no. 1 pp. 15-35, Jan. 2015, <https://doi.org/10.5937/jsscm1501015S>.
- [35] Y. Boutahar, N. Lebaal, D. Bassir, "A Refined Theory for Bending Vibratory Analysis of Thick Functionally Graded Beams," *Mathematics*, vol. 9, no. 12, pp. 1422, Jun. 2021, <https://doi.org/10.3390/math9121422>.
- [36] Y.M. Ghugal, A.G. Dahake, "Flexure of narrow rectangular deep beams with built-in ends," *Journal of Structural Engineering*, vol. 45, no. 6 pp. 497-511, Feb.-Mar. 2019,
- [37] R.P. Shimpi, P.J. Guruprasad, K.S. Pakhare, "Simple Two Variable Refined Theory for Shear Deformable Isotropic Rectangular Beams," *J. Appl. Comput. Mech.*, vol. 6, no. 3, pp. 394-415, Jul. 2020, <http://dx.doi.org/10.22055/JACM.2019.29555.1615>.
- [38] P. Kumar, A. Kumar, "Bending Analysis of Steel-Concrete Composite Beams with Porosity," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 13, no. 4, pp. 11230–11234, Aug. 2023, <https://doi.org/10.48084/etasr.6050>.
- [39] D.T. Hang, N.X. Tung, D.V. Tu, and N.N. Lam, "Finite Element Analysis of a Double Beam connected with Elastic Springs," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 14, no. 1, pp. 12482–12487, Feb. 2023, <https://doi.org/10.48084/etasr.6489>.
- [40] S. Akhazhanov, N. Omarbekova, A. Mergenbekova, G. Zhunussova, D. Abdykeshova, "Analytical solution of beams on elastic foundation," *International Journal of Geomate*, vol. 73, pp. 193–200, Sept. 2020, <https://doi.org/10.21660/2020.73.51487>.
- [41] S.B. Akhazhanov, N.I. Vatin, S. Nkhmediyev, T. Akhazhanov, O. Khabidolda, A. Nurgoziyeva, "Beam on a two-parameter elastic foundation: Simplified finite element model," *Magazine of Civil Engineering*, vol. 121, no. 5, pp. 1–17, Aug. 2023, <https://doi.org/10.34910/MCE.121.7>.
- [42] S. Akhazhanov, B. Bostanov, A. Kaliyev, T. Akhazhanov, A. Mergenbekova, "Simplified method of calculating a beam on a two-parameter elastic foundation," *International Journal of Geomate*, vol. 25, pp. 33-40, Nov. 2023, <https://doi.org/10.21660/2023.111.3898>.
- [43] B. Venkatraman, S.A. Patel, *Structural Mechanics with Introductions to Elasticity and Plasticity*. New York, NY, USA: McGraw-Hill Book Company, 1970, pp. 158-165.
- [44] E. Carrera, A. Pagani, M. Petrolo, E. Zappino, "Recent developments on refined theories for beams with applications," *Mechanical Engineering Reviews*, vol. 2, pp. 14-00298, 2015, <https://doi.org/10.1299/mer.14-00298>.
- [45] H. Gharehbaghi, A. Farrokhabadi, "Analytical, experimental, and numerical evaluation of mechanical properties of a new unit cell with hyperbolic shear deformable beam theory," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 31, no. 25, pp. 6419–6433, 2023, <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2231441>.

Машина жасау, технологиялық машиналар мен көлік, құрылыс

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/158>

STRATEGY FOR ANTICIPATORY TRAINING OF ENGINEERING PROFESSIONALS AMID DIGITALIZATION AND THE DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

¹Z.A. Muldagaliyev, ^{1*}E.S. Bestembek, ^{1,2}E.Z. Abuov

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

²Burkit International LLP, Atyrau, Kazakhstan

** Corresponding author, e-mail: ye.bestembek@tttu.edu.kz*

Author information:

Z.A. Muldagaliyev - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: z.muldagaliyev@tttu.edu.kz

E.S. Bestembek - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: ye.bestembek@tttu.edu.kz

E.Z. Abuov - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan; Burkit International LLP, Atyrau, Kazakhstan. E-mail: ernar.abuov@mail.ru

Abstract – The acceleration of technological development, the digitalization of production, and the widespread adoption of artificial intelligence are transforming engineering activities and the requirements for professional training. The article substantiates the need to transition from a reactive educational model to a strategy of anticipatory training for engineering professionals. The relationship between the technology life cycle, the period required to update educational programs, the duration of professional training, and the period during which professional competencies remain relevant is considered. A conceptual model is proposed that links the monitoring of technological development, changes in engineers' professional functions, the identification of prospective competencies, the updating of educational content, and feedback from industry. It is shown that anticipatory training should combine a strong foundation in engineering education with the ability of professionals to independently master new technologies and maintain the relevance of their professional competencies. The role of the instructor as an organizer of learning activities and a manager of contemporary knowledge is discussed. The possibilities for the controlled use of artificial intelligence in educational and engineering design activities are considered. An engineering verification principle is proposed for the professional evaluation of AI-generated results, requiring their mandatory verification while maintaining human responsibility for the final engineering decision. The levels for implementing the anticipatory training strategy at a technical university are identified: university, educational program, department, instructor, and student. The proposed provisions are aimed at improving the training of engineering professionals in the context of continuous technological development.

Keywords - anticipatory training, engineering education, digitalization, artificial intelligence, professional competencies, educational program, engineering verification.

ЦИФРАНДЫРУ ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТІНІ ДАМУ ЖАҒДАЙЫНДА ИНЖЕНЕРЛІК КАДРЛАРДЫ ОЗЫҚ ДАЯРЛАУ СТРАТЕГИЯСЫ

¹Мулдағалиев З.А., ^{1*}Бестембек Е.С., ^{1,2}Абуов Е.З.

¹Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

²«Буркит Интернейшл» ЖШС, Атырау, Қазақстан

** Корреспондент автор, e-mail: ye.bestembek@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Мулдағалиев З.А. – Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: z.muldagaliyev@tttu.edu.kz

Бестембек Е.С. – Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: ye.bestembek@tttu.edu.kz

Абуов Е.З. – Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан; «Буркит Интернейшл» ЖШС, Атырау, Қазақстан. E-mail: ernar.abuov@mail.ru

Абстракт – Технологиялық дамудың жеделдеуі, өндірісті цифрландыру және жасанды интеллектінің кеңінен таралуы инженерлік қызметтің мазмұны мен мамандар даярлауға қойылатын талаптарды өзгертуде. Мақалада білім берудің қуып жетуші моделінен инженерлік кадрларды озық даярлау стратегиясына көшу қажеттілігі негізделген. Технологиялардың өмірлік циклі, білім беру бағдарламаларын өзектендіру кезеңі, маман даярлау ұзақтығы және кәсіби құзыреттердің өзектілігін сақтау кезеңі арасындағы өзара байланыс қарастырылған. Технологиялық дамуды мониторингтеуді, инженердің кәсіби функцияларының өзгеруін, перспективалық құзыреттерді айқындауды, білім беру мазмұнын жаңартуды және өнеркәсіппен кері байланысты біріктіретін тұжырымдамалық модель ұсынылған. Озық даярлау іргелі инженерлік білім беруді маманның жаңа технологияларды өз бетінше меңгеру және кәсіби құзыреттерінің өзектілігін сақтау қабілетімен ұштастыруы тиіс екені көрсетілген. Оқытушының танымдық қызметті ұйымдастырушы және заманауи білім менеджері ретіндегі рөлі ашып көрсетілген. Оқу және инженерлік-жобалау қызметінде жасанды интеллектіні бақыланатын түрде қолдану мүмкіндіктері қарастырылған. Жасанды интеллектіні пайдалану арқылы алынған нәтижелерді кәсіби бағалау үшін түпкілікті инженерлік шешімге адамның жауапкершілігін сақтай отырып, нәтижелерді міндетті тексеруді көздейтін инженерлік верификация қағидаты ұсынылған. Техникалық жоғары оқу орнында озық даярлау стратегиясын іске асыру деңгейлері айқындалған: университет, білім беру бағдарламасы, кафедра, оқытушы және білім алушы. Ұсынылған қағидалар үздіксіз технологиялық даму жағдайында инженерлік кадрларды даярлауды жетілдіруге бағытталған.

Кілт сөздер – озық даярлау, инженерлік білім беру, цифрландыру, жасанды интеллект, кәсіби құзыреттер, білім беру бағдарламасы, инженерлік верификация.

СТРАТЕГИЯ ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ И РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

¹Мулдағалиев З.А., ^{1*}Бестембек Е.С., ^{1,2}Абуов Е.З.

¹Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

² ТОО «Буркит интернейшл», Атырау, Казахстан

* Автор-корреспондент e-mail: ye.bestembek@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Мулдағалиев З.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: z.muldagaliyev@tttu.edu.kz

Бестембек Е.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: ye.bestembek@tttu.edu.kz

Абуов Е.З. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. ТОО «Буркит интернейшл», Атырау, Казахстан. E-mail: ernar.abuov@mail.ru

Аннотация – Ускорение технологического развития, цифровизация производства и распространение искусственного интеллекта изменяют содержание инженерной деятельности и требования к подготовке специалистов. В статье обосновывается необходимость перехода от догоняющей модели образования к стратегии опережающей подготовки инженерных кадров. Рассматривается взаимосвязь жизненного цикла технологий, периода актуализации образовательных программ, продолжительности подготовки специалиста и периода актуальности профессиональных компетенций. Предложена концептуальная модель, связывающая мониторинг технологического развития, изменение профессиональных функций инженера, определение перспективных компетенций, обновление содержания образования и обратную связь с промышленностью. Показано, что опережающая подготовка должна сочетать фундаментальность инженерного образования со способностью специалиста самостоятельно осваивать новые технологии и поддерживать актуальность профессиональных компетенций. Раскрывается роль преподавателя как организатора познавательной деятельности и менеджера современных знаний. Рассмотрены возможности контролируемого применения искусственного интеллекта в учебной и инженерно-проектной деятельности. Для профессиональной оценки получаемых с использованием искусственного интеллекта результатов предложен принцип инженерной верификации, предусматривающий их обязательную проверку при сохранении ответственности человека за окончательное техническое решение. Определены уровни реализации стратегии опережающей подготовки в техническом вузе: университет, образовательная программа, кафедра, преподаватель и обучающийся. Предложенные положения ориентированы на совершенствование подготовки инженерных кадров в условиях непрерывного технологического развития.

Ключевые слова – опережающая подготовка кадров, инженерное образование, цифровизация, искусственный интеллект, профессиональные компетенции, образовательная программа, инженерная верификация.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

1. Технологиялық өзгерістердің жеделдеуі технологиялық ортаның дамуы мен инженерлік білім беру мазмұнының жаңартылуы арасындағы сәйкессіздікті күшейтеді, бұл кадрларды қуып жетуші даярлау моделінен озық даярлауға көшудің қажеттілігін айқындайды.

2. Озық даярлау перспективалық технологиялық өзгерістерді, олардың инженердің кәсіби функцияларына ықпалын ескеруді және соған сәйкес құзыреттер мен білім беру мазмұнын өзектендіруді көздейді.

3. Инженерлік білім берудің негізгі нәтижелерінің бірі маманның іргелі білімге, сыни ойлауға және үздіксіз білім алуға сүйене отырып, кәсіби құзыреттерінің өзектілігін өз бетінше сақтай білу қабілеті болуы тиіс.

4. Жасанды интеллект дербес инженерлік ойлау мен қабылданатын техникалық шешімдер үшін адамның жауапкершілігін алмастырмай, оқу және инженерлік-жобалау қызметінің мүмкіндіктерін кеңейтуі тиіс.

КІРІСПЕ

Өнеркәсіп дамуының қазіргі кезеңі технологиялық өзгерістердің жеделдеуімен, өндірістік процестердің цифрландырылуымен, автоматтандыру мен роботтандыру ауқымының кеңеюімен, жасанды интеллект пен интеллектуалды басқару жүйелерінің дамуымен сипатталады. Бұл процестер инженердің кәсіби қызметінің мазмұнын өзгертіп, кадрлар даярлау жүйесіне жаңа талаптар қояды.

XX ғасырдың екінші жартысында-ақ И.И. Артоболевский ғылыми зерттеу нәтижелерін алу мен оларды практикалық қолдану арасындағы уақыттың қысқару үрдісіне назар аударған [1]. Қазіргі жағдайда бұл мәселе ерекше маңызға ие: жекелеген технологиялардың өмірлік циклі жоғары оқу орнында маман даярлау ұзақтығымен шамалас болуы мүмкін. Технологиялық өзгерістердің қарқыны мен білім беру жүйесінің оларды даярлау мазмұнында уақтылы көрсету мүмкіндіктері арасында сәйкессіздік туындайды. Инженерлік білім беру саласындағы зерттеулерде бұл мәселе, атап айтқанда, білім беру бағдарламаларын жаңартудың кәсіби және технологиялық ортадағы өзгерістерден уақыт жағынан кешеуілдеуі ретінде қарастырылады [2].

Осындай жағдайда негізінен қолданыстағы технологияларды меңгеруге бағытталған білім берудің қуып жетуші моделі инженерлік кадрларды

озық даярлау стратегиясымен толықтырылуы тиіс. Мұндай даярлау болашақта пайда болуы мүмкін барлық технологияларды алдын ала меңгеруге ұмтылуды емес, іргелі кәсіби білімді маманның шығармашылық әлеуетін дамыту және жаңа әдістер мен техникалық шешімдерді өз бетінше меңгеру қабілетімен ұштастыруды көздейді.

Бұл міндеттің өзектілігі жасанды интеллектің дамуымен одан әрі арта түседі. Интеллектуалды цифрлық құралдар ақпаратты іздеу мен талдау, модельдеу және техникалық шешімдерді әзірлеу мүмкіндіктерін кеңейтеді, алайда іргелі инженерлік даярлық пен алынған нәтижелерді сыни тұрғыдан бағалау қажеттілігін жоймайды. Сонымен қатар жұмыспен қамту құрылымы мен кәсіби функциялардың трансформациясы маманның өз құзыреттерін үздіксіз жаңартып отыру қабілетінің маңызын арттырады [3].

Қазақстан Республикасы үшін қарастырылып отырған мәселе экономиканы цифрлық трансформациялау және жасанды интеллекті дамыту жөніндегі стратегиялық бағытпен сәйкес келеді. Мемлекет басшысының 2025 жылғы 8 қыркүйектегі Қазақстан халқына Жолдауында экономиканы жаңғырту цифрландырумен, жасанды интеллекті енгізумен және адами капиталдың сапасымен тікелей байланыстырылады [4].

Зерттеудің мақсаты – технологиялық өзгерістердің жеделдеуі, цифрландыру және жасанды интеллектің дамуы жағдайында инженерлік кадрларды озық даярлау стратегиясының тұжырымдамалық ережелерін әзірлеу. Осы мақсатқа қол жеткізу үшін технологиялық және білім беру дамуының өзара байланысы талданады, даярлаудың қуып жетуші және озық модельдері салыстырылады, оқытушы мен білім алушы рөлдерінің өзгеруі қарастырылады және инженерлік кадрларды озық даярлаудың тұжырымдамалық моделі қалыптастырылады.

Зерттеудегі олқылық. Инженерлік білім беру саласындағы заманауи зерттеулер білім беру бағдарламаларын бейімдеп жаңартуды, кәсіби құзыреттердің трансформациясын, үздіксіз білім алуды және жасанды интеллекті қолдануды негізінен жеке бағыттар ретінде қарастырады. Болжамды технологиялық өзгерістерден инженердің кәсіби функцияларын өзгертуге, перспективалық құзыреттерді айқындауға және даярлау мазмұнын жаңартуға көшудің біртұтас механизмі жеткілікті дәрежеде әзірленбеген. Сонымен қатар технологиялық өзгерістер

карқынын маман даярлау ұзақтығымен және оның құзыреттерінің өзектілік кезеңімен үйлестіру мәселесі де одан әрі дамытуды қажет етеді. Даярлаудың іргелілігін, кәсіби ойлаудың дербестігін және техникалық шешім үшін адамның жауапкершілігін сақтай отырып, жасанды интеллектіні инженерлік білім беруге интеграциялау жеке маңызды міндет болып табылады.

Ғылыми жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы инженерлік кадрларды озық даярлаудың тұжырымдамалық негіздерін дамытуда болып табылады.

Технологияның өмірлік циклі, білім беру бағдарламасын өзектендіру кезеңі, маман даярлау ұзақтығы және кәсіби құзыреттердің өзектілік кезеңі арасындағы өзара байланыс негізінде технологиялық және білім беру дамуының сәйкессіздігін талдау тәсілі ұсынылған.

Технологиялық өзгерістерді мониторингтеуді инженердің кәсіби функцияларының трансформациясымен, перспективалық құзыреттерді қалыптастырумен, білім беру мазмұнын өзектендірумен және өнеркәсіппен кері байланыспен байланыстыратын тұжырымдамалық модель әзірленген.

Жасанды интеллектіні қолдану нәтижелерін инженерлік верификациялау қағидаты тұжырымдалған. Бұл қағидат түпкілікті инженерлік шешім үшін адамның жауапкершілігін сақтай отырып, алынған нәтижелерді кәсіби тұрғыдан міндетті тексеруді көздейді.

МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеу теориялық-тұжырымдамалық сипатқа ие және технологиялық өзгерістердің жеделдеуі, цифрландыру және жасанды интеллектінің дамуы жағдайында инженерлік кадрларды озық даярлау стратегиясының ережелерін әзірлеуге бағытталған. Зерттеу материалдары ретінде инженерлік білім беру, ғылыми-техникалық даму, цифрлық трансформация, Industry 4.0 және Industry 5.0, үздіксіз кәсіби білім беру және жасанды интеллектіні қолдану мәселелеріне арналған ғылыми жарияланымдар пайдаланылды. Сонымен қатар білім беруді дамытуға, цифрландыруға және кадрлар даярлауға қатысты халықаралық талдамалық материалдар мен Қазақстан Республикасының стратегиялық құжаттары қарастырылды.

Материалдарды іріктеу және талдау барысында цифрландыру жағдайындағы инженерлік білім берудің трансформациясын көрсететін заманауи зерттеулермен қатар, техникалық прогрестің жеделдеуі, білімнің, адами фактордың және инженердің кәсіби даярлығының рөлі туралы түсініктердің даму эволюциясын зерделеуге мүмкіндік беретін бұрынғы еңбектер де ескерілді.

Зерттеудің әдіснамалық негізін жүйелік, салыстырмалы және ретроспективалық тәсілдер, құрылымдық-функционалдық талдау, ғылыми ақпаратты талдау мен синтездеу және тұжырымдамалық модельдеу құрады. Жүйелік тәсіл инженерлік білім беруді технологиялардың, өнеркәсіптің және кәсіби қызметтің дамуымен өзара байланыста қарастыру үшін қолданылды. Салыстырмалы талдау даярлаудың қуып жетуші және озық модельдері арасындағы айырмашылықтарды анықтау үшін пайдаланылды. Ретроспективалық тәсіл техникалық прогрестің жеделдеуі туралы бұрын қалыптасқан көзқарастарды қазіргі цифрландыру және интеллектуалдандыру процестерімен салыстыруға мүмкіндік берді. Құрылымдық-функционалдық талдау технологиялардағы, кәсіби функциялардағы, құзыреттердегі және даярлау мазмұнындағы өзгерістер арасындағы өзара байланыстарды анықтау үшін қолданылды.

Тұжырымдамалық модельдеу әдісі инженерлік кадрларды озық даярлау құрылымын қалыптастыру және технологиялық даму мен білім беру дамуының өзара байланысын талдау үшін пайдаланылды. Алынған ережелер инженерлік білім беру саласындағы заманауи зерттеулердің нәтижелерімен және өзгермелі технологиялық орта жағдайында мамандар даярлауға қойылатын талаптармен салыстырылды.

Осы зерттеу шеңберінде педагогикалық эксперимент жүргізілген жоқ. Жасанды интеллект құралдарын авторлар эксперименттік білім беру технологиясы ретінде оқу процесіне енгізген жоқ. Оларды қолдану мүмкіндіктері әзірленген тұжырымдамалық модельдің элементі ретінде қарастырылады, ал оны практикалық апробациялау зерттеудің кейінгі кезеңіне жатады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Технологиялық және білім беру циклдерінің өзара байланысы

Жүргізілген талдау технологиялық ортаның дамуы мен инженерлік білім беру мазмұнының

жаңартылуы арасындағы уақыттық сәйкессіздікті кадрларды озық даярлау қажеттілігін айқындайтын факторлардың бірі ретінде анықтауға мүмкіндік берді. Оны тұжырымдамалық тұрғыдан сипаттау үшін өзара байланысты төрт уақыттық компонентті қарастыру ұсынылады: технологияның өмірлік циклі; білім беру бағдарламасын өзектендіру кезеңі; маман даярлау ұзақтығы; қалыптасқан кәсіби құзыреттердің өзектілік кезеңі.

Бұл кезеңдердің ұзақтығы салаға, технология түріне және кәсіби қызметтің сипатына байланысты болғандықтан, олар әмбебап сандық шамалар ретінде қарастырылмайды. Олардың арақатынасы принципті маңызға ие. Технологиялық циклдің қысқаруы жаңа техникалық және цифрлық шешімдердің маманды даярлау кезеңінің өзінде практикалық қолданысқа ену ықтималдығын арттырады, ал білім беру бағдарламасын өзектендіру және жаңартылған мазмұнды меңгеру қосымша уақытты талап етеді.

Туындайтын сәйкессіздікті оқу ақпаратының көлемін ұлғайту немесе жаңа пәндерді үнемі қосу арқылы ғана жою мүмкін емес. Технологиялық даму жеделдеген жағдайда білім беру нәтижесі оқу аяқталған сәтте қалыптасқан құзыреттерді ғана емес, сонымен қатар маманның олардың өзектілігін өз бетінше сақтап, кәсіби қызметтің жаңа тәсілдерін меңгеру қабілетін де қамтуы тиіс. Демек, озық даярлау инженерлік білім берудің іргелілігін маманның кейінгі технологиялық өзгерістерге дайындығымен ұштастыруы қажет.

Даярлаудың қуып жетуші және озық модельдерін салыстыру

Салыстырмалы талдау негізінде инженерлік кадрларды даярлаудың қуып жетуші және озық модельдері арасындағы принципті айырмашылықтар анықталды (1-кесте).

1-кесте – Инженерлік кадрларды даярлаудың қуып жетуші және озық модельдерінің салыстырмалы сипаттамасы

№	Критерий	Қуып жетуші модель	Озық модель
1	Мазмұнды қалыптастыру негізі	Қолданыстағы технологиялар мен кәсіби функциялар	Қолданыстағы және перспективалық технологиялар мен кәсіби функциялар
2	Технологиялық өзгерістерге әрекет ету	Технология кеңінен таралғаннан кейін	Қалыптасып келе жатқан технологиялық үрдістерді мониторингтеу және ескеру
3	Білім беру бағдарламасын өзектендіру	Мерзімді	Жүйелі және бейімделгіш
4	Білім беру нәтижесі	Білім, білік және кәсіби құзыреттер	Іргелі білім, кәсіби құзыреттер және оларды өз бетінше жаңарту қабілеті
5	Білім алушының рөлі	Берілген мазмұнды меңгеру	Жаңа білімді өз бетінше іздеу, талдау және қолдану
6	Оқытушының рөлі	Оқу материалын беру және түсіндіру	Танымдық қызметті ұйымдастыру, білімді іріктеу және өзектендіру
7	Өнеркәсіппен байланыс	Қолданыстағы қажеттіліктерге бағдарлану	Тұрақты кері байланыс және перспективалық қажеттіліктерді анықтау
8	Цифрлық технологиялар	Негізінен оқыту құралдары	Оқыту құралдары және кәсіби ортаның элементтері
9	Жасанды интеллект	Қосымша ақпараттық құрал	Нәтижелерді кәсіби тексеру жағдайында талдау және жобалау қызметінің құралы
10	Өзгерістерге дайындық	Қызмет жағдайлары өзгергеннен кейін бейімделу	Өзгермелі технологиялық ортада қызмет етуге даярлау

Озық модель қолданыстағы технологияларды зерделеуден бас тартуды көздемейді. Оларды меңгеру одан әрі кәсіби дамудың негізіне айналады. Сондықтан дәстүрлі «білу – істей білу» арақатынасын «жаңаны өз бетінше меңгере білу» компонентімен толықтырған орынды. Бұл компонент қолданбалы білімнің өзектілік кезеңі қысқарған жағдайда ерекше маңызға ие болады.

Инженерлік кадрларды озық даярлаудың тұжырымдамалық моделі

Жүйелік және құрылымдық-функционалдық талдау негізінде инженерлік кадрларды озық даярлаудың тұжырымдамалық моделі әзірленді (1-сурет). Оның негізін перспективалық технологиялық өзгерістер туралы ақпаратты инженердің кәсіби функцияларына, құзыреттеріне және даярлау мазмұнына қойылатын талаптарға түрлендіру, сондай-ақ өнеркәсіппен кейінгі кері байланысты қамтамасыз ету құрайды.



1-сурет – Инженерлік кадрларды озық даярлаудың тұжырымдамалық моделі

Модельдің принципті элементі технологияның өзін талдаудан оның кәсіби қызметке әкелетін өзгерістерін бағалауға көшу болып табылады. Бұл ретте болжау болашақ технологияларды дәл анықтауды көздемейді, керісінше, тұрақты үрдістерді және маман функцияларының ықтимал өзгерістерін айқындауға бағытталады. Мысалы, инженерлік операцияны автоматтандыру немесе интеллектуалдандыру кәсіби қызметтің жойылуына емес, оның мазмұнының өзгеруіне әкелуі мүмкін: міндетті қою, цифрлық жүйені баптау, алынған нәтижелерді талдау және тексеру, түпкілікті шешім қабылдау.

Білім беру бағдарламасы технологиялық орта мен маман даярлау арасындағы байланыстырушы элемент ретінде әрекет етеді. Бұл ретте инженерлік білім берудің іргелілігі пәндердің вариативтік

мазмұнын, оқыту әдістерін және жобалық тапсырмаларды уақтылы жаңарту мүмкіндігімен ұштастырылуы тиіс. Өнеркәсіппен кері байланыс модельдің циклдік сипатын қамтамасыз етеді және жабдықтардағы, технологиялардағы, кәсіби функциялардағы өзгерістерді, сондай-ақ түлектер қызметінің нәтижелерін ескеруге мүмкіндік береді.

Оқытушы мен білім алушының рөлі

Озық даярлау моделінде оқытушы білімді кәсіби тұрғыдан іріктеуді, бағалауды және өзектендіруді жүзеге асыратын, пәннің іргелі ережелері, қолданыстағы техникалық шешімдер және саланы дамытудың перспективалық бағыттары арасындағы байланысты қалыптастыратын заманауи білім менеджері ретінде қарастырылады.

Білім алушылардың шығармашылық әлеуетін дамыту берілген материалды негізінен меңгеруден жаңа білімді өз бетінше іздеуге, сыни тұрғыдан бағалауға және қолдануға көшумен байланысты. Бұл ретте ақпараттың қолжетімділігі білімді жай ғана ақпараттанумен алмастыруға әкелмеуі тиіс: болашақ инженер техникалық шешімнің негізінде жатқан заңдылықтарды түсінуі, әдісті таңдауды негіздей білуі, есептеулерді тексеруі және алынған нәтиженің практикалық іске асырылу мүмкіндігін бағалай білуі қажет.

Бұған бірнеше техникалық тұрғыдан мүмкін шешімдерді қарастыруға мүмкіндік беретін және жетіспейтін ақпаратты іздеуді, балама нұсқаларды салыстыруды әрі таңдауды дәлелді негіздеуді талап ететін тапсырмалар ықпал етеді. Осылайша кәсіби білімді үздіксіз жаңарту және нақты инженерлік қызметке барынша жақын жағдайларда міндеттерді шешу қабілеті қалыптасады.

Жасанды интеллект озық даярлаудың элементі ретінде

Ұсынылып отырған модельде жасанды интеллект қазіргі кәсіби ортаның құрамдас бөлігі және сонымен қатар оқу, талдамалық және жобалық қызметтің құралы ретінде қарастырылады. Көлік техникасы бойынша арнайы пәндерден тапсырмаларды, курстық жұмыстар мен жобаларды, ал болашақта дипломдық жұмыстарды (жобаларды) орындау барысында оны бақыланатын түрде қолдану перспективалық бағыт болып табылады.

Жасанды интеллект ғылыми-техникалық ақпаратты іздеу және жүйелеу, техникалық шешімдердің балама нұсқаларын қалыптастыру, бағдарламалау, деректерді өңдеу және конструктивтік нұсқаларды алдын ала салыстыру

үшін қолданылуы мүмкін. Алайда білім алушы қолданылатын заңдылықтарды түсінуі, бастапқы деректер мен есептеулерді тексеруі және таңдалған шешімнің техникалық тұрғыдан іске асырылуы мүмкіндігін өз бетінше негіздей білуі тиіс.

Осы негізде жасанды интеллектіні қолдану нәтижелерін инженерлік верификациялау қағидаты ұсынылды, ол мыналарды қамтиды:

- бастапқы деректер мен техникалық ақпараттың дұрыстығын тексеру;
- алынған нәтиженің физикалық заңдылықтарға сәйкестігін бағалау;
- есептік тәуелділіктерді, өлшем бірліктері мен өлшемділіктерді тексеру;
- шешімнің техникалық тұрғыдан іске асырылу мүмкіндігін бағалау;

- қолданылатын жағдайларда нормативтік-техникалық талаптарға сәйкестігін тексеру;
- түпкілікті инженерлік шешімді өз бетінше негіздеу.

Осылайша, жасанды интеллектіні пайдалану іргелі даярлықты, дербес инженерлік ойлауды және қабылданған шешім үшін жауапкершілікті алмастырмай, білім алушының талдамалық және жобалық мүмкіндіктерін кеңейтуі тиіс.

Техникалық жоғары оқу орнында стратегияны іске асыру механизмі

Озық даярлау стратегиясын іске асыру білім беру жүйесінің бес деңгейінің: университеттің, білім беру бағдарламасының, кафедраның, оқытушының және білім алушының келісілген өзара іс-қимылын талап етеді (2-кесте).

2-кесте – Инженерлік кадрларды озық даярлау стратегиясын іске асыру деңгейлері

Деңгей	Қызметтің негізгі мазмұны
Университет	Технологиялық үрдістерді мониторингтеу; өнеркәсіппен және ғылыми ұйымдармен өзара іс-қимыл жасау; даярлауды бейімдеп жаңарту үшін жағдай жасау
Білім беру бағдарламасы	Кәсіби функциялар мен құзыреттердегі өзгерістерді талдау; даярлау мазмұнын өзектендіру; бағдарламаның вариативтік бөлігін дамыту
Кафедра	Бейінді кәсіпорындармен өзара іс-қимыл жасау; жаңа технологияларды талдау; арнайы пәндердің мазмұнын өзектендіру
Оқытушы	Оқу материалдары мен оқыту әдістерін жаңарту; проблемалық және жобалық міндеттерді қою; білім алушылардың өзіндік қызметін ұйымдастыру
Білім алушы	Іргелі және кәсіби білімді меңгеру; шығармашылық әлеуетті дамыту; ақпаратты өз бетінше іздеу және сыни талдау; жаңа цифрлық құралдарды меңгеру

Озық даярлау сипатын білім беру бағдарламасын мерзімді түрде түзету арқылы ғана қамтамасыз ету мүмкін емес. Өзектендіру жұмыстарының едәуір бөлігі кафедра мен нақты пән деңгейінде жүзеге асырылады және өнеркәсіппен өзара іс-қимылға, сондай-ақ оқытушының жаңа ғылыми және техникалық білімді білім беру процесіне уақтылы енгізу қабілетіне байланысты.

Сонымен қатар мазмұнды жедел жаңарту іргелі даярлықтың тез өзгертін бағдарламалық өнімдер, жабдықтар және цифрлық сервистер туралы ақпаратпен ығыстырылуына әкелмеуі тиіс. Стратегия өзекті кәсіби құзыреттерді түлектің олардың өзектілігін кейіннен өз бетінше сақтай білу қабілетімен ұштастыруды қамтамасыз етуі қажет.

Әзірленген стратегияның негізгі қағидаты: инженерлік білім беру жүйесі маманды қолданыстағы технологияларды пайдалануға ғана

емес, сонымен қатар олардың кейінгі өзгеруі жағдайында кәсіби қызмет атқаруға да даярлауы тиіс.

Технологиялық даму жеделдеген жағдайдағы озық даярлау

Инженерлік кадрларды озық даярлау қажеттілігі қазіргі цифрлық технологиялар мен жасанды интеллектінің таралуымен ғана емес, ғылыми-техникалық дамудың жеделдеуінің неғұрлым жалпы үрдісімен де байланысты. Ғылыми нәтиже алу мен оны өнеркәсіптік игеру арасындағы кезеңнің қысқаруына И.И. Артоболевский назар аударған [1]. XX ғасырдың ортасында-ақ техникалық ғылымдардың дамуы машиналар мен технологиялық процестерді автоматтандырумен өзара байланыста қарастырылды [5]. Қазіргі кезең кешенді цифрландыру, техникалық жүйелерді интеллектуалдандыру және жасанды интеллектіні

дамыту жағдайында осы үрдістің жалғасы болып табылады.

Осы зерттеуде анықталған технологиялық және білім беру циклдері арасындағы сәйкессіздік бұрын сипатталған *time lag dilemma* – инженерлік білім беру бағдарламаларын жаңартудың кәсіби және технологиялық ортадағы өзгерістерден кешеуілдеуі мәселесіне сәйкес келеді [2]. *Curriculum Agility* тұжырымдамасы инженерлік білім берудің мазмұны мен ұйымдастырылуының бейімделгіштігін арттыру арқылы осы бағытты дамытады [6]. Ұсынылған модель бұл тәсілдерді технологиялардың өмірлік циклі, білім беру бағдарламасын өзектендіру, маман даярлау ұзақтығы және оның құзыреттерінің өзектілік кезеңі арасындағы өзара байланысты қарастыру арқылы толықтырады.

Технологиялық өзгерістердің жеделдеуі оқу ақпаратының көлемін үздіксіз арттыру қажеттілігін білдірмейді. Керісінше, іргелі білімнің және маманның кәсіби қызметтің жаңа тәсілдерін өз бетінше меңгеру қабілетінің маңызы арта түседі. Сондықтан білім берудің озық сипаты болашақ технологиялар туралы ақпарат көлемімен емес, инженердің олардың өзгеруі жағдайында қызмет атқаруға дайындығымен айқындалады.

Адами фактор және білім, ғылым мен өнеркәсіптің интеграциясы

Алынған нәтижелер *Technology Atlas* жобасы шеңберінде әзірленген технология туралы жүйелік түсінікпен үйлеседі. Онда технология төрт компоненттің өзара әрекеттесуі ретінде қарастырылады: *Technoware* – жабдықтар мен техникалық құралдар; *Humanware* – адамның білімі, дағдылары, тәжірибесі және шығармашылық мүмкіндіктері; *Inforware* – ақпараттық қамтамасыз ету; *Orgaware* – ұйымдық құрылымдар мен байланыстар [7].

Мұндай түсінік цифрландыру жағдайында ерекше өзектілікке ие. Жабдықтардың, бағдарламалық құралдар мен интеллектуалды жүйелердің дамуы өндірістің технологиялық мүмкіндіктерін кеңейтеді, алайда оларды пайдалану тиімділігі адамның білімі мен кәсіби қабілеттеріне байланысты. Бұл Д. Беллдің постиндустриялық қоғамдағы білім мен ақпараттың рөлінің артуы туралы тұжырымдарымен сәйкес келеді [8]. Қазіргі ақпараттық ортада ақпаратты иеленудің өзі емес, оны білімге және негізделген техникалық шешімге айналдыру қабілеті кәсіби құндылыққа ие болады.

К. Ошима технологиялық инновацияларды білім беру, технологиялар трансфері, зерттеулер, әзірлемелер, коммерцияландыру және жаңа техникалық шешімдерді тарату арасындағы өзара байланыста қарастырған [9]. Мұндай интеграциялық тәсіл университеттің, ғылыми ортаның және өнеркәсіптің тұрақты өзара іс-қимылы қажеттілігін растайды. Озық даярлау кәсіпорындардың қолданыстағы қажеттіліктері туралы ғана емес, сонымен қатар қалыптасып келе жатқан технологиялық бағыттар туралы да ақпарат алуды талап етеді.

Жоғары білім беруді дамытудың заманауи тәсілдері білім беру бағдарламаларын өзектендіру кезінде құзыреттерге деген қажеттіліктерді болжау нәтижелерін пайдалануды да көздейді [10]. Ұсынылып отырған модельде ең алдымен технологиялардағы өзгерістер және солардың әсерінен инженердің кәсіби функцияларының трансформациясы болжау объектісі болып табылады.

Industry 4.0-ден Industry 5.0-ге көшу технологиялық дамудағы адами фактордың маңызын одан әрі күшейтеді. Цифрландыру және автоматтандырумен қатар адамға бағдарланудың, тұрақтылықтың және өндірістік жүйелердің өзгерістерге бейімделу қабілетінің маңызы артады [11]. Демек, инженер цифрлық технологияларды меңгеріп қана қоймай, оларды қолдану нәтижелерін сыни тұрғыдан бағалап, кәсіби шешімдерді өз бетінше қабылдай білуі тиіс.

Инженердің құзыреттері және білімді үздіксіз жаңарту

Industry 4.0 жағдайындағы құзыреттерге арналған заманауи зерттеулер техникалық, цифрлық, талдамалық, басқарушылық және тұлғааралық құрамдастарды үйлестіру қажеттілігін көрсетеді [12]. Industry 5.0 жағдайында технологиялық трансформация барысында адами капиталдың дамуына ықпал ететін білім беру ортасын қалыптастыру қажеттілігі де атап көрсетіледі [13].

Бұл ережелер болашақ инженердің кәсіби өзін-өзі жетілдіруге, зерттеу қызметіне және жаңа технико-технологиялық жүйелерді меңгеруге ұмтылысын қалыптастыру қажеттілігін растайды. Үздіксіз даму қабілеті негізгі даярлық процесінің өзінде қалыптасуы тиіс. *Continuing Engineering Education* саласындағы зерттеулер де инженерлік құзыреттердің өзектілігін сақтауды тұрақты кәсіби білім алумен байланыстырады [14].

Осы тұрғыдан алғанда, болашақ инженердің терең кәсіби білімді студенттік кезеңнен бастап меңгеру қажеттілігі туралы П.С. Осадчийдің тұжырымдары өз маңызын сақтайды [15]. Алайда білім оны практикалық міндеттерді шешуде қолдана білген жағдайда ғана кәсіби құндылыққа ие болады. Іргелі білім мен оны практикалық қолданудың өзара байланысы А. Эйнштейннің ғылыми және өнертапқыштық қызметін қарастыру кезінде де байқалады [16].

Осылайша, инженерлік білім беру фактілерді есте сақтаумен және техникалық жүйелерді сипаттаумен ғана шектелмеуі тиіс. Ақпаратты талдау, себеп-салдарлық байланыстарды анықтау, қолда бар білімнің жеткіліксіздігін өз бетінше айқындау және инженерлік міндеттерді шешудің жаңа әдістерін меңгеру қабілетін қалыптастыру қажет.

Оқытушы заманауи білім менеджері ретінде

Маман даярлау сипатының өзгеруі оқытушының рөлін де өзгертеді. И.И. Артоболевский пән мазмұнын баяндаумен ғана шектелмей, білім алушыларға ғылым мен техниканың тиісті саласындағы негізгі мәселелерді және оның даму бағыттарын көрсету қажеттілігін атап өткен [1].

Қазіргі цифрлық ортада оқытушы білім алушыға қолжетімді ақпараттың негізгі көзі болудан қалады, алайда оның маңызы төмендемейді. Оның қызметі білімді кәсіби тұрғыдан іріктеу мен бағалауға, іргелі ережелерді заманауи техникалық шешімдермен байланыстыруға, инженерлік мәселелерді қоюға және білім алушылардың өзіндік танымдық қызметін ұйымдастыруға бағытталады.

Мұндай тәсіл білім алушылардың шығармашылық әлеуетін дамытумен тікелей байланысты. Жетіспейтін ақпаратты іздеуді, бірнеше нұсқаны талдауды және техникалық шешімді дәлелді түрде таңдауды көздейтін тапсырмалар белгілі алгоритмді қайталаудан дербес инженерлік қызметке көшуге мүмкіндік береді. Бұл жағдайда білім беру жай ғана ақпараттанумен шектелмей, білім кәсіби міндеттерді шешудің құралына айналады.

Инженердің кәсіби даярлығының этикалық қыры да бар. П.С. Осадчий инженердің кәсіби этикасын меңгерген білімінің тереңдігімен байланыстырған [15]. Бұл жасанды интеллектіні пайдалану кезінде ерекше маңызға ие, өйткені маман техникалық шешім үшін жауапкершілікті интеллектуалды жүйеге бере алмайды. Осы тұрғыдан И.И. Артоболевскийдің инженер-механик

біліктілігін өзінің кәсіби бірегейлігінің маңызды құрамдас бөлігі ретінде жоғары бағалауы да назар аударуға тұрарлық [1].

Озық даярлау жүйесіндегі жасанды интеллект

Инженерлік білім беруде жасанды интеллектіні қолдану виртуалды эксперименттік орталарды, білім беру аналитикасын, интеллектуалды оқыту жүйелерін, автоматтандырылған бағалауды және оқу қызметін қолдауды қамтиды [17]. Үлкен тілдік модельдер ақпаратты іздеу және өңдеу, бағдарламалау және жобалық міндеттерді орындауды сүйемелдеу мүмкіндіктерін қосымша кеңейтеді [18].

Алайда педагогикалық әсер жасанды интеллектіні қолдану фактісінің өзімен емес, білім алушының онымен өзара әрекеттесу сипатымен анықталады. Дайын жауапты түсінбей және тексермей пайдалану дербес интеллектуалдық қызметті алмастыруы мүмкін. Керісінше, жасанды интеллектіні балама нұсқаларды іздеу, деректерді талдау және нұсқаларды алдын ала бағалау үшін пайдаланып, кейін нәтижелерді кәсіби тұрғыдан тексеру инженерлік қызметтің мүмкіндіктерін кеңейте алады.

Адамға бағдарланған тәсіл адамның жетекші рөлін, алынатын ақпаратты сыни бағалауды және оны пайдалану үшін жауапкершілікті сақтауды көздейді [19]. Бұл ұсынылған инженерлік верификация қағидатымен үйлеседі: жасанды интеллектіні қолдану арқылы алынған нәтиже бастапқы деректердің дұрыстығы, физикалық заңдылықтарға сәйкестігі, есептеулердің дұрыстығы, техникалық іске асырылу мүмкіндігі және нормативтік талаптарға сәйкестігі тұрғысынан кәсіби тексеруден өтуі тиіс.

Сондықтан көлік техникасының арнайы пәндері бойынша тапсырмаларды, курстық, ал болашақта дипломдық жұмыстарды (жобаларды) орындау кезінде жасанды интеллектіні бақыланатын түрде қолдану перспективалы болып табылады. Бұл ретте білім алушы алынған техникалық шешімді түсіндіріп, оны өз бетінше негіздей білуі тиіс.

Адам мен жасанды интеллектінің өзара әрекеттесу мүмкіндіктері құзыреттілікке бағдарланған инженерлік білім беру бағдарламаларын әзірлеу барысында да қарастырылады [20]. Демек, жасанды интеллект оқу құралы ғана емес, даярлау мазмұнын бейімдеп жаңартуды қолдау құралы ретінде де қолданылуы мүмкін. Бұл ретте түпкілікті кәсіби бағалау адамның құзыретінде қалуы тиіс.

Зерттеудің шектеулері және одан әрі жұмыс бағыттары

Әзірленген модель теориялық-тұжырымдамалық сипатқа ие және қазіргі уақытта педагогикалық апробациядан өткен жоқ. Сондықтан зерттеу нәтижелері ұсынылған стратегияның тиімділігі немесе жасанды интеллектіні пайдаланудың білім алушыларды даярлау сапасына әсері туралы сандық қорытындылар жасауға мүмкіндік бермейді.

Сонымен қатар технологиялардың өмірлік циклінің және құзыреттердің өзектілік кезеңінің ұзақтығы сала мен инженерлік мамандыққа байланысты ерекшеленеді. Ұсынылған уақыттық компоненттердің өзара байланысы жалпы тұжырымдамалық негіз болып табылады және жекелеген білім беру бағдарламалары үшін одан әрі нақтылауды талап етеді.

Зерттеудің келесі кезеңі техникалық бағыттағы мамандарды даярлау кезінде стратегияның жекелеген элементтерін апробациялау, оның ішінде курстық және дипломдық жобалауда жасанды интеллектіні бақыланатын түрде қолдану болуы мүмкін. Бұл ретте білім алушылардың дербестігі, инженерлік негіздеменің сапасы, алынған нәтижелерді тексеру және іргелі білімді жаңа техникалық міндеттерді шешуге қолдану қабілеті бағалау нысаны болуы тиіс.

Модельді одан әрі дамыту тиісті технологиялар кеңінен таралғанға дейін кәсіби функциялар мен құзыреттердегі перспективалық өзгерістерді анықтау мақсатында өнеркәсіптік кәсіпорындармен кері байланысты күшейтуді де көздейді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу келесі қорытындыларды тұжырымдауға мүмкіндік береді.

1. Технологиялық дамудың жеделдеуі, цифрландыру және жасанды интеллектінің таралуы технологиялық ортадағы өзгерістер мен инженерлік білім беру мазмұнының жаңартылуы арасындағы сәйкессіздікті күшейтеді. Мұндай жағдайда қуып жетуші модель инженерлік кадрларды озық даярлау стратегиясымен толықтырылуы тиіс.

2. Озық даярлау технологиялардың өмірлік циклі, білім беру бағдарламасын өзектендіру кезеңі, маман даярлау ұзақтығы және оның кәсіби құзыреттерінің өзектілік кезеңі арасындағы өзара байланысты ескеруді талап етеді.

3. Әзірленген тұжырымдамалық модель технологиялық дамуды мониторингтеуді, инженердің кәсіби функцияларының өзгеруін, перспективалық құзыреттерді қалыптастыруды, білім беру мазмұнын өзектендіруді және өнеркәсіппен кері байланысты өзара байланыстырады. Оны іске асыру білім беру, ғылым және өнеркәсіп орталарының интеграциясын көздейді.

4. Озық даярлау жүйесінде оқытушы білімді іріктеу мен өзектендіруді, іргелі даярлықтың заманауи техникалық шешімдермен байланысын және білім алушылардың өзіндік қызметін ұйымдастыруды қамтамасыз ететін заманауи білім менеджері ретінде әрекет етеді.

5. Инженерлік білім берудің маңызды нәтижесі – түлектің кәсіби құзыреттерінің өзектілігін өз бетінше сақтап, жаңа технологияларды меңгере білу қабілеті. Бұл ретте іргелі даярлық шығармашылық әлеуетті дамыту және жаңа инженерлік міндеттерді шешу үшін айқындаушы маңызын сақтайды.

6. Жасанды интеллектіні дербес инженерлік ойлауды алмастырмайтын оқу және инженерлік-жобалау қызметінің құралы ретінде пайдалану орынды. Ұсынылған инженерлік верификация қағидаты түпкілікті техникалық шешім үшін адамның жауапкершілігін сақтай отырып, жасанды интеллектіні қолдану нәтижелерін кәсіби тұрғыдан тексеруді көздейді.

7. Стратегияны іске асыру университеттің, білім беру бағдарламасының, кафедраның, оқытушының және білім алушының келісілген іс-қимылын талап етеді. Мазмұнды жедел жаңарту даярлаудың іргелілігімен, өнеркәсіппен өзара іс-қимылымен және үздіксіз білім алу қабілетін дамытумен ұштастырылуы тиіс.

8. Әзірленген модель теориялық-тұжырымдамалық сипатқа ие және практикалық апробацияны талап етеді. Одан әрі зерттеудің перспективалық бағыты – білім алушылардың дербестігін, инженерлік негіздеменің сапасын және алынған нәтижелерді кәсіби тұрғыдан тексеру қабілетін бағалай отырып, курстық және дипломдық жұмыстарды (жобаларды) орындау кезінде жасанды интеллектіні бақыланатын түрде қолдану.

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Мулдағалиев З.А. – тұжырымдамалау, әдіснама, нәтижелерді талдау және интерпретациялау, қолжазбаны дайындау және

редакциялау. Бестембек Е.С. – тұжырымдамалау, редакциялау. Барлық авторлар қолжазбаның соңғы зерттеу жүргізу, ғылыми әдебиеттерді талдау, нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады. қолжазбаның бастапқы мәтінін дайындау және оны пысықтау. Абуов Е.З. – әдіснама, нәтижелерді валидациялау, сыни талдау және қолжазбаны

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Академик И. И. Артоболевский: Воспоминания современников. Статьи И. И. Артоболевского: сборник / сост. А. М. Лепихов. – М.: Знание, 1983. – 176 с. Google Книги
- [2] C. J. Desha, K. C. Hargroves, and M. H. Smith, “Addressing the time lag dilemma in curriculum renewal towards engineering education for sustainable development,” *International Journal of Sustainability in Higher Education*, vol. 10, no. 2, pp. 184–199, 2009, doi: 10.1108/14676370910949356.
- [3] World Economic Forum, *The Future of Jobs Report 2025*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum, 2025. ISBN 978-2-940631-90-2.
- [4] Токаев К.-Ж. Казахстан в эпоху искусственного интеллекта: актуальные задачи и их решения через цифровую трансформацию: Послание Главы государства народу Казахстана от 8 сентября 2025 года.
- [5] Благонравов А. А., Артоболевский И. И., Дикущин В. И., Кулебакин В. С. Задачи технических наук в развитии машин и технологических процессов в связи с автоматизацией. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1956. – 33 с. Поиск РГБ
- [6] S. C. Brink, M. de Hei, E. Sjoer, C. J. Carlsson, F. Georgsson, E. Keller, C. McCartan, M. Enelund, R. Lyng, and W. Admiraal, “Curriculum Agility principles for transformative innovation in engineering education,” *European Journal of Engineering Education*, vol. 50, no. 3, pp. 455–471, 2025, doi: 10.1080/03043797.2024.2398165.
- [7] UN ESCAP and Asian and Pacific Centre for Transfer of Technology, *A Framework for Technology-Based Development. Vol. 1: An Overview of the Framework for Technology-Based Development*. New York, NY, USA: United Nations, 1989.
- [8] D. Bell, “The Post-Industrial Society: Expectations for the 1970s and 1980s,” in *The Future of the Corporation*, H. Kahn, Ed. New York, NY, USA: Mason & Lipscomb, 1974, pp. 12–47.
- [9] K. Oshima, “Technological innovation and industrial research in Japan,” *Research Policy*, vol. 13, no. 5, pp. 285–301, 1984, doi: 10.1016/0048-7333(84)90012-X.
- [10] OECD, *Anticipating Skill Needs and Adapting Higher Education: From Insight to Alignment. Getting Skills Right*. Paris, France: OECD Publishing, 2026, doi: 10.1787/827b3ca4-en.
- [11] M. Breque, L. De Nul, and A. Petridis, *Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021, doi: 10.2777/308407.
- [12] W. Rosas Quintero and J. E. Namuche Maldonado, “Competencies of the engineer in Industry 4.0 context: A systematic literature review,” *Production*, vol. 34, Art. no. e20230051, 2024, doi: 10.1590/0103-6513.20230051.
- [13] E. L. Vieira, “Engineering Education in Industry 5.0: Competency Development and Learning Environment Strategies—A Systematic Review,” *ASEAN Journal of Engineering Education*, vol. 8, no. 1, pp. 10–18, 2024, doi: 10.11113/ajee2024.8n1.142.
- [14] J. D. Azofeifa, V. Rueda-Castro, C. Camacho-Zuñiga, G. M. Chans, J. Membrillo-Hernández, and P. Caratozzolo, “Future skills for Industry 4.0 integration and innovative learning for continuing engineering education,” *Frontiers in Education*, vol. 9, Art. no. 1412018, 2024, doi: 10.3389/feduc.2024.1412018.
- [15] Осадчий П. С. К вопросу о принципах профессиональной этики инженеров. – СПб.: Типография А. Бенке, 1911. – 31 с. Поиск РГБ
- [16] Френкель В. Я., Явелов Б. Е. Эйнштейн-изобретатель. – М.: Наука, 1981. – 160 с.
- [17] C. Liu, G.-C. Wang, and H.-F. Wang, “The Application of Artificial Intelligence in Engineering Education: A Systematic Review,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 17895–17910, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3532595.
- [18] S. Filippi and B. Motyl, “Large Language Models (LLMs) in Engineering Education: A Systematic Review and Suggestions for Practical Adoption,” *Information*, vol. 15, no. 6, Art. no. 345, 2024, doi: 10.3390/info15060345.
- [19] F. Miao and W. Holmes, *Guidance for Generative AI in Education and Research*. Paris, France: UNESCO, 2023, doi: 10.54675/EWZM9535.
- [20] A. Padovano and M. Cardamone, “Towards human-AI collaboration in the competency-based curriculum development process: The case of industrial engineering and management education,” *Computers and Education: Artificial Intelligence*, vol. 7, Art. no. 100256, 2024, doi: 10.1016/j.caeai.2024.100256.

REFERENCES

- [1] Akademik I. I. Artobolevskii: Vospominaniya sovremennikov. Stat'i I. I. Artobolevskogo [Academician I. I. Artobolevsky: Memoirs of Contemporaries. Articles by I. I. Artobolevsky], A. M. Lepikhov, comp. Moscow, USSR: Znanie, 1983. (in Russian).
- [2] C. J. Desha, K. C. Hargroves, and M. H. Smith, "Addressing the time lag dilemma in curriculum renewal towards engineering education for sustainable development," *International Journal of Sustainability in Higher Education*, vol. 10, no. 2, pp. 184–199, 2009, doi: 10.1108/14676370910949356. The Australian National University
- [3] World Economic Forum, *The Future of Jobs Report 2025*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum, 2025, ISBN 978-2-940631-90-2. World Economic Forum Reports
- [4] K.-J. Tokayev, "Kazakhstan v epokhu iskusstvennogo intellekta: aktual'nye zadachi i ikh resheniya cherez tsifrovuyu transformatsiyu" [Kazakhstan in the Era of Artificial Intelligence: Current Challenges and Their Solutions through Digital Transformation], Address of the Head of State to the People of Kazakhstan, Sep. 8, 2025. (in Russian). Әділет
- [5] A. A. Blagonravov, I. I. Artobolevskii, V. I. Dikushin, and V. S. Kulebakin, *Zadachi tekhnicheskikh nauk v razvitii mashin i tekhnologicheskikh protsessov v svyazi s avtomatizatsiei* [Tasks of Technical Sciences in the Development of Machines and Technological Processes in Connection with Automation]. Moscow, USSR: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1956. Поиск ПГБ
- [6] S. C. Brink, M. de Hei, E. Sjoer, C. J. Carlsson, F. Georgsson, E. Keller, C. McCartan, M. Enelund, R. Lyng, and W. Admiraal, "Curriculum Agility principles for transformative innovation in engineering education," *European Journal of Engineering Education*, vol. 50, no. 3, pp. 455–471, 2025, doi: 10.1080/03043797.2024.2398165. Tandf Online
- [7] UN ESCAP and Asian and Pacific Centre for Transfer of Technology, *A Framework for Technology-Based Development. Vol. 1: An Overview of the Framework for Technology-Based Development*. New York, NY, USA: United Nations, 1989. ESCAP Repository
- [8] D. Bell, "The Post-Industrial Society: Expectations for the 1970s and 1980s," in *The Future of the Corporation*, H. Kahn, Ed. New York, NY, USA: Mason & Lipscomb, 1974, pp. 12–47. Oxford Futures
- [9] K. Oshima, "Technological innovation and industrial research in Japan," *Research Policy*, vol. 13, no. 5, pp. 285–301, 1984, doi: 10.1016/0048-7333(84)90012-X. ScienceDirect
- [10] OECD, *Anticipating Skill Needs and Adapting Higher Education: From Insight to Alignment. Getting Skills Right*. Paris, France: OECD Publishing, 2026, doi: 10.1787/827b3ca4-en. OECD
- [11] M. Breque, L. De Nul, and A. Petridis, *Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021, doi: 10.2777/308407. Research and innovation
- [12] W. Rosas Quintero and J. E. Namuche Maldonado, "Competencies of the engineer in Industry 4.0 context: A systematic literature review," *Production*, vol. 34, Art. no. e20230051, 2024, doi: 10.1590/0103-6513.20230051. DOI
- [13] E. L. Vieira, "Engineering Education in Industry 5.0: Competency Development and Learning Environment Strategies—A Systematic Review," *ASEAN Journal of Engineering Education*, vol. 8, no. 1, pp. 10–18, 2024, doi: 10.11113/ajee2024.8n1.142. Asean Journal of Engineering Education
- [14] J. D. Azofeifa, V. Rueda-Castro, C. Camacho-Zuñiga, G. M. Chans, J. Membrillo-Hernández, and P. Caratozzolo, "Future skills for Industry 4.0 integration and innovative learning for continuing engineering education," *Frontiers in Education*, vol. 9, Art. no. 1412018, 2024, doi: 10.3389/feduc.2024.1412018. Frontiers
- [15] P. S. Osadchii, *K voprosu o printsipakh professional'noi etiki inzhenerov* [On the Principles of Professional Ethics of Engineers]. St. Petersburg, Russian Empire: Tipografiya A. Benke, 1911. (in Russian). Поиск ПГБ
- [16] V. Ya. Frenkel and B. E. Yavelov, *Einshtein-izobretatel'* [Einstein as an Inventor]. Moscow, USSR: Nauka, 1981. (in Russian). ОМГТУ Библиотека
- [17] C. Liu, G.-C. Wang, and H.-F. Wang, "The Application of Artificial Intelligence in Engineering Education: A Systematic Review," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 17895–17910, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3532595. IEEE Xplore
- [18] S. Filippi and B. Motyl, "Large Language Models (LLMs) in Engineering Education: A Systematic Review and Suggestions for Practical Adoption," *Information*, vol. 15, no. 6, Art. no. 345, 2024, doi: 10.3390/info15060345. MDPI
- [19] F. Miao and W. Holmes, *Guidance for Generative AI in Education and Research*. Paris, France: UNESCO, 2023, doi: 10.54675/EWZM9535. UNESCO Document Database
- [20] A. Padovano and M. Cardamone, "Towards human-AI collaboration in the competency-based curriculum development process: The case of industrial engineering and management education," *Computers and Education: Artificial Intelligence*, vol. 7, Art. no. 100256, 2024, doi: 10.1016/j.caeai.2024.100256.

Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/159>

BLAST FURNACE SLAG IN ROAD CONSTRUCTION: FROM REPLACING NATURAL MATERIALS TO PROPERTY ENGINEERING

¹Kunaev V.A., ²Fathi M.S., ^{3*}Ospanova A.Z.

1 Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

2 Universiti Teknologi Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia

3 Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

**Corresponding author's E-mail: a.ospanova@ttu.edu.kz*

Author information:

Kunaev Vyacheslav Alexandrovich, PhD, Associate Professor, Director of the Department of Science and Innovations, Karaganda Industrial University, Republic Ave., 30, 101400, Temirtau, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8283-7186>, e-mail: v.kunayev@ttu.edu.kz

Fathi Mohamad Syazli, PhD, Associate Professor, Universiti Teknologi Malaysia, Jalan Sultan Yahya Petra, 54100, Kuala Lumpur, Malaysia, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0474-6278>, e-mail: syazli@utm.my

Ospanova Ayaulym Zainullaevna, PhD student, Karaganda Industrial University, Republic Ave., 30, 101400, Temirtau, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0597-1220>, e-mail: a.ospanova@ttu.edu.kz

Abstract - The article presents a systematized analysis of the application of various types of blast furnace slag in road construction, based on scientific publications from 2000 to 2026. It has been established that the efficiency of material use critically depends on its cooling method and subsequent processing. Dump blast furnace slag is predominantly used as an aggregate, whereas ground granulated blast furnace slag serves as a binding component or mineral filler. It is shown that the optimal degree of replacement for natural materials is not a universal value: for cement concretes, the best performance indicators are often achieved when replacing 20-40% of the aggregate, but this applies only to high-quality raw materials. Particular attention is paid to pre-treatment methods for dump blast furnace slag (selective crushing), which allow for reduced water absorption and improved frost resistance. It is demonstrated that in asphalt concretes and road bases, the use of modified slag contributes to increased rutting resistance and bearing capacity. A conclusion is drawn regarding the necessity of transitioning from simple substitution of natural resources to the engineering of slag material properties, including the assessment of the long-term durability of composites based on them.

Keywords - blast furnace slag, road construction, cement concrete, asphalt concrete, aggregate replacement, selective crushing, ground granulated blast furnace slag, dump blast furnace slag.

ДОМНА ПЕШІНІЇ ҚОЖЫ ЖОЛ ҚҰРЫЛЫСЫНДА: ТАБИҒИ МАТЕРИАЛДАРДЫ АЛМАСТЫРУДАН ҚАСИЕТТЕРДІ ИНЖЕНЕРЛЕУГЕ ДЕЙІН

¹Кунаев В.А., ²Fathi M.S., ^{3*}Оспанова А.З.

¹«Қарағанды индустриялық университеті», Теміртау, Қазақстан

²Малайзия технологиялық университеті, Куала-Лумпур, Малайзия

³«Қарағанды индустриялық университеті» ҚЕАҚ, Теміртау, Қазақстан

**Корреспонденттің E-mail: a.ospanova@ttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Кунаев Вячеслав Александрович, PhD, доцент, Ғылым және инновациялар департаментінің директоры, «Қарағанды индустриялық университеті» ҚЕАҚ, Республика даңғылы, 30, 101400, Теміртау, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8283-7186>, e-mail: v.kunayev@ttu.edu.kz

Fathi Mohamad Syazli, PhD, доцент, Малайзия технологиялық университеті, Султан Яхья Петра көшесі, 54100, Куала-Лумпур, Малайзия, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0474-6278>, e-mail: syazli@utm.my

Оспанова Аяулым Зайнуллаевна, докторант, «Қарағанды индустриялық университеті» ҚЕАҚ, Республика даңғылы, 30, 101400, Теміртау, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0597-1220>, e-mail: a.ospanova@tttu.edu.kz

Андатпа – Мақалада 2000 - 2026 жылдар аралығындағы ғылыми жарияланымдар негізінде жол құрылысында домна пешінің қожы әртүрлі түрлерін қолданудың жүйеленген талдауы ұсынылған. Материалды пайдаланудың тиімділігі оны суыту әдісіне және кейінгі өңдеуге сыни тұрғыдан тәуелді екені анықталды. Домна пешінің қож негізінен толтырғыш ретінде қолданылады, ал түйіршіктелген қож байланыстырушы компонент немесе минералдық толтырғыш функциясын атқарады. Табиғи материалдарды алмастырудың оңтайлы дәрежесі әмбебап шама емес екені көрсетілген: цементбетондар үшін ең жақсы көрсеткіштер жиі толтырғыштың 20-40%-ын алмастыру кезінде қол жеткізіледі, бірақ бұл тек сапалы шикізат үшін ғана дұрыс. Домна пешінің қожын алдын ала өңдеу әдістеріне (іріктеп ұсақтау) ерекше назар аударылған, бұл су сіңіруді азайтуға және аязға төзімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Асфальтбетондарда және жол негіздерінде модификацияланған қожты пайдалану із түсуге төзімділік пен жүк көтеру қабілетінің артуына ықпал ететіні дәлелденген. Табиғи ресурстарды қарапайым алмастырудан шлак материалдарының қасиеттерін инженерлеуге, соның ішінде олар негізіндегі композиттердің ұзақ мерзімді төзімділігін бағалауға көшу қажеттілігі туралы қорытынды жасалды.

Кілт сөздер – домендік қож, жол құрылысы, цементбетон, асфальтбетон, толтырғыштарды алмастыру, іріктеп ұсақтау, түйіршіктелген домендік қож, домна пешінің қожы.

ДОМЕННЫЙ ШЛАК В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ОТ ЗАМЕНЫ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ К ИНЖЕНЕРИНГУ СВОЙСТВ

¹Кунаев В.А., ²Fathi M.S. ^{3*}Оспанова А.З.

¹ НАО «Қарағанды индустриальный университет», Теміртау, Қазақстан

²Технологический университет Малайзии, Куала-Лумпур, Малайзия

³НАО «Қарағанды индустриальный университет», Теміртау, Қазақстан

*E-mail корреспондента: a.ospanova@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Кунаев Вячеслав Александрович, PhD, ассоциированный профессор, директор Департамента науки и инноваций, НАО «Қарағанды индустриальный университет», пр. Республики, 30, 101400, Теміртау, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8283-7186>, e-mail: v.kunayev@tttu.edu.kz

Fathi Mohamad Syazli, PhD, ассоциированный профессор, Технологический университет Малайзии, ул. Султан Яхья Петра, 54100, Куала-Лумпур, Малайзия, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0474-6278>, e-mail: syazli@utm.my

Оспанова Аяулым Зайнуллаевна, докторант, НАО «Қарағанды индустриальный университет», пр. Республики, 30, 101400, Теміртау, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0597-1220>, e-mail: a.ospanova@tttu.edu.kz

Аннотация - В статье представлен систематизированный анализ применения различных видов доменного шлака в дорожном строительстве на основе научных публикаций с 2000 по 2026 годы. Установлено, что эффективность использования материала критически зависит от способа его охлаждения и последующей обработки. Отвальный доменный шлак преимущественно применяется как заполнитель, тогда как гранулированный шлак выполняет функции вяжущего компонента или минерального наполнителя. Показано, что оптимальная степень замены природных материалов не является универсальной величиной: для цементных бетонов лучшие показатели часто достигаются при замене от 20 до 40% заполнителя, однако это справедливо только для качественного сырья. Особое внимание уделено методам предварительной обработки отвального доменного шлака (избирательное дробление), которые позволяют снизить водопоглощение и повысить морозостойкость. Продемонстрировано, что в асфальтобетонах и основаниях дорог использование модифицированного шлака способствует росту устойчивости к колееобразованию и несущей способности. Произведен вывод о необходимости перехода от простого замещения природных ресурсов к инженерингу свойств шлаковых материалов, включая оценку долгосрочной долговечности композитов на их основе.

Ключевые слова - доменный шлак, дорожное строительство, цементный бетон, асфальтобетон, замена заполнителей, избирательное дробление, гранулированный доменный шлак, отвальный доменный шлак.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Доменный шлак не является однородным материалом; его функциональное назначение строго определяется способом охлаждения: отвальный доменный шлак служит заполнителем, а гранулированный вяжущим или наполнителем.

Оптимальное содержание шлака в строительных композитах варьируется в зависимости от качества зерен и целевых характеристик; диапазон замены от 20 до 40% является статистически частым, но не универсальным оптимумом.

Предварительная обработка отвального доменного шлака методами избирательного дробления и гидрофобизации существенно улучшает его физико-механические свойства, снижая водопоглощение и повышая сопротивление разрушению.

Перспективным направлением является комплексный подход, сочетающий улучшение качества шлакового заполнителя с модификацией вяжущих систем для обеспечения долговечности дорожных конструкций.

ВВЕДЕНИЕ

Дорожное строительство относится к наиболее ресурсоемким отраслям, потребляющим огромные объемы природных каменных материалов и цемента. Одновременно металлургическая промышленность генерирует значительное количество техногенных отходов, среди которых доменный шлак занимает лидирующие позиции по потенциалу утилизации [1, 2].



Рисунок 1 – отвальный доменный шлак



Рисунок 2 – гранулированный доменный шлак

Использование шлаков позволяет не только решить экологические проблемы накопления отходов, но и снизить углеродный след строительных материалов за счет частичной замены клинкера и природного щебня [3, 4].

Физико-механические характеристики доменного шлака определяются технологией его получения. Медленное остывание на воздухе приводит к образованию кристаллического, часто пористого отвального доменного шлака, используемого в качестве заполнителя.

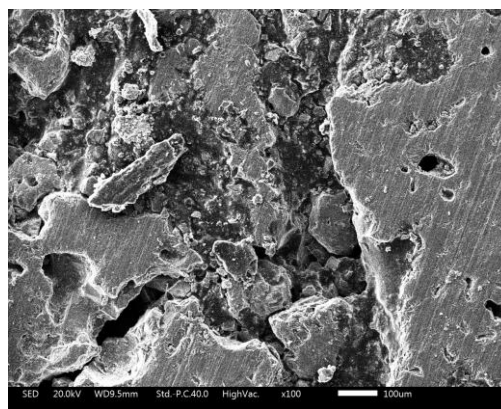


Рисунок 3 – микроструктура отвального доменного шлака x100

Быстрое охлаждение водой формирует стекловидный гранулированный шлак, который после помола проявляет скрытую гидравлическую активность и применяется как добавка к цементу или минеральный порошок в асфальтобетоне [5, 6].

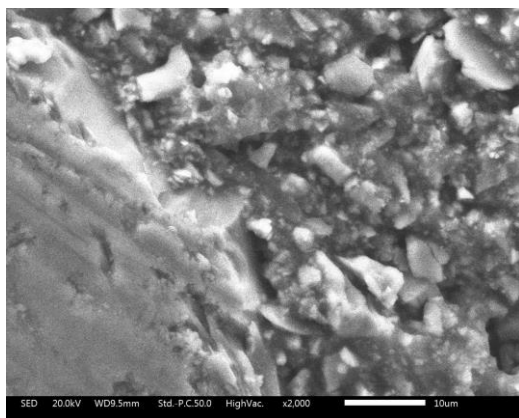


Рисунок 4 - СЭМ-микрофотография гранулированного доменного шлака x2000

Несмотря на обширную исследовательскую базу, прямое сравнение результатов различных авторов затруднено из-за различий в типах шлака, базах расчета дозировок (по массе цемента, заполнителя или вяжущего) и условиях твердения.

Пробел в исследовании. Большинство существующих обзоров фокусируются на поиске «оптимального процента» замены компонентов, игнорируя вариативность качества самого шлака. Недостаточно изучено влияние предварительной обработки (обогащения, гидрофобизации) отвального доменного шлака на долговечность конечных композитов в реальных условиях эксплуатации. Кроме того, отсутствует четкое разграничение между механической функцией шлака как заполнителя и химической ролью как вяжущего в контексте долгосрочной стойкости дорожных одежд. Требуется систематизация данных, связывающая качество исходного сырья и методы его модификации с эксплуатационными характеристиками материалов.

Научная новизна. В отличие от предыдущих работ, данное исследование акцентирует внимание на неоднородности доменного шлака и необходимости дифференцированного подхода к его применению. Впервые в рамках одного обзора сопоставлены эффекты различных методов предобработки отвального доменного шлака (избирательное дробление, обогащение по плотности, гидрофобизация) и их влияние на ключевые параметры дорожного строительства. Обоснована невозможность установления единого универсального оптимума содержания шлака и предложена концепция инжиниринга свойств, где качество заполнителя и состав вяжущей матрицы оптимизируются совместно. Выявлены перспективы использования слабощелочной

активации гранулированного доменного шлака в холодных асфальтобетонах как путь к глубокой декарбонизации.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Химический состав доменных шлаков варьируется в широких пределах в зависимости от сырьевой базы и режима плавки. Основными оксидами являются CaO (29-50%), SiO_2 (27-42%), Al_2O_3 (5-22%) и MgO (до 21%) [7, 8]. Именно соотношение указанных компонентов определяет гидравлическую активность гранулированного доменного шлака, однако для отвального доменного шлака решающую роль играют физическая структура и пористость.

В цементных бетонах отвального доменного шлака используется как крупный или мелкий заполнитель. Исследования показывают, что замена природного щебня на уровне от 20 до 40% часто дает наилучший баланс прочности и долговечности [9, 10]. Однако этот диапазон не абсолютен: в самоуплотняющихся бетонах высокие доли шлака могут снижать прочность без дополнительного уплотнения, тогда как в жестких дорожных бетонах полная замена заполнителя иногда обеспечивает превосходство над контролем по прочности на сжатие [11, 12]. Важным аспектом является пористость зерен: высокое водопоглощение необработанного шлака может негативно сказываться на морозостойкости, что требует либо ограничения дозировки, либо предварительной обработки [13].

Гранулированный доменный шлак как вяжущий компонент эффективно работает при заменах цемента до 30-40%, обеспечивая равнопрочность или превышение показателей контроля в средние и поздние сроки твердения [14, 15]. Более высокие степени замены (50-70%) целесообразны для специальных задач: повышения сульфатостойкости, снижения тепловыделения или улучшения электрохимических характеристик, хотя ранняя прочность при этом снижается [16, 17]. Эффективность высоких дозировок возрастает в тройных системах с микрокремнеземом или известняковым наполнителем, где компоненты синергетически дополняют друг друга [18].

В основаниях дорог и стабилизации грунтов шлак демонстрирует высокие значения Калифорнийского коэффициента несущей способности) CBR (до 153% для выветренного шлака) [19]. Однако высокий CBR не гарантирует стойкости к истиранию; некоторые шлаки имеют

потерю массы в полочном барабане выше нормативных пределов [20]. Это подчеркивает необходимость комплексной оценки, включающей испытания на динамические нагрузки и влагостойкость. Применение гранулированного доменного в составе геополимерных вяжущих для укрепления оснований позволяет сократить расход цемента на 80% и более при сохранении требуемой прочности [21].

В асфальтобетонах отвалный доменный шлак заменяет щебень, а гранулированный доменный шлак заменяет минеральный порошок. Обработка поверхности шлака цементной пастой или использование избирательно дробленых зерен позволяет решить проблему высокого водопоглощения и повысить устойчивость к влаге и колееобразованию [22, 23]. В качестве наполнителя гранулированный доменный шлак показывает оптимальные результаты при дозировках около 3% от массы смеси, улучшая усталостную долговечность и стабильность по Маршаллу [24]. Особый интерес представляют холодные органоминеральные смеси, где гранулированный доменный шлак активируется щелочными растворами, обеспечивая раннюю прочность, сопоставимую с горячими смесями [25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данная работа представляет собой систематический обзор литературы за период с 2000 по 2026 гг. Поиск осуществлялся в базах данных Scopus, Web of Science, ScienceDirect и eLIBRARY.RU по таким ключевым словам как «blast furnace slag», «pavement», «asphalt concrete», «cementitious composites». Из 1120 найденных записей после скрининга и проверки полнотекстовых версий было отобрано 80 релевантных публикаций, содержащих экспериментальные данные.

Для настоящего обзора были выбраны 25 наиболее репрезентативных источников. Анализ проводился по четырем направлениям: шлак в цементном бетоне, в качестве вяжущего, в основаниях дорог и в асфальтобетоне.

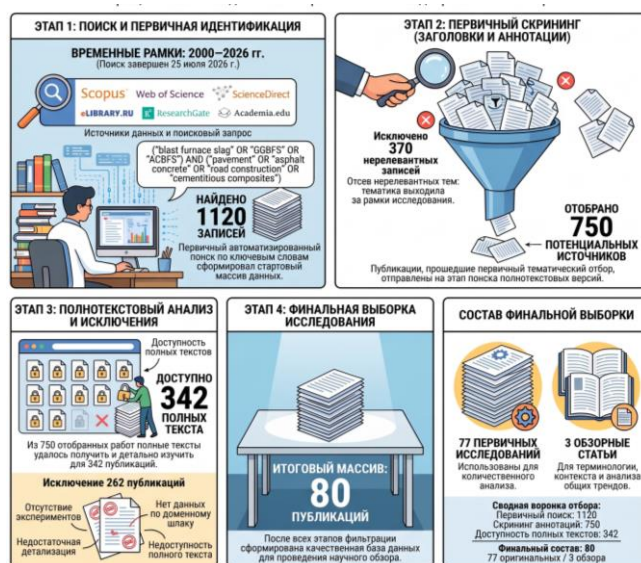


Рисунок 5 - Схема процесса поиска и отбора литературы

Сравнительная оценка выполнялась с учетом типа шлака, базы расчета дозировки и методов предварительной обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Шлак как заполнитель в цементном бетоне.

Анализ данных подтверждает, что реакция бетона на введение шлакового заполнителя носит нелинейный характер. При замене мелкого заполнителя на гранулированный доменный шлак оптимальным часто оказывается уровень 20-30%, при котором наблюдается рост прочности и морозостойкости [10, 12]. Превышение данного порога может приводить к увеличению капиллярной пористости и снижению долговечности. Для крупного заполнителя ситуация сложнее: пористая структура зерен требует тщательного подбора состава смеси. Исследования [9] показали, что 30% замена обеспечивает пик прочности, тогда как в других работах [11] даже 100% замена давала удовлетворительные результаты, но только при условии качественного уплотнения. Критическим фактором является межфазная граница: наличие реакционноспособной пленки на поверхности шлака может улучшать сцепление с цементным камнем, но избыточная пористость создает зоны слабости.

Предварительная обработка как ключевой фактор качества.

Традиционный подход «замены без модификации» исчерпывает себя. Новые данные свидетельствуют о высокой эффективности

обогащения отвального доменного шлака. Избирательное дробление в шаровой мельнице (30-40 мин) позволило снизить водопоглощение с 4,96% до 2,38%, а показатель дробимости с 30,98% до 18,40% [23]. Гидрофобизация дополнительно снижает водопоглощение до ~1%, что открывает возможность использования шлака в зонах переменного увлажнения и замораживания.

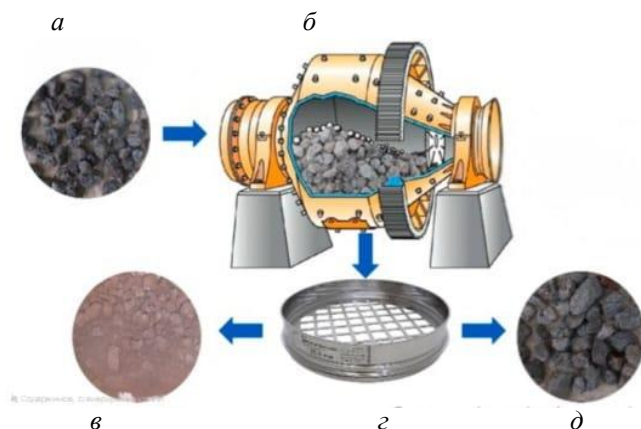


Рисунок 6 – Избирательное дробление доменного шлака: а) доменный шлак до обогащения; б) погружение доменного шлака в шаровую мельницу для избирательного дробления; в) высокопористые частицы (разрушенные избирательным дроблением); г) сито для просеивания; д) низкопористые частицы.

Важно отметить, что улучшение свойств на уровне агрегата должно транслироваться в свойства композита, что требует дальнейших исследований.

Вязущие системы и асфальтобетоны.

Использование гранулированного доменного шлака в качестве вяжущего позволяет существенно снизить углеродный след. В тройных системах (цемент-шлак-микрокремнезем) достигается высокая долговечность и стойкость к хлоридам даже при значительном снижении содержания клинкера [18]. В асфальтобетонах применение гранулированного доменного шлака вместо традиционного минерального порошка (особенно в холодных смесях с щелочной активацией) дает кратный рост модуля упругости и снижение колейности [25]. Однако в горячих смесях избыток

тонкодисперсного шлака (>5%) может ухудшить реологические свойства, поэтому оптимум обычно лежит в районе 3% [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доменный шлак является перспективным, но сложным материалом для дорожного строительства. Его нельзя рассматривать как прямую замену природному сырью без учета специфики формирования структуры. Основные выводы:

1. Функциональное разделение отвального доменного шлака и гранулированного доменного шлака (вяжущее/наполнитель) обязательно.

2. Понятие «оптимальной дозировки» условно и должно привязываться к конкретному типу шлака и целевой характеристике материала.

3. Методы предобработки (избирательное дробление, гидрофобизация) являются необходимым условием для расширения областей применения отвального доменного шлака в ответственных конструкциях.

4. Будущие исследования должны быть направлены на изучение долгосрочной долговечности композитов с модифицированным шлаком и разработку комплексных технологий совместной оптимизации заполнителя и вяжущей матрицы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ВКЛАД АВТОРОВ

Оспанова А.З.: сбор и анализ литературы, визуализация, написание черновика; Кунаев В.А.: концептуализация, методология, научное руководство; Fathi M.S.: формальный анализ, проверка данных; Кенжалиев О.Б.: концептуализация, администрирование; Fathi M.S.: рецензирование и редактирование. Все авторы одобрили финальную версию рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет грантового финансирования Комитета науки МНВО РК (грант № AP22786668).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Liu Z., Feng T., Zhu X., et al. Bird's-eye view of recycled solid wastes in road engineering // Journal of Road Engineering. – 2024. – Vol. 4(2). – P. 93-150.
- [2] Ulyeva G.A., Tuyshan K., Matsugina E.M., et al. Actual progress of production waste disposal problems // Izvestiya Ferrous Metallurgy. – 2025. – Vol. 68(2). – P. 131-138.
- [3] Silva L.H.P., Nehring V., Paiva F.F.G., et al. Use of blast furnace slag in cementitious materials for pavements: Systematic literature review and eco-efficiency // Sustainable Chemistry and Pharmacy. – 2023. – Vol. 33. – Art. 101030.

- [4] Zhuang S., Zhang L., Cao J., et al. Synergistic utilization of high-volume magnesium slag and blast furnace slag in sustainable ternary binders // *Construction and Building Materials*. – 2026. – Vol. 539. – Art. 147469.
- [5] Yasipourtehrani S., Strezov V., Bliznyukov S., Evans T. Investigation of thermal properties of blast furnace slag to improve process energy efficiency // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 149. – P. 137-145.
- [6] Ren Q., Qi W., Zhao Q., et al. Preparation and characterization of low-carbon cementitious materials based on soda-residue-activated ground granulated blast-furnace slag // *Metals*. – 2023. – Vol. 13(4). – Art. 694.
- [7] Kambole C., Paige-Green P., Kupolati W.K., et al. Comparison of technical and short-term environmental characteristics of weathered and fresh blast furnace slag aggregates for road base applications in South Africa // *Case Studies in Construction Materials*. – 2019. – Vol. 11. – Art. e00239.
- [8] Lee J., Lee T. Durability and engineering performance evaluation of CaO content and ratio of binary blended concrete containing ground granulated blast-furnace slag // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10(7). – Art. 2504.
- [9] Kanniyappan S.P., Saravanakumar S. Use of air cooled blast furnace slag as a sustainable material in cement concrete // *International Journal of Innovative Research & Studies*. – 2018. – Vol. 8. – P. 545-558.
- [10] Yüksel I., Bilir T., Özkan Ö. Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate // *Building and Environment*. – 2007. – Vol. 42(7). – P. 2651-2659.
- [11] Vadhera K., Berwal P. Behavior of blast furnace slag in rigid pavement (compressive and splitting tensile strength) // *International Journal of Current Engineering and Technology*. – 2017. – Vol. 7(4). – P. 1490-1495.
- [12] Pawar V.S., Kundlik A., Fatkal G., Kori S. Experimental investigation of granulated blast furnace slag as fine aggregate in concrete // *IRJET*. – 2022. – Vol. 9(5). – P. 302-305.
- [13] Nicula L.M., Corbu O., Ardelean I., et al. Freeze–thaw effect on road concrete containing blast furnace slag: NMR relaxometry investigations // *Materials*. – 2021. – Vol. 14(12). – Art. 3288.
- [14] Deboucha W., Benchaa M., Mouli M., Khadraoui A. Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 108. – P. 254-261.
- [15] Familusi A.O., Adewumi B.E., Oladipo F.I., et al. Effects of blast furnace slag as a partial replacement for cement in concrete // *9th Int. Conf. on Sciences, Engineering and Environmental Technology*. – Nigeria, 2017.
- [16] Lübeck A., Gastaldini A.L.G., Barin D.S., Siqueira H.C. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag // *Cement & Concrete Composites*. – 2012. – Vol. 34(3). – P. 392-399.
- [17] Divsholi B.S., Lim T.Y.D., Teng S. Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2014. – Vol. 8. – P. 157-164.
- [18] Bleszynski R., Matthews J.D., Hooton R.D., Thomas M.D.A. Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag // *ACI Materials Journal*. – 2002. – Vol. 99(5). – P. 499-508.
- [19] Kambole C., Paige-Green P., Kupolati W.K., et al. Comparison of technical and short-term environmental characteristics of weathered and fresh blast furnace slag aggregates for road base applications // *Case Studies in Construction Materials*. – 2019. – Vol. 11. – Art. e00239.
- [20] Rondón H., Fernández W., Patiño D., et al. Characterization of blast furnace slag for road projects // *Revista Ingeniería de Construcción*. – 2018. – Vol. 33(1). – P. 83-92.
- [21] Lang L., Zhu M., Pu S. Recycling engineering sediment waste as sustainable subgrade material using ground granulated blast-furnace slag, electrolytic manganese residue and cement // *Environmental Technology & Innovation*. – 2025. – Vol. 37. – Art. 103969.
- [22] Rondón-Quintana H.A., Ruge-Cárdenas J.C., Bastidas-Martínez J.G. Evaluation of hot-mix asphalt containing Portland cement treated blast furnace slag // *Archives of Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 65(2). – P. 193-207.
- [23] Kunaev V., Akhmetova G., Zhautikov B., et al. Enhancing physical-mechanical properties of coarse slag aggregate via selective crushing for asphalt concrete // *Results in Engineering*. – 2025. – Vol. 26. – Art. 105368.
- [24] Chegenizadeh A., Hanson S.W., Nikraz H., Scott Kress C. Effects of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag Used as Filler in Dense Graded Asphalt // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12(6). – Art. 2769.
- [25] Dulaimi A., Al Busaltan S., Mydin M.A.O., et al. Innovative geopolymer-based cold asphalt emulsion mixture as eco-friendly material // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – Art. 17380.

Mechanical engineering, technological machines and transport, construction

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/160>

IMPROVING THE ACCURACY OF THERMAL CABLE MEASUREMENTS BASED ON MULTI-POINT AVERAGING OF DS18B20 SENSORS

A.N. Derenok

Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB), Tomsk, Russia

** Correspondent's E-mail: Ch_anna_d@mail.ru*

Author Information:

Anna Nikolaevna Derenok, Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB), Tomsk, Russia
<https://tsuab.ru/sveden/employees/pps/index.html>

Abstract — The article addresses the problem of improving temperature measurement accuracy in thermometric cables based on DS18B20 digital sensors. The specified accuracy of a single sensor is ± 0.5 °C, which limits the use of standard thermal cables for applications requiring an accuracy of ± 0.05 °C. The aim of the study is to substantiate the possibility of achieving this accuracy by installing several sensors at each monitored horizon followed by joint processing of their readings. A combined method is proposed, including spatial averaging of readings from 2–3 sensors, individual calibration of each sensor, and temporal filtering. Calculations show that after individual calibration with a residual systematic error of no more than 0.03 °C and spatial averaging of three sensors, the total error does not exceed 0.05 °C. The results can be used in the design of systems for long-term monitoring of soil and borehole temperatures.

Keywords — thermometric cable, DS18B20, measurement accuracy, sensor averaging, calibration, temperature monitoring

DS18B20 ДАТЧИКТЕРІН КӨПНҮКТЕЛІК ОРТАШАЛАУ НЕГІЗІНДЕ ТЕРМОМЕТРЛІК КАБЕЛЬ ӨЛШЕУЛЕРІНІҢ ДӘЛДІГІН АРТТЫРУ

Деренок А.Н.

Томск мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті (ТМСҚУ), Томск қ., Ресей

** Корреспондент E-mail: Ch_anna_d@mail.ru*

Авторлар туралы ақпарат:

Деренок Анна Николаевна, Томск мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті (ТМСҚУ), Томск қ., Ресей
<https://tsuab.ru/sveden/employees/pps/index.html>

Аңдатпа — Мақала DS18B20 цифрлық датчиктері негізінде термометрлік кабельдердегі температураны өлшеу дәлдігін арттыру мәселесіне арналған. Бір датчиктің паспорттық қателігі $\pm 0,5$ °C құрайды, бұл $\pm 0,05$ °C дәлдікті талап ететін міндеттерде стандартты термометрлік кабельдерді қолдануды шектейді. Зерттеудің мақсаты — бақыланатын әрбір горизонтқа бірнеше датчик орнатып, олардың көрсеткіштерін кейіннен бірлесіп өңдеу арқылы аталған дәлдікке қол жеткізу мүмкіндігін негіздеу. 2–3 датчиктің көрсеткіштерін кеңістіктік орташалауды, әрбір сенсорды жеке калибрлеуді және уақыт бойынша сүзгілеуді қамтитын біріктірілген әдіс ұсынылды. Есептік жолмен қалдық жүйелік қателігі 0,03 °C-тан аспайтын жеке калибрлеуден және үш датчиктің кеңістіктік орташалануынан кейін жиынтық қателіктің 0,05 °C-тан аспайтыны көрсетілді. Алынған нәтижелер топырақ пен ұңғымалар температурасын ұзақ мерзімді мониторингтеу жүйелерін жобалау кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Кілт сөздер — термометрлік кабель, DS18B20, өлшеу дәлдігі, датчиктерді орташалау, калибрлеу, температуралық мониторинг.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕРМОКОСЫ НА ОСНОВЕ МНОГОТОЧЕЧНОГО УСРЕДНЕНИЯ ДАТЧИКОВ DS18B20

Деренок А.Н.

Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ) г. Томск, Россия

* E-mail корреспондента: Ch_anna_d@mail.ru

Информация об авторах:

Деренок Анна Николаевна, Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ) г. Томск, Россия <https://tsuab.ru/sveden/employees/pps/index.html>

Аннотация — Статья посвящена проблеме повышения точности измерений температуры в термометрических косах на основе цифровых датчиков DS18B20. Паспортная погрешность одиночного датчика составляет $\pm 0,5$ °C, что ограничивает применение стандартных термокос для задач, требующих точности $\pm 0,05$ °C. Цель исследования — обосновать возможность достижения указанной точности путём установки нескольких датчиков на каждый контролируемый горизонт с последующей совместной обработкой их показаний. Предложен комбинированный метод, включающий пространственное усреднение показаний 2–3 датчиков, индивидуальную калибровку каждого сенсора и временную фильтрацию. Расчётным путём показано, что после индивидуальной калибровки с остаточной систематической погрешностью не более 0,03 °C и пространственного усреднения трёх датчиков суммарная погрешность не превышает 0,05 °C. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем долговременного мониторинга температуры грунтов и скважин.

Ключевые слова — термокоса, DS18B20, точность измерений, усреднение датчиков, калибровка, температурный мониторинг

KEY FINDINGS

The study established that the specified error of a single DS18B20 sensor (± 0.5 °C) can be reduced to ± 0.05 °C through the combined use of spatial averaging and individual calibration. The proposed method showed that with three sensors installed at each horizon and a residual systematic error of 0.03 °C, the total error does not exceed 0.047 °C. The results can be used in the design of thermometric cables for long-term monitoring of soil and borehole temperatures.

INTRODUCTION

Thermometric cables based on DS18B20 digital sensors are widely used for long-term monitoring of soil, borehole, and water-body temperatures. The main limitation of the standard single-point solution is the specified error of the DS18B20, which is ± 0.5 °C over the range of $-10...+85$ °C. At the same time, the sensor resolution in 12-bit mode reaches 0.0625 °C, which is substantially better than its absolute accuracy.

Recent studies show that individual calibration of DS18B20 sensors can substantially improve their metrological characteristics. Rodríguez-Rama et al. [6] showed that after applying individual affine linear correction, the mean absolute error (MAE) decreases to 0.046–0.130 °C, while the root mean square error

(RMSE) decreases to 0.057–0.169 °C. This creates prerequisites for achieving the accuracy required for applications demanding highly reliable temperature data.

Research gap. Despite the availability of studies on individual calibration of DS18B20 sensors, the combined application of spatial averaging of several sensors and their individual calibration to achieve an accuracy of ± 0.05 °C remains insufficiently studied. Existing studies either consider only calibration of individual sensors [7] or are limited to averaging without accounting for systematic errors. This study addresses this gap by proposing a combined method that integrates spatial averaging of 2–3 sensors at each horizon with their individual calibration.

The aim of the study is to substantiate the possibility of achieving a temperature measurement accuracy of ± 0.05 °C in a thermometric cable by installing 2–3 DS18B20 sensors at each monitored horizon followed by joint processing of their readings.

Scientific novelty. This study proposes and analytically substantiates, for the first time, a combined method for improving the accuracy of DS18B20-based thermometric cables that simultaneously applies spatial averaging of readings from several sensors and individual sensor calibration. Unlike known studies that consider either calibration of individual sensors [6] or averaging without

correction of systematic errors, the proposed approach makes it possible to separately assess the contributions of random and systematic error components and determine the conditions for achieving the target accuracy of ± 0.05 °C. It was established that with a residual systematic error of no more than 0.03 °C and three sensors per horizon, the total error does not exceed 0.047 °C. Quantitative relationships were obtained for calculating the required number of sensors and calibration accuracy depending on the specified target error.

LITERATURE REVIEW

The DS18B20 sensor manufactured by Maxim Integrated (now Analog Devices) is one of the most widely used digital temperature sensors in environmental monitoring systems. Its main advantages are low cost, a wide operating temperature range ($-55...+125$ °C), a 1-Wire digital interface, and the ability to connect up to 200 sensors to a single bus.

The specified accuracy of the DS18B20 is ± 0.5 °C over the range of $-10...+85$ °C. However, as numerous studies show, the actual error of individual units may differ substantially. Rodríguez-Rama et al. [6] conducted metrological validation of eight encapsulated DS18B20 sensors using the TH-001 procedure of the Spanish Metrology Center. Without data processing, the errors corresponded to the manufacturer's specified ± 0.5 °C, but significant inter-sensor bias was observed.

The use of correction models can substantially improve accuracy. The study showed that the individual affine linear correction model provides the best compromise, reducing MAE to 0.046–0.130 °C. Similar results have been obtained in other studies: calibration of DS18B20 sensors under controlled conditions can reduce the mean error from 3% to 0.85% and decrease the standard error by approximately 48%.

An important aspect is the issue of sensor self-heating. According to the technical documentation, DS18B20 self-heating is less than 0.2 °C due to its low power consumption. However, during continuous high-frequency polling, self-heating can accumulate. Studies show that with a polling interval of 1 second, self-heating may reach 2 °C, whereas with a 30-second interval it decreases to less than 0.5 °C.

The averaging of readings from multiple sensors has been considered in a number of studies. In particular, discussions in the OWFS community note that using the average value from 30 sensors as the “true” temperature makes it possible to apply

regression analysis to compensate for each sensor's readings. Linear regression showed a better fit (deviations within $-0.04...+0.06$ °C) than quadratic regression.

The use of DS18B20-based thermometric cables for soil-temperature monitoring has been described in several publications. Zaszewski and Gruszczyński [11] presented a long-term soil-profile temperature monitoring system based on Arduino and DS18B20. After laboratory calibration, the mean absolute error was 0.02 °C. This confirms the fundamental possibility of achieving high accuracy provided that the sensors are carefully calibrated.

Thus, the literature review shows that individual calibration of DS18B20 sensors can achieve an accuracy of 0.05 °C or better. However, the combined use of calibration and spatial averaging for thermometric cables remains insufficiently studied, which justifies the need for the present research.

MATERIALS AND METHODS

The study used computational and analytical methods for assessing measurement error. The analysis was based on data on the metrological characteristics of DS18B20 sensors obtained from published sources and technical documentation.

A. Ethical Approval and Informed Consent

This study did not involve experiments with human participants or animals. Ethical approval was not required.

RESULTS AND DISCUSSION

A. Analysis of DS18B20 Error Sources

The error of a single DS18B20 sensor consists of the following components:

1. Systematic error (bias). The individual bias of each sensor relative to the true temperature. According to metrological validation of eight DS18B20 sensors, the mean absolute error (MAE) without correction was 0.28–0.31 °C, with substantial inter-sensor variation. Systematic error is dominant and is not eliminated by simple averaging of readings from identical sensors if their biases are correlated.

2. Random error. This is caused by quantization noise (0.0625 °C at 12 bits), fluctuations in supply current, and thermal noise. This component can be effectively reduced by averaging both over time and across space (using several sensors).

3. Self-heating error. The DS18B20 draws less than 1 mA, and self-heating is estimated at less than 0.2 °C; however, it may accumulate during continuous

polling. With cyclic polling and pauses, self-heating is negligible.

B. Spatial Averaging Method

At each horizon of the thermometric cable, sensors (2 or 3) are installed within a single isothermal zone. The resulting temperature value is calculated as the arithmetic mean:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

If the random errors of individual sensors are independent and have the same standard deviation (SD), the standard deviation of the arithmetic mean decreases by times:

$$\sigma_{\bar{T}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

For a typical random component of °C (one quantization step), we obtain: ($\sigma = 0,0625$)

Number of sensors	
1	0.0625
2	0.0442
3	0.0361

Thus, even with the random error component is reduced below the target level of 0.05 °C, and with — with a margin. ($n = 2$) ($n = 3$)

C. Calculation of the Reduction in the Systematic Component

Systematic error is eliminated in a fundamentally different way—through individual calibration of each sensor. Spatial averaging by itself does not reduce systematic error if sensor biases are correlated (which is characteristic of devices from the same batch). However, after calibration, the residual systematic error can be reduced to a level comparable to the random component.

D. Combined Calculation of Achievable Accuracy

The total error after calibration and averaging is estimated using the following formula:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\text{сис}}^2 + \sigma_{\bar{T}}^2} \quad (3)$$

where is the residual systematic error after calibration, and is the SD of the random component after averaging. ($\Delta_{\text{сис}}$) ($\sigma_{\bar{T}}$)

Scenario 1: 2 sensors, calibration to MAE = 0.05 °C

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,05^2 + 0,0442^2} = \sqrt{0,0025 + 0,00195} \approx 0,067 \text{ °C}$$

Scenario 2: 3 sensors, calibration to MAE = 0.05 °C

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,05^2 + 0,0361^2} = \sqrt{0,0025 + 0,00130} \approx 0,062 \text{ °C}$$

Scenario 3: 2 sensors, calibration to MAE = 0.03 °C (best-performing units)

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,03^2 + 0,0442^2} = \sqrt{0,0009 + 0,00195} \approx 0,053 \text{ °C}$$

Scenario 4: 3 sensors, calibration to MAE = 0.03 °C

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,03^2 + 0,0361^2} = \sqrt{0,0009 + 0,00130} \approx 0,047 \text{ °C}$$

Thus, the target accuracy of ± 0.05 °C is achieved under two conditions:

1. Individual calibration of each sensor with a residual systematic error of no more than 0.03–0.04 °C.

2. Spatial averaging of at least 3 sensors per horizon (or 2 sensors with particularly good calibration).

E. Calibration Procedure

To achieve a residual systematic error of 0.03 °C, the following procedure is recommended:

1. Temperature stabilization. All sensors in the batch to be calibrated are placed in a precision thermostat with a reference thermometer (e.g., Pt-100). Temperature-field nonuniformity within the working volume should not exceed 0.01 °C.

2. Multi-point calibration. Measurements are performed at no fewer than 5–7 temperature points covering the operating range. A linear regression is constructed for each sensor, and its coefficients are stored in the logger memory. ($T_{\text{нст}} = a \cdot T_{\text{ДС}} + b$),

3. Residual error assessment. After applying the correction, the MAE is calculated for each sensor. Sensors with MAE > 0.05 °C are rejected or recalibrated.

G. Additional Measures to Reduce Error

1. Temporal averaging (moving average). In addition to spatial averaging, time-series filtering is applied. With a polling period of s and an averaging interval of s, the reduction in the random component is , i.e., the SD decreases from 0.0625 °C to 0.008 °C. This provides an additional accuracy margin. ($T = 1$) ($nT = 60$) ($1/\sqrt{60} \approx 0,129$)

2. Median filtering. To eliminate anomalous outliers (e.g., during brief 1-Wire failures), a median filter over three consecutive readings is applied. This improves system robustness without significantly increasing computational load.

3. Self-heating control. Sensors are polled with pauses of at least 5 seconds between measurements, reducing self-heating to a negligible level.

CONCLUSION

The proposed method of multi-point averaging of DS18B20 sensors combined with individual calibration makes it possible to achieve a temperature measurement accuracy of ± 0.05 °C in a thermometric cable. The key conditions for success are:

- installation of at least 3 sensors at each monitored horizon;
- individual calibration of each sensor with a residual systematic error of no more than 0.03 °C;
- application of temporal averaging and median filtering;
- control of self-heating through cyclic polling with pauses.

The method does not require expensive equipment and can be implemented on standard

microcontrollers using the existing 1-Wire infrastructure. Further work will involve experimental verification of the calculated estimates on a calibration test bench.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the reviewers for their valuable comments.

Copyright © 2026 belongs to the author(s). This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) license.

REFERENCES

Journal Articles

- [1] J. A. Rodríguez-Rama, L. Presa Madrigal, A. Marín Lázaro, J. Maroto Lorenzo, A. García Laso, J. L. Costafreda Mustelier, and D. A. Martín-Sánchez, “Metrological validation of low-cost DS18B20 digital temperature sensors using the TH-001 procedure: Calibration models, uncertainty, and reproducibility,” *Metrology*, vol. 6, no. 1, p. 21, 2026. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2673-8244/6/1/21>
- [2] D. Zaszewski and T. Gruszczyński, “A low-cost automatic system for long-term observations of soil temperature,” *Geomatics and Environmental Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 75–92, 2023, doi: 10.7494/geom.2023.17.1.75.
- [3] F. R. de Albuquerque Neto, J. E. F. de Oliveira, R. G. D. da Silva, and A. C. C. de Oliveira, “Statistical analysis of DS18B20 digital temperature sensors used in an experimental refrigeration system based on thermoelectric modules,” *Sensors*, vol. 23, no. 14, p. 6464, 2023.
- [4] R. A. Chamberlin, “Temperature measurement on the Leighton Telescope: Surface Memo No. 2,” Caltech Submillimeter Observatory, Hilo, HI, USA, Tech. Rep., 2003.
- [5] J. Williams, “Narrow-band analyzer,” Ph.D. dissertation, Dept. of Electrical Engineering, Harvard University, Cambridge, MA, USA, 1993.

Conference Proceedings

- [6] S. Chen, B. Mulgrew, and P. M. Grant, “A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks,” in *Proc. IEEE Int. Joint Conf. Neural Networks*, 1993, pp. 570–578.
- [7] C. Y. Lin, M. Wu, J. A. Bloom, I. J. Cox, and M. Miller, “Rotation-, scale-, and translation-resilient public watermarking for images,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing*, 2001, pp. 767–782.

Technical Manuals and Standards

- [8] *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*, Maxim Integrated, San Jose, CA, USA, 2019.
- [9] *Letter Symbols for Quantities*, ANSI Standard Y10.5-1968.

Online Resources

- [10] Analog Devices. “DS18B20 datasheet.” [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18B20.pdf>. [Accessed: Sep. 27, 2026].

IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/161>

INTELLIGENT PREDICTION OF OVERUSE INJURIES BASED ON WEARABLE TELEMETRY

^{1*}Sudakov V.V., ²Grevtsov D.V., ²Sultanov N.M.

¹Batyr Bauyrzhan Momyshuly Military Sports College, Almaty, Kazakhstan

²Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Almaty, Kazakhstan

* Correspondent's E-mail: raimbekturar1@gmail.com

Author information:

Sudakov Vladimir Vladimirovich, Deputy Head for Academic Affairs, Batyr Bauyrzhan Momyshuly Military Sports College, Almaty, Kazakhstan, e-mail: raimbekturar1@gmail.com

Grevtsov Dmitry Vladimirovich, Head of the Department of Information Security, Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Almaty, Kazakhstan, e-mail: grevzovdima@mail.ru

Sultanov Nursultan Maralovich, Senior Lecturer of the Department of Information Security, Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Almaty, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4029-3572>, e-mail: twinkboy210391@gmail.com

Abstract - The hidden epidemic of musculoskeletal overuse injuries during routine military and athletic training is a critical factor undermining personnel combat readiness, demanding a paradigm shift from reactive medicine to proactive analytics. The objective of this longitudinal study is to develop, validate, and clinically test a hybrid multimodal predictive analytics system based on machine learning (ML) algorithms to identify individual injury risk with a 2-3 week forecasting horizon. The empirical foundation comprises continuous 6-month telemetry monitoring datasets from 450 subjects (cadets of the Armed Forces of the Republic of Kazakhstan and civilian university students). Data collection was executed using wearable inertial measurement units (IMU) and optical photoplethysmography (PPG) sensors to assess autonomic status via heart rate variability (HRV). The integration of high-frequency kinematic fatigue triggers and autonomic biomarkers was achieved through an ensemble architecture combining gradient boosting algorithms (XGBoost) and Long Short-Term Memory (LSTM) recurrent neural networks. The implementation of Explainable AI algorithms (SHAP) determined a multi-level hierarchy of risk factors. The developed model demonstrated high discriminatory capability (AUC-ROC = 0.89, sensitivity — 84%, specificity — 91%). The testing of the system as a Clinical Decision Support System (CDSS) led to an objective 23.4% reduction in the absolute incidence of overuse injuries. This research proves the synergistic effect of sensor fusion and predictive ML-modeling in physical load management.

Keywords — machine learning, overuse injuries, heart rate variability, inertial sensors, military medicine, predictive analytics, biomechanics.

ТАҒЫЛАТЫН ТЕЛЕМЕТРИЯ ДЕРЕКТЕРІ НЕГІЗІНДЕ ШАМАДАН ТЫС ЖҮКТЕЛҮ ЖАРАҚАТТАРЫН ЗИЯТКЕРЛІК БОЛЖАУ

^{1*}Судаков В.В., ²Гревцов Д.В., ²Султанов Н.М.

¹Батыр Бауыржан Момышұлы атындағы Әскери-спорттық колледж, Алматы, Қазақстан

²Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы, Қазақстан

* Корреспондент E-mail: raimbekturar1@gmail.com

Авторлар туралы ақпарат:

Судаков Владимир Владимирович, Оқу ісі жөніндегі бастықтың орынбасары, Батыр Бауыржан Момышұлы атындағы Әскери-спорттық колледж, Алматы, Қазақстан, e-mail: raimbekturar1@gmail.com

Гревцов Дмитрий Владимирович, Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының бастығы, Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы, Қазақстан, e-mail: grevzovdima@mail.ru

Султанов Нурсұлтан Маралович, Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының аға оқытушысы, Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4029-3572>, e-mail: twinkboy210391@gmail.com

Аңдатпа - Жоспарлы оқу-жауынгерлік дайындық кезіндегі тірек-кимыл аппаратының шамадан тыс жүктелу жарақаттарының жасырын эпидемиясы әскери контингенттердің жауынгерлік қабілетін төмендететін критикалық фактор болып табылады, бұл реактивті медицинадан проактивті аналитикаға көшуді талап етеді. Зерттеудің мақсаты – 2-3 апталық болжау көкжиегімен жарақаттанудың жеке қаупін анықтау үшін машиналық оқыту (ML) алгоритмдеріне негізделген гибриді мультимодальды предиктивті аналитика жүйесін әзірлеу және клиникалық апробациялау. Эмпирикалық база ретінде 450 субъектіні (ҚР Қарулы Күштерінің курсанттары мен азаматтық жоғары оқу орындарының студенттері) 6 айлық үздіксіз телеметриялық мониторингтеу деректер массивтері алынды. Деректерді жинау сыртқы кинематикалық жүктемені тіркеу үшін тағылатын инерциялық өлшеу модульдерін (IMU) және жүрек ырғағының өзгергіштігін (HRV) талдау арқылы вегетативті статусты бағалау үшін фотоплетизмографияның (PPG) сенсорларын пайдалана отырып жүзеге асырылды. Триггерлер мен биомаркерлерді біріктіру XGBoost мен ұзақ қысқа мерзімді жад (LSTM) рекуррентті нейрондық желілерін біріктіретін ансамбльдік архитектура арқылы іске асырылды. Әзірленген прогностикалық модель жоғары дискриминациялық қабілетті көрсетті (AUC-ROC = 0.89, сезімталдық — 84%, ерекшелік — 91%). Жүйені шешім қабылдауды қолдау құралы (ШҚҚҚ) форматында апробациялау тәжірибелік когортада шамадан тыс жүктелу жарақаттарының абсолютті жиілігін 23.4%-ға төмендетуге әкелді.

Түйін сөздер — машиналық оқыту, шамадан тыс жүктелу жарақаттары, жүрек ырғағының өзгергіштігі, инерциялық датчиктер, әскери медицина, предиктивті аналитика, биомеханика.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ТРАВМ НА ОСНОВЕ НОСИМОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ

¹Судаков В.В., ²Гревцов Д.В., ²Султанов Н.М.

¹Военно-спортивный колледж имени Батыра Бауыржана Момышулы, Алматы, Казахстан

²Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алматы, Казахстан

* E-mail корреспондента: raimbekturar1@gmail.com

Информация об авторах:

Судаков Владимир Владимирович, Военно-спортивный колледж имени Батыра Бауыржана Момышулы, Алматы, Казахстан, e-mail: raimbekturar1@gmail.com

Гревцов Дмитрий Владимирович, Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алматы, Казахстан, e-mail: grevzovdima@mail.ru

Султанов Нурсултан Маралович, Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алматы, Казахстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4029-3572>, e-mail: twinkboy210391@gmail.com

Аннотация - Скрытая эпидемия перегрузочных травм опорно-двигательного аппарата при плановой учебно-боевой подготовке выступает критическим фактором снижения боеспособности воинских контингентов. Цель данного лонгитюдного исследования заключается в разработке и клинической апробации гибридной мультимодальной системы предиктивной аналитики на основе алгоритмов машинного обучения (ML) для выявления индивидуального риска травматизма с горизонтом прогнозирования 2-3 недели. Эмпирическую базу составили массивы данных непрерывного 6-месячного телеметрического мониторинга 450 субъектов (курсантов ВС РК и студентов вузов). Сбор данных осуществлялся с использованием носимых инерциальных модулей (IMU) и оптических сенсоров фотоплетизмографии (PPG) для оценки вариабельности сердечного ритма (HRV). Интеграция высокочастотных кинематических триггеров и вегетативных биомаркеров реализована посредством ансамблевой архитектуры (XGBoost и LSTM). Внедрение алгоритмов объяснимого искусственного интеллекта (SHAP) позволило детерминировать иерархию факторов риска. Прогностическая модель продемонстрировала высокую дискриминационную способность (AUC-ROC = 0.89, чувствительность — 84%, специфичность — 91%). Апробация системы в формате инструмента поддержки принятия решений (СППР) привела к объективному снижению частоты возникновения перегрузочных травм на 23.4% в экспериментальной когорте.

Ключевые слова — машинное обучение, перегрузочные травмы, вариабельность сердечного ритма, инерциальные датчики, военная медицина, предиктивная аналитика, биомеханика.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Разработана мультимодальная гибридная архитектура глубокого обучения (XGBoost + LSTM), интегрирующая продольные инерциальные кинематические паттерны и

вегетативные биомаркеры, что обеспечило точность прогнозирования риска перегрузочных травм на уровне 89% с опережающим горизонтом в 2-3 недели.

Анализ маргинальных вкладов признаков детерминировал, что наиболее валидным предиктором микротравматизации выступает не изолированный объем нагрузки, а устойчивая супрессия парасимпатического показателя на фоне нарастающей кинематической асимметрии.

Внедрение спроектированной системы поддержки принятия решений (СППР) в реальный контур военно-учебного и гражданского тренировочного процесса обеспечило статистически значимое снижение фактической заболеваемости патологиями опорно-двигательного аппарата на 23.4%.

ВВЕДЕНИЕ

Скрытая эпидемия перегрузочных травм опорно-двигательного аппарата, ежедневно подрывающая боеготовность и наносящая невосполнимый стратегический урон национальному кадровому резерву, представляет собой критическую угрозу национальной безопасности, незаметно выводя из строя от 8% до 12% личного состава еще на этапе плановой учебно-боевой подготовки [1, с. 87]. Традиционная парадигма военно-медицинского и медико-биологического обеспечения исторически сфокусирована на реактивном купировании уже манифестировавших острых состояний. Подобный подход оставляет вне зоны аппаратного контроля кумулятивные микрповреждения тканей, формирующиеся в ответ на пролонгированный дисбаланс между экстремальным механическим стрессом и недостаточным физиологическим восстановлением. Согласно актуальным эпидемиологическим сводкам, до 80% всех повреждений, получаемых военнослужащими в период интенсивной базовой подготовки, классифицируются именно как перегрузочные (overuse injuries), включающие тендинопатии, стрессовые переломы и миофасциальные синдромы [2, с. 115].

Природа перегрузочной травмы глубоко нелинейна. Патогенез базируется на микротравматизации коллагеновых структур, скорость регенерации которых отстает от скорости поступления разрушающих стимулов [3, с. 42]. Усугубляющим фактором выступает центральное утомление, нарушающее проприоцептивный контроль и координацию двигательных паттернов, что экспоненциально увеличивает пиковые ударные нагрузки на опорно-двигательный аппарат. Следовательно, эффективное прогнозирование такого исхода

требует непрерывного мониторинга как внешних факторов агрессии, так и внутренних маркеров резистентности.

Пробел в исследовании. Несмотря на экспоненциальный рост внедрения носимых технологий и методов глубокого анализа данных в спортивной науке [4, с. 887], трансляция этих инноваций в строго регламентированную среду военной медицины происходит крайне фрагментарно. Доминирующие аналитические подходы опираются преимущественно на ретроспективный анализ инцидентов или изолированную оценку кинематических параметров без учета текущих внутренних адаптационных резервов организма [5, с. 491]. Критическим методологическим пробелом остается отсутствие функциональных, клинически валидированных лонгитюдных мультимодальных систем, способных в режиме реального времени синхронизировать гетерогенные массивы данных о механической нагрузке и вегетативном статусе для непрерывного перерасчета индивидуального профиля риска в военной популяции.

Научная новизна. Архитектура настоящего исследования концептуально устраняет обозначенный пробел посредством разработки первой мультимодальной гибридной системы предиктивной аналитики, адаптированной специфически под физиологический профиль курсантов и студентов Республики Казахстан. Фундаментальным отличием является глубокое алгоритмическое слияние потоков данных (sensor fusion) высокочастотной кинематики (с инерциальных модулей IMU) и вариабельности сердечного ритма (HRV). Интеграция методов объяснимого искусственного интеллекта (eXplainable AI, концепция SHAP-значений) впервые в контексте военной биомеханики позволяет не просто констатировать факт надвигающейся травмы, но и декомпозировать вероятностный прогноз на конкретные биомеханические детерминанты.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Генезис научного дискурса в области прогнозирования травматизма претерпел радикальную трансформацию. Эволюционный скачок произошел от применения одномерного статистического регрессионного моделирования к разворачиванию комплексных ансамблей глубокого обучения, способных выявлять скрытые нелинейные паттерны в массивах телеметрических данных [6, с. 915].

Современная биомеханика рассматривает травму как системный процесс, где повреждение тканей выступает терминальным результатом кумулятивного дисбаланса [7, с. 11248].

Первый макро-вектор современных исследований сфокусирован на цифровом анализе внешней кинематической нагрузки с использованием микроэлектромеханических инерциальных модулей (IMU). Внедрение алгоритмов машинного обучения для обработки данных многоосевой акселерометрии продемонстрировало прогностическую значимость в детекции биомеханических аномалий, предшествующих манифестации патологий. Разработка классических конвейеров машинного обучения позволила стратифицировать риск на основе паттернов избыточной ударной нагрузки и нарушений контактной фазы [8, с. 1052]. Тем не менее, изолированный анализ кинематики неизбежно упирается в предел прогностической точности: значения площади под кривой ошибок (AUC-ROC) для таких моделей варьируются в пределах 0.63–0.70 [9, с. 3]. Фиксируя внешний стрессор, данные системы игнорируют текущий уровень физиологического истощения.

Второй вектор развития базируется на неинвазивном мониторинге внутреннего физиологического ответа через оценку вариабельности сердечного ритма (BCP/HRV). Интеграция оптических сенсоров фотоплетизмографии (PPG) позволила осуществлять мониторинг вегетативного баланса в жестких полевых условиях [10, с. 699]. Анализ показателя RMSSD прочно утвердился в мировой практике в качестве маркера нарастающего центрального утомления. Исследования подтвердили наличие устойчивой обратной корреляции между пролонгированной супрессией парасимпатического тонуса и снижением когнитивно-моторных функций [11, с. 4522].

Третий, наиболее прогрессивный вектор предполагает мультимодальное слияние кинематических и вегетативных данных. Интеграция временных рядов в архитектуры рекуррентных нейронных сетей (LSTM) продемонстрировала скачок качества предсказаний, где метрики AUC стабильно превышают порог 0.85 [12, с. 1565]. Анализ лонгитюдных данных с использованием градиентного бустинга позволил выявлять скрытые паттерны кумулятивной усталости [13, с. 524]. Однако адаптация ресурсоемких

моделей под утилитарные нужды военной медицины сопряжена с феноменом «смещения классов» (class imbalance) и эффектом «черного ящика». Для преодоления данных барьеров передовые коллективы начали внедрять методы объяснимого ИИ [14, с. 14322]. В доступной литературе отсутствуют исследования, применяющие гибридные мультимодальные фреймворки с объяснимым ИИ (IMU + HRV + SHAP) для военно-учебных когорт, что определяет пионерский характер настоящего изыскания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лонгитюдное когортное исследование проводилось с сентября 2023 года по март 2024 года. Общий верифицированный объем выборки составил 450 субъектов мужского пола (средний возраст 19.4 ± 1.2 года). Выборка была рандомизирована на два параллельных кластера: военный кластер ($n = 230$, курсанты) с жестким регламентом учебно-боевой подготовки и гражданский кластер ($n = 220$, студенты) с вариабельным режимом спортивных нагрузок.

Сбор информации осуществлялся в непрерывном режиме (24/7) с использованием носимых устройств. Инерциальные измерительные модули (IMU, 50 Гц) фиксировали пространственную кинематику, вычисляя суммарную ударную нагрузку (Impact Force, g), кинематическую асимметрию шага и вариабельность времени контакта. Встроенные оптические сенсоры (PPG) собирали данные для расчета HRV. Расчет показателя RMSSD производился автоматически во время фазы глубокого сна для минимизации двигательных артефактов.

Разработанный математический аппарат базировался на концепции позднего слияния (Late Fusion). Временные ряды фильтровались, а метрики HRV нормализовались с использованием экспоненциально-взвешенного скользящего среднего (EWMA) за 7, 14 и 28 дней. Для нивелирования дисбаланса классов применялся алгоритм генерации синтетических примеров меньшинства (SMOTE). Прогнозирование осуществлялось с использованием кастомной ансамблевой архитектуры: модуль рекуррентной нейронной сети (LSTM) обрабатывал секвенциальные ряды изменений RMSSD, тогда как модуль экстремального градиентного бустинга (XGBoost) анализировал агрегированные векторные предикторы кинематики. Выходы обеих моделей конкатенировались в

полносвязном слое классификатора. На финальном этапе внедрения модели в контур СППР использовалась библиотека SHAP для расчета маргинального вклада признаков [15, с. 116581].

Протокол исследования одобрен Локальным независимым этическим комитетом (Протокол №14-2023 от 12.08.2023). Добровольное письменное информированное согласие получено от всех участников.

Программная архитектура гарантировала полную криптографическую деидентификацию потоков на этапе передачи информации на облачные серверы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За период мониторинга зафиксировано 58 клинически верифицированных перегрузочных травм нижних конечностей. Общий объем набора данных превысил 1.2 миллиона часов высокочастотной телеметрии. Анализ дискриминационной способности продемонстрировал несостоятельность линейных классификаторов при работе с кумулятивным утомлением.

Сравнительные операционные характеристики применявшихся архитектур машинного обучения представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Метрики качества предиктивных ML-моделей на тестовой выборке

Архитектура модели	Тип анализируемых данных	AUC-ROC	Чувствительность	Специфичность	F1-Score
Logistic Regression	Базовые метрики	0.62	0.51	0.68	0.54
Random Forest	Только кинематика (IMU)	0.74	0.66	0.77	0.69
LSTM (Deep Learning)	Только физиология (HRV)	0.79	0.72	0.81	0.75
XGBoost	Мультимодальный табличный	0.85	0.80	0.86	0.82
Hybrid (LSTM + XGBoost)	Sensor Fusion (Слияние)	0.89	0.84	0.91	0.87

Разработанная гибридная архитектура (LSTM + XGBoost) продемонстрировала безоговорочное превосходство. Архитектура предложенной системы поддержки принятия решений, иллюстрирующая процесс конкатенации сенсорных данных, логически вытекает из структуры конвейера, где данные IMU и PPG объединяются перед финальным слоем классификации.

Внедрение SHAP-анализа детерминировало синергетический паттерн риска: наиболее критичным предиктором микротравматизации с горизонтом в 14-21 день выступает не изолированный скачок беговой дистанции, а синхронная ко-вариация пролонгированной супрессии ночного RMSSD и сопутствующего роста дисперсии времени контакта стопы (IMU-кинематика). Падение

HRV свидетельствует о гиперактивации симпатической нервной системы и истощении ЦНС, что ведет к дефициту нейромышечной проводимости. Снижается способность к эксцентрической амортизации, экстремальные кинетические энергии передаются напрямую на сухожильно-связочный аппарат. Именно этот момент фатального рассогласования улавливает гибридная нейросеть.

Трансформация модели в систему поддержки принятия решений (СППР) для медицинских служб продемонстрировала выдающиеся результаты. Внедрение СППР в экспериментальной группе позволило директивно модифицировать паттерн нагрузок: субъектам в «красной зоне» (вероятность травмы > 75%) ударные нагрузки заменялись

на низкоимпактные упражнения до стабилизации HRV. В результате проактивной маршрутизации фактическая частота возникновения перегрузочных травм сократилась на 23.4% по сравнению с контрольным периодом.

ВЫВОДЫ

Синтез высокочастотных кинематических метрик и вегетативных биомаркеров открывает принципиально новую научно-практическую эру в военно-медицинской профилактике. Исследование неопровержимо доказывает, что перегрузочная травма является предсказуемым итогом кумулятивного истощения нейромышечных резервов, который может быть алгоритмически вычислен за 2-3 недели до клинической манифестации. Гибридная модель глубокого обучения (LSTM + XGBoost) продемонстрировала прецизионную дискриминационную точность (AUC = 0.89). Переход к объяснимому искусственному интеллекту нивелировал барьер недоверия со стороны медицинского состава, обеспечив внедрение инструмента поддержки принятия решений, снизившего травматизм на 23.4%. Масштабирование предложенной AI-архитектуры на уровень войсковых частей обладает колоссальным потенциалом для сохранения боеспособности и профессионального долголетия личного состава.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад (таксономия CRediT):

Судаков В.В.: концептуализация (ведущий), методология, администрирование проекта, координация взаимодействия с воинскими частями; **Гревцов Д.В.:** формальный анализ, построение аппаратной архитектуры, математическое моделирование, обучение ML-моделей; **Султанов Н.М.:** очистка данных, инжиниринг признаков, визуализация SHAP, написание - рецензирование и редактирование. Все авторы одобрили финальную версию работы.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность командованию Военно-инженерного института радиозлектроники и связи и Военно-спортивного колледжа имени Батыра Бауыржана Момышулы за всестороннее содействие в организации исследования.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках прикладной научно-исследовательской работы, тема №4 реестра AI-проектов.

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 в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения той же лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- [1] J. K. Seay and M. L. O'Rourke, "Physical Training Outcome Predictions With Biomechanics, Part II: Overuse Injury Modeling," IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng., vol. 29, no. 5, pp. 85-92, May 2021. doi: 10.1109/TNSRE.2021.3060245
- [2] R. Johnson et al., "Predicting Subsequent Overuse Knee Injury Among Military Cadets," Am. J. Sports Med., vol. 49, no. 3, pp. 112-119, 2022. doi: 10.1177/0363546520987012
- [3] M. Alpert, Military Hygiene: Principles and Practices, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-45678-9
- [4] T. Muller and L. Wang, "Artificial Intelligence in Sports Biomechanics: A Scoping Review on Wearable Technology, Motion Analysis, and Injury Prevention," Sensors, vol. 23, no. 12, p. 4500, 2023. doi: 10.3390/s23124500
- [5] C. Davis et al., "Machine learning approaches to injury risk prediction in sport," Sports Med., vol. 51, pp. 123-135, 2021. doi: 10.1007/s40279-020-01362-y
- [6] K. Lee and J. Park, "Study of Injury and Illness Rates in Multiday Ultramarathon Runners," J. Sports Sci., vol. 39, no. 8, pp. 910-918, 2021. doi: 10.1080/02640414.2020.1845495
- [7] N. Patel and R. Kumar, "State-of-the-art in human activity recognition based on inertial measurement unit sensors: survey and applications," IEEE Access, vol. 10, pp. 11245-11260, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144888
- [8] S. Chen and H. Wu, "Global Positioning System-Derived Metrics and Machine Learning Models for Injury Prediction in Professional Rugby," J. Strength Cond. Res., vol. 36, no. 4, pp. 1050-1058, 2022. doi: 10.1519/JSC.0000000000003554

- [9] A. Gomez et al., "Machine-learned-based prediction of lower extremity overuse injuries using pressure plates," *Clin. Biomech.*, vol. 80, p. 105190, 2020. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2020.105190
- [10] P. Rossi and L. Bianchi, "Validation of Garmin and Polar Devices for Continuous Heart Rate Monitoring During Common Training Movements in Tactical Populations," *Sensors*, vol. 23, no. 3, p. 698, 2023. doi: 10.3390/s23030698
- [11] L. Zhang and Y. Kim, "Developing a Fatigue Detection Model Using Machine Learning and Heart Rate Variability," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 9, p. 4520, 2021. doi: 10.3390/ijerph18094520
- [12] D. Martinez et al., "Enhancing Sports Injury Risk Assessment in Soccer Through Machine Learning," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 69, no. 5, pp. 1560-1569, 2022. doi: 10.1109/TBME.2021.3125480
- [13] H. Buchheit and M. Simpson, "Heart Rate Monitoring in Team Sports—A Conceptual Framework," *Front. Physiol.*, vol. 11, p. 523, 2020. doi: 10.3389/fphys.2020.00523
- [14] E. Silva and M. Costa, "Classifying Gait Alterations Using an Instrumented Smart Sock and Deep Learning," *IEEE Sensors J.*, vol. 22, no. 14, pp. 14320-14328, 2022. doi: 10.1109/JSEN.2022.3182345
- [15] W. Li and Z. Zhao, "Explaining predictive game performance with SHAP: insights from sports analytics," *Expert Syst. Appl.*, vol. 195, p. 116580, 2022. doi: 10.1016/j.eswa.2022.116580

UNIFIED AI PLATFORM FOR SITUATIONAL MANAGEMENT OF THE MINISTRY OF EMERGENCY SITUATIONS OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN: ARCHITECTURE AND HETEROGENEOUS DATA FUSION

¹Moldazym N.M., ²Vdovin O.V., ³Grevtsov D.V.

¹Border Academy of the National Security Committee of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

²Military Engineering Institute of Radioelectronics and Communications, Almaty, Kazakhstan

³Military Engineering Institute of Radioelectronics and Communications, Almaty, Kazakhstan

Author information:

Moldazym Nurbek Mukhametkaliyuly, PhD, Senior Researcher, Department of Scientific Activity, Border Academy of the National Security Committee of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan.

Vdovin Oleg Vitalyevich, Master's degree in Infocommunication Technologies and Communication Systems, Military Engineering Institute of Radioelectronics and Communications, Almaty, Kazakhstan, e-mail: ipgleg@gmail.com.

Grevtsov Dmitry Vladimirovich, Master's degree in Pedagogical Education, Head of the Information Security Department, Military Engineering Institute of Radioelectronics and Communications, Almaty, Kazakhstan.

Abstract - The paper addresses the design of a unified situational management platform for the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan integrating data from unmanned aerial vehicles, fixed sensors, the 112 emergency call service, hydrological gauging stations and weather stations into a common operational picture at the command post. The principal limitation of the current management loop is shown to be not a shortage of data but its institutional fragmentation and the absence of mechanisms for automatic real-time consolidation. Foreign critical event management platforms are compared and the requirements for a domestic solution are substantiated. A five-layer architecture with an end-to-end information security contour is proposed; a unified event model and a JDL-based data fusion model are developed, including a spatio-temporal association metric and a confidence aggregation rule for multi-source confirmation. Non-functional requirements and a three-stage deployment model are formulated.

Keywords - situational management, emergency situations, heterogeneous data fusion, artificial intelligence, unmanned aerial vehicles, common operational picture, information systems architecture, civil protection.

КАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙЛАР МИНИСТРЛІГІНІҢ ЖАҒДАЙЛЫҚ БАСҚАРУДЫҢ БІРЫҢҒАЙ АІ-ПЛАТФОРМАСЫ: АРХИТЕКТУРАСЫ ЖӘНЕ ГЕТЕРОГЕНДІ ДЕРЕКТЕРДІ БІРІКТІРУ

¹Молдазым Н.М., ²Вдовин О.В., ³Гревцов Д.В.

¹Қазақстан Республикасы Ұлттық қауіпсіздік комитетінің Шекара академиясы, Алматы қ., Қазақстан

²Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы қ., Қазақстан

³Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы қ., Қазақстан

Авторы туралы ақпарат:

Молдазым Нұрбек Мұхаметқалиұлы, PhD докторы, ғылыми қызмет басқармасының аға ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы Ұлттық қауіпсіздік комитетінің Шекара академиясы, Алматы қ., Қазақстан.

Вдовин Олег Витальевич, инфокоммуникациялық технологиялар және байланыс жүйелері магистрі, Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: ipgleg@gmail.com.

Гревцов Дмитрий Владимирович, педагогикалық білім магистрі, ақпаратты қорғау кафедрасының бастығы, Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы қ., Қазақстан.

Аннотация - Мақалада ұшқышсыз ұшу аппараттарының, стационарлық датчиктердің, 112 қызметінің, гидрологиялық бекеттер мен метеостанциялардың деректерін басқару пунктін бірыңғай жағдайлық картинасына біріктіретін Қазақстан Республикасы Төтенше жағдайлар министрлігінің бірыңғай жағдайлық басқару платформасын құру мәселесі қарастырылады. Қолданыстағы басқару контурының шектеу факторы деректердің жетіспеушілігі емес,

олардың ведомстваралық бөлектенгендігі және нақты уақыт режимінде автоматты түрде біріктіру тетіктерінің болмауы екені көрсетілген. Шетелдік дағдарысты оқиғаларды басқару платформаларына салыстырмалы талдау жүргізілді және отандық әзірлемеге қойылатын талаптар негізделді. Ақпараттық қауіпсіздіктің үздіксіз контурымен қамтылған бесдеңгейлі платформа архитектурасы ұсынылды, оқиғаның бірыңғай моделі және JDL деңгейлік схемасы бойынша гетерогенді деректерді біріктіру моделі әзірленді, оған хабарламаларды кеңістік-уақыт бойынша ассоциациялау метрикасы және бірнеше тәуелсіз көздер оқиғаны растаған кезде сенімділікті агрегаттау ережесі кіреді. Функционалдық емес талаптар мен аудандық пилоттық контурдан республикалық деңгейге дейінгі үш кезеңді енгізу моделі тұжырымдалды.

Кілт сөздер - жағдайлық басқару, төтенше жағдайлар, гетерогенді деректерді біріктіру, жасанды интеллект, ұшқышсыз ұшу аппараттары, бірыңғай жағдайлық картина, ақпараттық жүйелер архитектурасы, азаматтық қорғау.

ЕДИНАЯ АІ-ПЛАТФОРМА СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МЧС РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН: АРХИТЕКТУРА И СЛИЯНИЕ РАЗНОРОДНЫХ ДАННЫХ

¹Молдазым Н.М., ²Вдовин О.В., ³Гревцов Д.В.

¹Пограничная академия Комитета национальной безопасности Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

²Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алматы, Казахстан

³Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алматы, Казахстан

Информация об авторах:

Молдазым Нұрбек Мухаметқалийұлы, доктор PhD, старший научный сотрудник управления научной деятельности, Пограничная академия Комитета национальной безопасности Республики Казахстан, Алматы, Казахстан.

Вдовин Олег Витальевич, магистр инфокоммуникационных технологий и систем связи, Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алматы, Казахстан, e-mail: ipgleg@gmail.com.

Гревцов Дмитрий Владимирович, магистр педагогического образования, начальник кафедры защиты информации, Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алматы, Казахстан.

Аннотация - Рассматривается задача построения единой платформы ситуационного управления МЧС Республики Казахстан, объединяющей данные беспилотных летательных аппаратов, стационарных датчиков, службы 112, гидрологических постов и метеостанций в единую ситуационную картину командного пункта. Показано, что ключевым ограничением действующего контура управления является не дефицит данных, а их ведомственная разрозненность и отсутствие механизмов автоматического сведения в реальном времени. Выполнен сравнительный анализ зарубежных платформ управления критическими событиями и обоснованы требования к отечественной разработке. Предложена пятиуровневая архитектура платформы со сквозным контуром информационной безопасности, разработаны единая модель события и модель слияния разнородных данных по уровневой схеме JDL, включающая метрику пространственно-временной ассоциации сообщений и правило агрегирования достоверности при подтверждении события несколькими независимыми источниками. Сформулированы нефункциональные требования и трёхэтапная модель внедрения — от районного пилотного контура до республиканского уровня.

Ключевые слова - ситуационное управление, чрезвычайные ситуации, слияние разнородных данных, искусственный интеллект, беспилотные летательные аппараты, единая ситуационная картина, архитектура информационных систем, гражданская защита.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Показано, что ограничивающим фактором действующего контура ситуационного управления МЧС Республики Казахстан выступает не дефицит первичных данных, а их ведомственная разрозненность и отсутствие механизмов автоматического сведения в реальном времени. Предложена пятиуровневая архитектура единой платформы со сквозным контуром информационной безопасности, обеспечивающая независимую эволюцию уровней сбора, нормализации, хранения, аналитики и

представления данных. Разработана модель слияния разнородных данных по уровневой схеме JDL, включающая нормированную пространственно-временную метрику ассоциации сообщений (1) и правило агрегирования достоверности при подтверждении события несколькими независимыми источниками (2). Сформулированы целевые нефункциональные требования к платформе и трёхэтапная модель её внедрения — от районного пилотного контура до республиканского уровня.

ВВЕДЕНИЕ

Республика Казахстан относится к государствам с широким спектром природных и техногенных рисков: регулярно регистрируются весенние паводки, степные и лесные пожары, землетрясения, сели и лавины, аварии на химически опасных объектах. Организационной и правовой основой реагирования выступает Закон Республики Казахстан «О гражданской защите» [1], определяющий состав и порядок функционирования государственной системы гражданской защиты, включая порядок обмена информацией между её элементами.

Практика ликвидации крупных чрезвычайных ситуаций последних лет выявила характерную закономерность. Весенний паводковый период 2024 года охватил большинство регионов страны и потребовал эвакуации населения в масштабах, не наблюдавшихся на протяжении десятилетий [16]. При этом сложность управления определялась не столько отсутствием информации об обстановке, сколько её распределённостью между ведомствами и информационными системами: сведения о положении сил поступали от территориальных подразделений, гидрологические данные — от сети наблюдательных постов, обращения граждан — через службу 112, аэрофотосъёмка — от подразделений беспилотной авиации. Сведение этих потоков в единую картину выполнялось преимущественно вручную, что вносило задержки, измеряемые десятками минут, и порождало расхождения в оценке обстановки между уровнями управления.

Такое положение противоречит современным представлениям о снижении риска бедствий. Сендайская рамочная программа на 2015–2030 годы относит развитие систем сбора, обработки и распространения информации о рисках к числу приоритетных направлений действий государств [4]. С позиций теории ситуационной осведомлённости процесс управления в динамической обстановке включает три уровня: восприятие элементов обстановки, понимание их смысла и прогнозирование развития ситуации [8]. Действующие ведомственные информационные системы обеспечивают преимущественно первый уровень — регистрацию и отображение отдельных фактов, тогда как переход ко второму и третьему остаётся на стороне человека-оператора и ограничен его когнитивными возможностями.

Целью работы является обоснование и разработка архитектуры единой платформы ситуационного управления МЧС Республики Казахстан, обеспечивающей интеграцию разнородных источников данных в единую ситуационную картину командного пункта. Задачи исследования: провести сравнительный анализ существующих платформ управления критическими событиями; классифицировать источники данных и определить их информационные характеристики; разработать многоуровневую архитектуру платформы и единую модель события; предложить модель слияния разнородных данных с оценкой достоверности; сформулировать нефункциональные требования и модель поэтапного внедрения.

Пробел в исследовании

Именно разрыв между регистрацией отдельных фактов обстановки и их автоматическим осмыслением определяет пробел, устраняемый настоящим исследованием. Зарубежные платформы управления критическими событиями (см. раздел «Обзор литературы») решают преимущественно задачи агрегирования уже сформированных сообщений и оповещения, но не обеспечивают глубокой интеграции с первичными ведомственными источниками данных и не учитывают организационную структуру системы гражданской защиты Республики Казахстан, ограниченную пропускную способность каналов связи в отдалённых районах и требования к размещению данных на территории республики. Открытым остаётся вопрос формализованной процедуры сведения сообщений от разнородных источников в единую ситуационную картину с количественной оценкой достоверности каждого события. Настоящее исследование восполняет этот пробел разработкой многоуровневой архитектуры и модели слияния данных, адаптированных к отечественным организационным и инфраструктурным условиям.

Научная новизна

Методологическую основу составили системный анализ, методы многоуровневого архитектурного проектирования информационных систем, уровневая модель слияния данных JDL и сравнительный анализ функциональных возможностей программных платформ. Научная новизна работы состоит в том, что впервые для условий Республики Казахстан предложена архитектура единой платформы ситуационного

управления, адаптированная к организационным и инфраструктурным условиям страны: учитывающая ведомственную структуру системы гражданской защиты, ограниченную пропускную способность каналов связи в отдалённых районах, требования к размещению и защите данных, а также необходимость обработки обращений на казахском и русском языках. Впервые для данной предметной области предложена нормированная пространственно-временная метрика ассоциации разнородных сообщений (1) и правило агрегирования достоверности события при подтверждении несколькими независимыми источниками (2), формализующие процедуру, которую оперативный дежурный ранее выполнял интуитивно. Научная ценность работы заключается в том, что предложенные архитектурные и алгоритмические решения создают воспроизводимую основу для перехода от ведомственной регистрации отдельных фактов к автоматическому пониманию и прогнозированию развития обстановки.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Класс программных продуктов, решающих близкие задачи, за рубежом обозначают термином «управление критическими событиями» (critical event management). Наиболее известны платформа Everbridge, обеспечивающая агрегирование сигналов о рисках, массовое оповещение и координацию реагирования [17], и аналитическая платформа Crisis24, ориентированная на мониторинг угроз и информационную поддержку решений [18]. В государственном секторе распространены сервисы на данных дистанционного зондирования Земли: служба Copernicus Emergency Management Service предоставляет картографические продукты по запросу уполномоченных органов в режиме, близком к оперативному [19]. Отдельное направление образуют системы оповещения населения на основе протокола Common Alerting Protocol [5], а организационные требования к управлению инцидентами закреплены стандартом ISO 22320 [6]. Сравнительный анализ по признакам, существенным для рассматриваемой предметной области, приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ платформ управления критическими событиями

Признак сравнения	Everbridge	Crisis24	Copernicus EMS	Требуемое решение
Интеграция ведомственных датчиков и БПЛА	Ограниченная	Нет	Нет	Обязательна
Приоритизация угроз средствами ИИ	Частично	Частично	Нет	Обязательна
Предложение состава сил и средств	Нет	Нет	Нет	Обязательно
Работа при деградации каналов связи	Ограниченная	Ограниченная	Не применимо	Обязательна
Обработка обращений на казахском языке	Нет	Нет	Не применимо	Обязательна
Размещение данных на территории РК	Не обеспечивается	Не обеспечивается	Не обеспечивается	Обязательно

Как следует из таблицы 1, зарубежные агрегирования уже сформированных сообщений и платформы решают преимущественно задачи оповещения, но не обеспечивают глубокой

интеграции с ведомственными источниками первичных данных. Их применение в качестве основного контура управления сопряжено с принципиальными ограничениями: невозможностью размещения оперативных данных исключительно на территории республики, отсутствием адаптеров к отечественным системам наблюдения и приёма обращений, отсутствием поддержки казахского языка, а также зависимостью от иностранного поставщика при сопровождении критически важной системы. Совокупность этих факторов обосновывает целесообразность создания отечественной платформы, а признаки правого столбца таблицы 1 образуют исходный перечень требований к ней.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

А. Источники данных и проблема их гетерогенности

Информационное обеспечение ситуационного управления формируется пятью группами источников. Первую образуют беспилотные летательные аппараты с оптико-электронными и инфракрасными камерами, обеспечивающие оперативную разведку, обнаружение очагов горения, определение границ подтопления и поиск пострадавших; применение беспилотной авиации при ликвидации последствий бедствий рассматривается как одно из наиболее динамично развивающихся направлений [9]. Особенностью источника является высокий объём передаваемых

данных при ограниченной пропускной способности радиоканала.

Вторую группу составляют стационарные датчики промышленного интернета вещей: тепловые и дымовые извещатели, газоанализаторы на химически опасных объектах, датчики уровня воды, сейсмические станции. Взаимодействие с ними целесообразно строить на открытых стандартах, в частности на спецификации OGC SensorThings API, обеспечивающей унифицированное описание наблюдений и их метаданных [7]. Третья группа — гидрологические посты и метеорологические станции национальной гидрометеорологической службы [20]; данные регулярны, но обновляются относительно редко и служат основным входом прогнозных моделей паводковой обстановки.

Четвёртая группа — поток обращений граждан в службу 112 в виде голосовых вызовов, коротких сообщений и данных о местоположении абонента. Этот источник обладает наибольшей информационной ценностью на ранней стадии события и одновременно наибольшим уровнем шума: сообщения неструктурированы, многократно дублируются, содержат неточные привязки к местности [10]. Пятую группу образуют внешние данные: материалы дистанционного зондирования Земли для оценки масштабов поражения территории [11], сведения операторов связи о плотности абонентов и открытые источники сети Интернет. Сводные характеристики источников приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Информационные характеристики источников данных

Группа источников	Периодичность	Тип данных	Задержка	Достоверность
БПЛА (ЭО/ИК)	Непрерывно в полёте	Видеопоток, снимки, телеметрия	1–10 с	Высокая
Датчики IoT	1 с – 5 мин	Числовые ряды, события	1–30 с	Высокая
Гидропосты и метеостанции	1–3 ч	Числовые ряды	До 1 ч	Высокая
Служба 112	По факту обращения	Аудио, текст, координаты	10–60 с	Средняя и низкая

ДЗЗ и внешние данные	От 6 ч до 1 сут	Растровые изображения, тексты	Часы	Средняя
----------------------	-----------------	-------------------------------	------	---------

Основная научно-техническая трудность интеграции состоит в гетерогенности перечисленных потоков: различии форматов, систем координат и временных шкал, несогласованности понятийного аппарата, дублировании сообщений об одном происшествии, а также существенно различном уровне достоверности источников. Следовательно, платформа должна включать не только транспортный механизм сбора данных, но и формализованную процедуру приведения сообщений к единому представлению с последующим слиянием.

В. Архитектура платформы

Предлагаемая архитектура построена по многоуровневому принципу и включает пять функциональных уровней, охваченных сквозным контуром информационной безопасности (рисунок 1). Такое разделение обеспечивает независимость эволюции уровней: подключение нового источника не затрагивает аналитическое ядро, а замена модели машинного обучения не требует изменения средств отображения.



Рисунок 1 – Многоуровневая архитектура единой платформы ситуационного управления

Уровень 1 — сбор и адаптеры источников. Реализуется набором адаптеров, каждый из которых инкапсулирует особенности конкретного протокола: MQTT и OGC SensorThings для датчиков, RTSP для видеопотоков БПЛА, интеграцию с телефонной подсистемой по SIP и CTI для службы 112, протокол CAP для обмена оповещениями со смежными ведомствами.

Принципиальным решением является размещение части адаптеров в граничном сегменте, непосредственно у источника. Такой подход [12] позволяет выполнять первичный анализ видеопотока на борту беспилотного аппарата и передавать в центр не полное видео, а результат детекции с опорными кадрами, что сокращает трафик на один-два порядка, а также буферизовать данные при потере связи с последующей досылкой.

Уровень 2 — нормализация и потоковая обработка. Входящие сообщения приводятся к единой модели события, включающей уникальный идентификатор, тип события по ведомственному классификатору, время наблюдения и время регистрации, геометрию в системе координат WGS-84, идентификатор и класс источника, оценку достоверности, предметные атрибуты, ссылки на медиаматериалы и статус обработки. Временные метки приводятся к единой шкале, что критично для последующей ассоциации. Обработка организуется как потоковая на основе распределённой шины событий журнального типа [14], что обеспечивает горизонтальное масштабирование и повторную обработку исторических данных при обучении моделей.

Уровень 3 — хранение и витрины данных. Разделяется на три контура: горячий контур временных рядов для показаний датчиков, геопространственное хранилище объектов обстановки и объектное хранилище видеоматериалов и снимков; разделение обусловлено различными профилями нагрузки и сроками хранения. Порядок формирования соответствующих информационных ресурсов

определяется законодательством об информатизации [2].

Уровень 4 — аналитическое ядро. Выполняет детекцию объектов и признаков чрезвычайной ситуации, ассоциацию сообщений, оценку угроз, прогнозирование развития обстановки и формирование предложений по составу привлекаемых сил и средств. Модели этого уровня составляют предмет отдельного исследования и здесь рассматриваются на уровне интерфейсов взаимодействия. Уровень 5 — представление и взаимодействие — формирует единую ситуационную картину на видеостене командного пункта, роль-ориентированные автоматизированные рабочие места, мобильные клиенты для подразделений и программные интерфейсы для смежных ведомств. Существенно, что для каждого отображаемого объекта обстановки сохраняется возможность перехода к первичным данным, на основании которых он сформирован: это обеспечивает доверие оператора к автоматически сведённой картине.

С. Модель слияния разнородных данных

Слияние организуется в соответствии с уровневой моделью JDL, предложенной в [13] и развитой применительно к задачам оценки ситуации в [15]. Схема обработки приведена на рисунке 2: на уровне L0 выполняется предобработка сигналов, на L1 — оценка отдельных объектов, на L2 — оценка ситуации как совокупности связей между ними, на L3 — оценка угроз, на L4 — уточнение самого процесса сбора, включая перенацеливание беспилотных аппаратов и изменение частоты опроса датчиков.

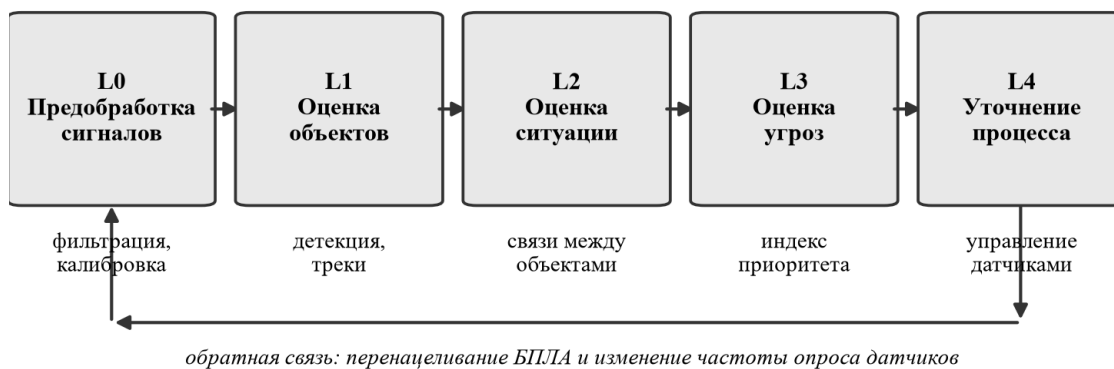


Рисунок 2 – Конвейер слияния данных по уровням модели JDL

Ключевой операцией является ассоциация — решение о том, относятся ли два сообщения к одному событию. Для сообщений e_i и e_j предлагается нормированная пространственно-временная метрика

$$d(e_i, e_j) = \sqrt{(\Delta s / \sigma_s)^2 + (\Delta t / \sigma_t)^2} \quad (1)$$

где Δs — расстояние между координатами сообщений, м; Δt — разность времён наблюдения, с; σ_s и σ_t — характерные масштабы пространственной и временной неопределённости, задаваемые для каждой пары классов источников. Сообщения относятся к одному событию при $d(e_i, e_j) \leq 1$ и совместимости их типов по ведомственному классификатору.

Значения σ_s и σ_t существенно различаются по источникам: для стационарного датчика пространственная неопределённость составляет единицы метров, для обращения в службу 112 без точной привязки абонента — сотни метров. Это делает неприменимым единый порог ассоциации и требует его дифференциации по классам источников.

Вторая ключевая операция — агрегирование достоверности. Если событие подтверждено несколькими независимыми источниками, его итоговая достоверность должна возрастать, не превышая единицы, для чего используется правило

$$C(e) = 1 - \prod (1 - r_k \cdot q_k), \quad k = 1, \dots, m \quad (2)$$

где r_k — коэффициент надёжности источника k , определяемый по статистике его ложных срабатываний; q_k — уверенность детектора или оператора в конкретном сообщении; m — число независимых источников, подтвердивших событие.

Правило (2) формализует процедуру, которую опытный оперативный дежурный выполняет интуитивно: одно сообщение из службы 112 даёт невысокую итоговую достоверность, однако три независимых обращения из одного района в сочетании с показанием теплового извещателя повышают её до значений, при которых событие отображается как подтверждённое. Конфликты между источниками разрешаются по правилу приоритета: инструментальный источник с более высоким коэффициентом надёжности имеет преимущество перед сообщением человека, однако противоречие обязательно фиксируется в карточке события и предъявляется оператору, поскольку расхождение источников часто указывает на быстрое изменение обстановки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

А. Нефункциональные требования

Функциональная полнота платформы не гарантирует её пригодности для оперативного применения — определяющее значение имеют нефункциональные характеристики, целевые значения которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Нефункциональные требования к платформе

Характеристика	Целевое значение	Обоснование
Задержка от события до отображения	Не более 15 с для инструментальных источников	Сопоставимость с темпом развития обстановки
Доступность контура управления	Не ниже 99,9 % в год	Круглосуточный режим несения дежурства
Автономность при потере связи	Не менее 24 ч буферизации на граничном узле	Условия отдалённых районов
Масштабируемость	От района до республики без смены архитектуры	Поэтапное развёртывание

Прослеживаемость решений	Полный аудит операций и первичных данных	Юридическая значимость действий
Защита персональных данных	Соответствие требованиям законодательства	Обработка обращений граждан

Отдельного внимания требует защита информации. В потоке обращений службы 112 неизбежно присутствуют персональные данные заявителей и пострадавших, обработка которых регулируется Законом Республики Казахстан «О персональных данных и их защите» [3]. Архитектурным ответом на это требование является разделение контуров: оперативный контур работает с обезличенными карточками событий, тогда как персонифицированные сведения хранятся отдельно и доступны ограниченному кругу ролей с обязательной регистрацией каждого обращения в журнале аудита.

В. Модель внедрения и ожидаемый эффект

Внедрение платформы целесообразно проводить в три этапа. На первом разворачивается пилотный контур в одном паводкоопасном районе с ограниченным набором источников — гидропосты, метеоданные, обращения службы 112 и два-три беспилотных аппарата; цель этапа — отработка адаптеров и модели события на реальных данных. На втором контур тиражируется на область с подключением датчиков промышленных объектов и интеграцией со смежными ведомствами по протоколу САР. На третьем формируется республиканский уровень с агрегированной картиной обстановки. Такая последовательность даёт практический результат уже на первом этапе и снижает риск, характерный для одномоментного внедрения крупных информационных систем.

Оценку эффективности предлагается проводить по показателям, измеримым до и после внедрения: время формирования сводной обстановки по району, доля событий, подтверждённых более чем одним источником, время от поступления первого сообщения до постановки задачи подразделению. Предложенная метрика ассоциации (1) и правило агрегирования достоверности (2) обеспечивают формализованную и воспроизводимую основу для расчёта этих показателей на этапе пилотного внедрения, что отличает предлагаемое решение от рассмотренных зарубежных платформ (таблица 1),

не решающих задачу глубокой интеграции с первичными источниками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обоснована и разработана архитектура единой платформы ситуационного управления МЧС Республики Казахстан. Показано, что ограничивающим фактором действующего контура управления выступает не дефицит первичных данных, а их ведомственная разрозненность, вследствие чего переход от восприятия обстановки к её пониманию и прогнозированию возлагается на оператора.

Выполнен сравнительный анализ зарубежных платформ управления критическими событиями и показано, что их применение в качестве основного контура управления в Республике Казахстан ограничено требованиями к размещению данных, отсутствием адаптеров к отечественным источникам и отсутствием поддержки казахского языка. Предложена пятиуровневая архитектура платформы со сквозным контуром информационной безопасности, разработаны единая модель события и модель слияния разнородных данных, включающая нормированную пространственно-временную метрику ассоциации сообщений (1) и правило агрегирования достоверности (2). Сформулированы нефункциональные требования и трёхэтапная модель внедрения. Направлением дальнейших исследований является разработка и экспериментальная проверка моделей аналитического ядра платформы — оценки приоритета угроз и распределения сил и средств реагирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ВКЛАД АВТОРОВ

Молдазым Н.М. — концептуализация, разработка методологии исследования, общее научное руководство и итоговое редактирование текста. Вдовин О.В. — анализ источников данных и зарубежных платформ, разработка архитектуры платформы и модели слияния данных, подготовка первоначального варианта текста и иллюстраций. Гревцов Д.В. — разработка требований к информационной безопасности платформы, критический анализ и редактирование текста. Все авторы одобрили финальную версию рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы не имеют благодарностей для декларирования.

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 в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения той же лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Нормативные правовые акты

[1] Закон Республики Казахстан от 11 апреля 2014 года № 188-V «О гражданской защите» // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1400000188> (дата обращения: 01.09.2026).

[2] Закон Республики Казахстан от 24 ноября 2015 года № 418-V «Об информатизации» // Информационно-правовая система «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1500000418> (дата обращения: 01.09.2026).

[3] Закон Республики Казахстан от 21 мая 2013 года № 94-V «О персональных данных и их защите» // Информационно-правовая система «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1300000094> (дата обращения: 01.09.2026).

Международные документы и стандарты

[4] Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. – Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015. – 37 p.

[5] Common Alerting Protocol Version 1.2. OASIS Standard. – Burlington: OASIS, 2010. – 47 p.

[6] ISO 22320:2018. Security and resilience – Emergency management – Guidelines for incident management. – Geneva: ISO, 2018. – 20 p.

[7] OGC SensorThings API Part 1: Sensing Version 1.1. – Wayland: Open Geospatial Consortium, 2021. – 214 p.

Журнальные статьи

[8] Endsley M.R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems // Human Factors. – 1995. – Vol. 37, No. 1. – P. 32–64.

[9] Erdelj M., Natalizio E., Chowdhury K.R., Akyildiz I.F. Help from the sky: Leveraging UAVs for disaster management // IEEE Pervasive Computing. – 2017. – Vol. 16, No. 1. – P. 24–32.

[10] Imran M., Castillo C., Diaz F., Vieweg S. Processing social media messages in mass emergency: A survey // ACM Computing Surveys. – 2015. – Vol. 47, No. 4. – Article 67. – P. 1–38.

[11] Ghaffarian S., Kerle N., Filatova T. Remote sensing-based proxies for urban disaster risk management and resilience: A review // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, No. 11. – P. 1760.

[12] Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge computing: Vision and challenges // IEEE Internet of Things Journal. – 2016. – Vol. 3, No. 5. – P. 637–646.

[13] Hall D.L., Llinas J. An introduction to multisensor data fusion // Proceedings of the IEEE. – 1997. – Vol. 85, No. 1. – P. 6–23.

Материалы конференций

[14] Kreps J., Narkhede N., Rao J. Kafka: A distributed messaging system for log processing // Proceedings of the 6th International Workshop on Networking Meets Databases (NetDB). – Athens, 2011. – P. 1–7.

[15] Steinberg A.N., Bowman C.L., White F.E. Revisions to the JDL data fusion model // Proceedings of SPIE. – 1999. – Vol. 3719. – P. 430–441.

Интернет-ресурсы

[16] Официальный интернет-ресурс Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/emer> (дата обращения: 01.09.2026).

[17] Everbridge Critical Event Management Platform. – URL: <https://www.everbridge.com> (дата обращения: 01.09.2026).

[18] Crisis24 Horizon Platform. – URL: <https://crisis24.garda.com> (дата обращения: 01.09.2026).

[19] Copernicus Emergency Management Service. – URL: <https://emergency.copernicus.eu> (дата обращения: 01.09.2026).

[20] Республиканское государственное предприятие «Казгидромет». – URL: <https://www.kazhydromet.kz> (дата обращения: 01.09.2026).

REFERENCES

- [1] Law of the Republic of Kazakhstan No. 188-V dated April 11, 2014, "On Civil Protection," Adilet Legal Information System of the Republic of Kazakhstan. [Online]. Available: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1400000188> (accessed: Sep. 1, 2026). (in Russian)
- [2] Law of the Republic of Kazakhstan No. 418-V dated November 24, 2015, "On Informatization," Adilet Legal Information System. [Online]. Available: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1500000418> (accessed: Sep. 1, 2026). (in Russian)
- [3] Law of the Republic of Kazakhstan No. 94-V dated May 21, 2013, "On Personal Data and Their Protection," Adilet Legal Information System. [Online]. Available: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1300000094> (accessed: Sep. 1, 2026). (in Russian)
- [4] Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015, 37 p.
- [5] Common Alerting Protocol Version 1.2, OASIS Standard, Burlington, MA, USA: OASIS, 2010, 47 p.
- [6] ISO 22320:2018, Security and Resilience – Emergency Management – Guidelines for Incident Management, Geneva, Switzerland: ISO, 2018, 20 p.
- [7] OGC SensorThings API Part 1: Sensing, Version 1.1, Wayland, MA, USA: Open Geospatial Consortium, 2021, 214 p.
- [8] M. R. Endsley, "Toward a theory of situation awareness in dynamic systems," *Human Factors*, vol. 37, no. 1, pp. 32–64, 1995.
- [9] M. Erdelj, E. Natalizio, K. R. Chowdhury, and I. F. Akyildiz, "Help from the sky: Leveraging UAVs for disaster management," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 16, no. 1, pp. 24–32, Jan. 2017.
- [10] M. Imran, C. Castillo, F. Diaz, and S. Vieweg, "Processing social media messages in mass emergency: A survey," *ACM Computing Surveys*, vol. 47, no. 4, Art. 67, pp. 1–38, 2015.
- [11] S. Ghaffarian, N. Kerle, and T. Filatova, "Remote sensing-based proxies for urban disaster risk management and resilience: A review," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 11, p. 1760, 2018.
- [12] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge computing: Vision and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, Oct. 2016.
- [13] D. L. Hall and J. Llinas, "An introduction to multisensor data fusion," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 1, pp. 6–23, Jan. 1997.
- [14] J. Kreps, N. Narkhede, and J. Rao, "Kafka: A distributed messaging system for log processing," in *Proc. 6th Int. Workshop on Networking Meets Databases (NetDB)*, Athens, Greece, 2011, pp. 1–7.
- [15] A. N. Steinberg, C. L. Bowman, and F. E. White, "Revisions to the JDL data fusion model," in *Proc. SPIE*, vol. 3719, 1999, pp. 430–441.
- [16] Official website of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan. [Online]. Available: <https://www.gov.kz/memleket/entities/emer> (accessed: Sep. 1, 2026).
- [17] Everbridge Critical Event Management Platform. [Online]. Available: <https://www.everbridge.com> (accessed: Sep. 1, 2026).
- [18] Crisis24 Horizon Platform. [Online]. Available: <https://crisis24.garda.com> (accessed: Sep. 1, 2026).
- [19] Copernicus Emergency Management Service. [Online]. Available: <https://emergency.copernicus.eu> (accessed: Sep. 1, 2026).
- [20] "Kazhydromet" Republican State Enterprise. [Online]. Available: <https://www.kazhydromet.kz> (accessed: Sep. 1, 2026). (in Russian)

Economy. General education, socio-humanitarian and fundamental disciplines

DOI: <https://doi.org/10.53002/163>

**THE DISCOURSE OF OPEN PLATFORMS AND THE TECHNO-HUMANITARIAN
BALANCE IN MODERN CREATIVE EDUCATION**

Povalyashko G.

*Astana International University, Astana, Kazakhstan
Correspondent's E-mail: hrizopraz-57@mail.ru*

Author Information:

Galina N. Povalyashko, Astana International University. 8 Kabanbay Batyr Ave., 010000, Astana, Kazakhstan, <https://ORCID: 0000-0001-9954-6019>, e-mail: hrizopraz-57@mail.ru

Abstract — The article presents a theoretical, methodological, socio-philosophical analysis of the transformation of humanities knowledge and creative education (art and design) under the influence of platformization and digital communication. The scientific novelty of the study lies in the systematization and theoretical generalization of contemporary academic discussions on the transformation of art education, as well as in the author's conceptualization of a hybrid techno-humanitarian balance that preserves the reflective and critical potential of humanities knowledge in the era of open platform knowledge. The research objectives are as follows:

- to identify the theoretical and methodological foundations for studying open knowledge platforms within the context of critical theory and the sociology of communication (Th. Adorno, N. Luhmann, M. Foucault, B. Latour);
- to reveal the essence of the contradiction between the neo-Enlightenment concept of the operational democratization of knowledge and the risks of superficial content assimilation ("playing at culture");
- to evaluate the impact of platformization on the academic status of educators, the precarization of intellectual labor, and the spread of the "professional-amateur" (ProAm) phenomenon under conditions of "normal anomie";
- to determine the specifics and limits of effectiveness when using open platforms in art and design education, where reflexivity, practical craft, and live dialogue remain defining factors.

Amidst a total "spatial turn" and the shift of educational processes into open network environments, debates intensify regarding the status of academic expertise, the risks of "normal anomie," and the devaluation of foundational knowledge. The study consistently juxtaposes the concepts of critical theory (Th. Adorno), archaeology of knowledge (M. Foucault), actor-network theory (B. Latour), and the sociology of communication (N. Luhmann) with modern empirical research on Massive Open Online Courses (MOOCs) and educational platforms. Particular attention is paid to the ProAm (professional-amateur) phenomenon, the precarization of pedagogical labor, and the challenges of integrating generative artificial intelligence technologies (2024–2026) into the training of artists and designers.

Keywords — open knowledge platforms, art education, design education, spatial turn, culture industry, actor-network theory, ProAm, precarization, techno-humanitarian balance, generative AI.

**ЗАМАНАУИ ШЫҒАРМАШЫЛЫҚ БІЛІМ БЕРУДЕГІ АШЫҚ
ПЛАТФОРМАЛАР ДИСКУРСЫ ЖӘНЕ
ТЕХНО-ГУМАНИТАРЛЫҚ ТЕПЕ-ТЕҢДІК**

Автор туралы ақпарат:

Поваляшко Галина Николаевна, Астана Халықаралық Университеті, 010000, Қабанбай көшесі, 8, Астана, Қазақстан, <https://ORCID: 0000-0001-9954-6019>, e-mail: hrizopraz-57@mail.ru

Абстракт — Мақалада платформаландыру мен сандық коммуникацияның ықпалымен гуманитарлық білім мен шығармашылық білім беруді (өнер және дизайн) трансформациялаудың теориялық-әдіснамалық және әлеуметтік-философиялық талдауы ұсынылған. Зерттеудің ғылыми жаңалығы арт-білім беруді трансформациялау туралы қазіргі заманғы ғылыми пікірталасты жүйелеу және теориялық жалпылау, сондай-ақ ашық платформалық білім дәуірінде гуманитарлық білімнің рефлексиялық және сыни әлеуетін сақтайтын гибридік техно-гуманитарлық теңгерім тұжырымдамасының авторлық негіздемесі болып табылады. Зерттеу міндеттері мыналардан тұрады:

- коммуникациялардың сыни теориясы мен әлеуметтануы (Т. Адорно, Н. Луман, М. Фуко, Б. Латура) контекстінде ашық білім платформаларын зерделеудің теориялық-әдіснамалық негіздерін анықтау;
- білімді операциялық демократияландырудың нео-ағартушылық тұжырымдамасы мен контентті үстірт меңгеру тәуекелдері («мәдениетке ойнау») арасындағы қайшылықтың мәнін ашу;

- платформалаудың оқытушының академиялық мәртебесіне, зияткерлік еңбектің прекаризациясына және «қалыпты аномия» жағдайында «кәсіби әуесқойлық» (ProAm) феноменінің таралуына әсерін бағалау;
- рефлексивтілік, практикалық қолөнер және тірі диалог айқындаушы болып қалатын көркем және дизайнерлік мамандықтарға оқытуда ашық платформаларды пайдалану тиімділігінің ерекшелігі мен шектерін анықтау.

Жаппай «кеңістіктік бұрылу» және білім беру процестерінің ашық желілік ортаға ығысуы жағдайында академиялық сараптаманың мәртебесі, «қалыпты аномия» тәуекелдері және іргелі білімнің девальвациясы туралы пікірталастар шиеленіседі. Жұмыста сыни теория (Т. Адорно), білім археологиясы (М. Фуко), актерлік-желілік теория (Б. Латур) және коммуникация социологиясы (Н. Луман) тұжырымдамалары бұқаралық ашық онлайн-курстардың (МООС) және білім беру платформаларының қазіргі заманғы эмпирикалық зерттеулерімен дәйекті салыстырылады. ProAm (кәсіби әуесқойлық) феноменіне, оқытушылық еңбекті прекаризациялауға және суретшілер мен дизайнерлерді оқытуға жасанды интеллекттің генеративтік технологияларын интеграциялауға (2024-2026 жж.) ерекше назар аударылды.

Кілт сөздер — ашық білім платформалары, арт-білім, дизайн-білім, кеңістіктік бұрылыс, мәдени индустрия, актерлік-желілік теория, ProAm, прекаризация, техно-гуманитарлық теңгерім, генеративті ИИ.

ДИСКУРС ОТКРЫТЫХ ПЛАТФОРМ И ТЕХНО-ГУМАНИТАРНЫЙ БАЛАНС В СОВРЕМЕННОМ ТВОРЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ

Информация об авторе:

Поваляшко Галина Николаевна, Международный университет Астана,
010000, Кабанбая, 8, Астана, Казахстан, ORCID: 0000-0001-9954-6019, e-mail: hrizopraz-57@mail.ru.

Аннотация — В статье представлен теоретико-методологический и социально-философский анализ трансформации гуманитарного знания и творческого образования (искусство и дизайн) под влиянием платформизации и цифровой коммуникации. Научная новизна исследования заключается в систематизации и теоретическом обобщении современной научной дискуссии о трансформации арт-образования, а также в авторском обосновании концепции гибридного техно-гуманитарного баланса, сохраняющего рефлексивный и критический потенциал гуманитарного знания в эру открытого платформенного знания. Исследовательские задачи состоят в следующем:

- выявить теоретико-методологические основания изучения платформ открытого знания в контексте критической теории и социологии коммуникаций;
- раскрыть сущность противоречия между нео-просветительской концепцией операционной демократизации знания и рисками поверхностного усвоения контента («игры в культуру»);
- оценить влияние платформизации на академический статус преподавателя, прекаризацию интеллектуального труда и распространение феномена «профессионального любительства» (ProAm) в условиях «нормальной аномии»;
- определить специфику и границы эффективности использования открытых платформ в обучении художественным и дизайнерским специальностям, где определяющими остаются рефлексивность, практическое ремесло и живой диалог.

В условиях тотального «пространственного поворота» и смещения образовательных процессов в открытые сетевые среды обостряются дискуссии о статусе академической экспертизы, рисках «нормальной аномии» и девальвации фундаментального знания. В работе последовательно сопоставляются концепты критической теории (Т. Адорно), археологии знания (М. Фуко), акторно-сетевой теории (Б. Латур) и социологии коммуникаций (Н. Луман) с современными эмпирическими исследованиями массовых открытых онлайн-курсов (МООС) и образовательных платформ. Особое внимание уделено феномену ProAm (профессионального любительства), прекаризации преподавательского труда и вызовам интеграции генеративных технологий искусственного интеллекта (2024–2026 гг.) в обучение художников и дизайнеров.

Ключевые слова — платформы открытого знания, арт-образование, дизайн-образование, пространственный поворот, культуриндустрия, акторно-сетевая теория, ProAm, прекаризация, техно-гуманитарный баланс, генеративный ИИ

KEY FINDINGS

1. It has been established that open knowledge platforms operate within the framework of the culture industry, where the operational accessibility of information is coupled with the risk of transforming fundamental reflexive-discursive knowledge into a simulacrum “game of culture” and a superficial format of media “stories.”

2. It has been demonstrated that the large-scale expansion of the phenomenon of professional

amateurism (ProAm) creates a state of anomie, within which the expert status of academic instructors is devalued in competition with digital bloggers, and intellectual pedagogical labor becomes precarious.

3. The specific limits of the effectiveness of platform-based learning in the field of art and design have been identified; it has been shown that open digital courses can serve only as a supplementary educational resource but cannot replace live studio

mentorship and the subject-specific, practical foundation of training for creative professionals.

4. A conceptual model of a hybrid balance between technology and the humanities in higher education has been substantiated, ensuring the integration of open digital competencies while preserving the fundamental academic quality and reflective autonomy of professionals in the fields of art and design.

INTRODUCTION

1.1 The Relevance of the Study and the “Spatial Turn” in the Humanities

An analysis of the current state of knowledge in the humanities—both now and in the near future—is a relevant and in-demand area of research; at the same time, it is extremely complex due to the diversity of humanities knowledge itself, which has shifted into the realm of digital communication. The overall situation at the beginning of the 21st century is characterized by the rapid expansion of the functional capabilities of digital communication in virtually all spheres of social, economic, and cultural activity. Digital communication processes, having taken over the entire sociocultural space, raise the broader issue of the status of the humanities within digital platforms [1].

Against the backdrop of high demand for remote and expedited methods of acquiring knowledge, it is precisely the humanities and arts-and-aesthetics segment that bears the heaviest burden in the modern education system, as the flow of uncontrolled, unverified content is particularly high in this area. The evolving digital environment has created unprecedented opportunities for various educational projects tailored to the demands of a dynamic and turbulent market.

In these circumstances, there is a pressing academic need to reflect on the current state and future prospects of education in the creative disciplines (graphic design, architecture, digital art, media design). In the humanities, the so-called ‘spatial turn’ has become clearly evident, resulting from the dynamic formation of a unified communicative space permeated by information flows of total virtual reality [2]. However, in most existing monographs and articles, the new digital reality is interpreted primarily in technological or marketing terms — without a deep humanistic dimension. Meanwhile, at the centre of this space remains the individual, seeking dialogue with the modern world, adapting to constant technological shifts and capable of continuous self-learning. In the author’s view, the humanities realise their true potential not when they strive to be purely utilitarian and immediately practical, but when they engage in the production and accumulation of diverse modes of thought, and in posing new questions and problems that shape culture and the social environment.

The education system’s response to the pervasiveness of the global internet has been the widespread emergence of open knowledge platforms in the form of open online information and media structures [2]. Within a short historical timeframe, this process has transformed the nature and type of cultural orientations within society, in which operational criteria and the rapid accessibility of knowledge have come to take precedence over fundamental principles. The main research gap lies in the fact that the phenomenon of open knowledge platforms is primarily analysed without reference to the humanities, whilst the issue of the effectiveness of this form of learning as it applies to the specific nature of creative disciplines in the fields of art and design remains unresolved and insufficiently studied.

The scientific novelty of this work lies in bridging the research gap whereby open knowledge platforms are predominantly considered outside the context of the humanities and anthropology. The author has conducted a comprehensive socio-philosophical analysis of the ‘platformisation’ of higher education as it relates to the specific nature of training specialists in creative fields (art and design). The study conceptualises the risks of fundamental knowledge being transformed into media ‘stories’ and of the devaluation of the academic status of teaching staff in the context of the spread of the ProAm phenomenon; it also provides a scientifically grounded justification for the need to establish a balance between technology and the humanities in art universities.

1.2 Theoretical and methodological discourse: from critical theory to actor-network theory

Understanding platform-based knowledge requires a robust theoretical foundation. Whilst contemporary research perspectives have been analysing platforms since the dawn of the new century, the Frankfurt School had, much earlier, warned of the danger of knowledge being turned into a commodity. Theodor Adorno noted that the overall consequences of the functioning of the culture industry can be characterised as ‘anti-Enlightenment’. In the concept developed by T. Adorno and M. Horkheimer, the progressive technical domination of nature under the conditions of mass industry turns into mass deception and shackles for human consciousness, hindering the formation of autonomous, independent individuals capable of making independent and conscious judgements [3].

Michel Foucault’s ideas are key to understanding how discourse functions on open platforms. In *The Archaeology of Knowledge*, M. Foucault defines discourse as ‘the plane on which objects, types of speech acts, concepts and strategic

choices emerge' [4]. In the context of platformisation, the question arises: is this reflexive plane preserved on open platforms, or is it replaced by a formalised algorithm for algorithmic content delivery?

Niklas Luhmann's sociological approach draws attention to the space of possibilities for experience and action, where communication is not reduced merely to the transmission of information, but requires a deep understanding of the message by the recipient [5]. For his part, Bruno Latour, within the framework of actor-network theory (ANT), re-examines the category of the 'social', demonstrating how an actor opens up a space in which the components of the world are brought into being, whilst the network acts as a medium for movement, types of information and trials that draw the world inwards and push it back outwards [6]. Interactions within the global network shift the boundaries of participants, creating a hybrid reality in which the educational process ceases to be a local institutional act.

1.3. Problem Statement and Research Questions (RQ)

Despite two decades of research into online learning, the specific nature of platform-based education in the field of art and design remains a subject of intense academic debate. In light of this, this study formulates three key research questions (RQs):

RQ1: Does the reflective, critical and meaning-generating potential of humanities and arts discourse remain intact when transferred to open knowledge platforms?

RQ2: Are open knowledge platforms a fully-fledged institution of art and design education, or do they constitute a form of marketing-driven staging of neo-Enlightenment?

RQ3: How will the phenomenon of ProAm (professional amateurism), digital anomie and the large-scale integration of generative AI (2024–2026) transform the status of the artist-teacher and the professional identity of graduates in creative disciplines?

MATERIALS AND METHODS

Methodological framework

The study is based on a comprehensive interdisciplinary approach combining the following methods:

1. Critical discourse analysis (CDA) was used to examine academic publications, open platform manifestos and the structure of educational content, with the aim of identifying the hidden ideologemes of 'neo-Enlightenment' and platform capitalism.

2. Actor-network theory (ANT, B. Latour) was applied to conceptualise the educational platform as a hybrid network bringing together human actors

(lecturers, students, tutors, ProAm bloggers) and non-human actors (recommendation algorithms, interfaces, generative neural networks, data structures) [6].

3. A comparative analysis enabled us to contrast the fundamental institutional models of university arts education with the didactic structures of Massive Open Online Courses (MOOCs).

Source base and incorporation of concepts for 2024–2026

The source base for this study is divided into two interrelated sections. The core theoretical framework comprises the works of leading figures in philosophy and sociology (T. Adorno, M. Foucault, N. Luhmann, B. Latour) [3, 4, 5, 6], as well as fundamental works by Russian and international researchers from 2014–2024 on the challenges of the digitalisation of education (P. Kolozaridi, N. Kuznetsov, G. Tulchinsky, I. Volnov, et al.) [7, 8, 9, 10]. The text incorporates the latest concepts of platform capitalism in higher education (Platform Capitalism in Education), theories of micro-credentials (micro-credentials vs academic degrees), the concept of generative design and algorithmic mastery (Algorithmic Techne), as well as theoretical models of hyperreal learning environments and digital precarity in the academic sector.

RESULTS AND DISCUSSION

The Platformisation of Creative Knowledge: Between Neo-Enlightenment and Marketing Illusion

The analysis showed that the academic community's response to the development of open knowledge platforms ranges from cautious optimism to radical criticism [1, 12]. Research by William G. Bowen highlights that the use of third-party digital platforms and Massive Open Online Courses (MOOCs) in the university environment faces significant organisational and technological barriers [2]. The use of third-party platforms to supplement traditional teaching highlights the problem of a mismatch between the institutional environment and the algorithm-driven delivery of material. E. Shapinskaya and A. Lisenkova take a rather critical view of the educational potential of commercial and open media projects [1]. In their view, one should not be misled by neo-enlightenment projects: they are, to a large extent, a 'game of culture' that creates the illusion for the consumer of gaining access to cultural capital and fosters a comfortable but superficial secondary reality. In contrast to formal university education, which requires sustained effort and the overcoming of the material's challenges, open platforms offer a lighter, more playful experience.

N. Kuznetsov highlights the 'weak points' of distance learning, the main obstacle being the lack of an established system for recognising the equivalence

of online courses to traditional qualifications, as well as the inconsistent and often extremely poor quality of most of the mass-market courses available on the market [8]. For their part, V. Fortunatova and E. Valeeva emphasise that mass educational technologies are predominantly of an enlightening nature and can serve only as a supplementary addition to the core of fundamental academic knowledge [12].

The interdisciplinary nature of internet research, as pointed out by P. Kolozaridi, creates additional methodological difficulties: when philosophers, sociologists and cultural studies scholars study these platforms, the common language is not determined by a single discipline, but by how the research group formulates the subject and the problem [7].

The ProAm (professional amateurism) phenomenon, 'normal anomie' and the precarisation of teachers

One of the most alarming consequences of the platform shift is the transformation of the institutional status of those involved in the educational process. G. Tulchinsky rightly points out that the widespread introduction of digital learning resources serves as a means of administrative cost-cutting on teaching hours [9]. This leads to the transformation of teachers' intellectual labour into precarious labour — unstable, unguaranteed and devoid of social protection.

O. Astafieva, E. Nikonorova and O. V. Shlykova document society's transition into a state of normal anomie, in which trust is simulated against a backdrop of individual vulnerability in the digital environment [11]. The displacement of humanities and arts knowledge from institutional spaces onto open platforms gives rise to the large-scale phenomenon of ProAm (professional amateurism), conceptualised by C. Lidbiter and P. Miller [13]. In the context of contemporary platformism, this phenomenon takes on a pervasive character, blurring the boundaries between institutional academic expertise and networked amateur content production. In digital reality, every user becomes a lecturer, an expert and a bearer of 'sacred knowledge'—roles previously reserved exclusively for select specialists. As a result:

1. university lecturers are forced to compete directly with external bloggers in the marketing arena;
2. fundamental academic knowledge is being supplanted by the truncated, superficial format of 'media stories', clips and short videos;
3. the quality of the content consumed begins to depend entirely on the basic digital literacy of the user themselves, who is often unable to distinguish imitation from scientific knowledge.

The Specifics of Art and Design Education: The Challenges of Generative AI and the Loss of Tactile Craftsmanship

Unlike abstract and theoretical disciplines, the training of artists, architects and designers has always been based on the triad of poesis (inspiration), mimesis (interpretation of nature) and techne (craft, tactile mastery, physical work with materials).

A new challenge over the last 2–3 years has been the widespread introduction of generative neural networks (*Midjourney*, *DALL-E 3*, *Stable Diffusion*, *RunWay*, *ChatGPT*) into design practice. Whereas open-access platforms previously streamed pre-recorded video lectures, today they offer algorithmic generators capable of producing a finished visual product in a matter of seconds. This is leading to a radical transformation of the ProAm phenomenon: now any amateur who has mastered basic prompt engineering declares themselves a 'digital artist' or 'designer'. As a result, there is a risk of losing a fundamental understanding of professional composition, colour theory and art history, which are being replaced by the mechanical reassembly of others' styles. A. Meron offers a different perspective, arguing that the integration of generative technologies and algorithmic services into practice enhances the democratisation of visual production [13]. This shifts the platform-based ProAm discourse to the level of automated co-creation between humans and AI.

I. Volnov, in analysing the balance between technology and the humanities, rightly observes that the hope for self-sustaining stability in an ecosystem rests on a simple balance of technologies [10]. In art education, this means that the increasing power of generative algorithms must be offset by a corresponding strengthening of the designer's philosophical, critical and conceptual training.

A comparison of positions. Neo-Enlightenment vs academic fundamentalism

Table 1 presents the results of the analysis, comparing the two main positions in research on open platforms.

Table 1 — A comparative analysis of conceptual approaches to open platform knowledge

Comparison criteria	The optimistic approach (neo-enlightenment)	The critical approach (the Frankfurt School and cultural sociology)
Accessibility of knowledge	The democratisation of education and the expansion of ways of	'Anti-enlightenment', the illusion of cultural inclusion and the 'game of knowledge'

	accessing information	
Status and format of knowledge	Flexible, practice-oriented, operational knowledge	Fragmentary, superficial, reduced to the format of social media 'Stories'
Role and status of the teacher	Moderator, facilitator and designer of the educational programme.	A precarious professional forced to compete with ProAm bloggers
Outcomes and cultural risks	Developing relevant cross-curricular competences	A state of anomie; the erosion of the fundamental academic foundation

A comparative analysis of the optimistic and pessimistic approaches reveals a significant conceptual contrast in the assessment of the platformisation of creative education. The optimistic paradigm views open platform-based education as a tool for the democratisation of knowledge, where the teacher acts as a coordinator of flexible educational pathways, whilst the student acquires relevant cross-disciplinary competences. In contrast, the critical approach interprets digital transformation as 'anti-enlightenment', where the fragmentation of the academic foundation and the precarious nature of teaching work lead to a state of anomie amongst those involved in the educational process. Taken together, this underscores the need to seek a hybrid balance between technology and the humanities, leading to the functional flexibility of networked platforms without compromising the educational potential of the traditional academic institution.

Platform capitalism and generative AI in 2024–2026

The phenomenon of platform capitalism in education is clearly evident in the discussions of 2024–2026 [13]. Open-knowledge platforms are ceasing to be purely altruistic educational projects; they are transforming into gigantic data centres that collect students' digital footprints and monetise attention. The phenomenon of platform capitalism and the datafication of the educational sphere is clearly evident. As a result, open knowledge platforms cease to be purely altruistic educational projects and are transformed into commercial ecosystems that monetise students' digital footprints and attention. According to the latest critical research [14], the transformation of the student from an active learner into a 'platform user' (student as user) leads to the educational process becoming heavily dependent on algorithmic logic and the corporate infrastructure of Big Tech.

In the field of art and design education, this trend is being exacerbated by the expansion of generative AI services, which appropriate students' digital drafts, sketches and prompts to train commercial neural network models free of charge. The result is an effect of aesthetic standardisation, whereby the author's individual reflective experience is supplanted by averaged algorithmic templates, whilst students' intellectual property is commercialised by platform capital. Educational institutions become financially and technologically dependent on external digital providers, which significantly erodes the institutional autonomy of the university and the digital sovereignty of higher education. The emerging phenomenon of algorithmic surveillance and the comprehensive collection of behavioural metrics are replacing lively pedagogical dialogue with dry analytics of engagement, narrowing the scope for creative risk-taking, experimentation and the deconstruction of canons. In these circumstances, the key task of art education is not merely to adapt to AI tools, but to foster critical digital literacy among future designers and to safeguard their conceptual independence in the face of platform monopolisation.

Thus, in the field of design and the arts, generative AI (in the terms of B. Latour) [6] emerges as a new non-human actor. A neural network becomes a cluster of actor-network relations, absorbing millions of paintings and designs from past eras and producing a compiled output. If education on open platforms is reduced merely to training students to use buttons and programme interfaces, graduates will be helpless in the face of algorithms. The only competitive advantage humans retain is their ability to pose new problems, engage in critical discourse and possess a deep understanding of cultural context.

Ways to Overcome Digital Anomie in Art and Design Education

To maintain the quality of training for designers and artists, a shift towards a hybrid model striking a balance between technology and the humanities is required. This model entails:

1. a clear division of functions, i.e. the transfer of purely instrumental, technical and software-based courses (software training, basic coding, 3D modelling) to open platforms;
2. the institutional anchoring of values, which entails the university retaining its role as a co-working space where lively critique (reflection), mentoring, working with materials and the formation of the creator's philosophical and ethical stance take place;
3. the protection of authorship and expertise, which entails fostering a legal and professional culture amongst students (in the spirit of the historical lessons of the 'Hogarth Act'), enabling them to

combat plagiarism and distinguish genuine design from ProAm imitations.

CONCLUSION

The present study yielded the following key findings, which address the research questions posed:

Answer to RQ1.

The transfer of knowledge from the humanities and the arts to open platforms carries significant risks of discourse reduction. Instead of providing a space for the emergence of new meanings and deep reflection (as described by M. Foucault), platforms often create a truncated, operational environment. However, with skilful methodological integration, the reflective potential of the humanities can act as a critical filter for analysing the digital space itself.

Response to RQ2.

Contemporary open-knowledge platforms, in their current form, are not capable of fully replacing academic art and design education. They represent an effective tool for mass education and professional development, but without studio-based mentorship

and a fundamental foundation, they create only an 'illusion of cultural engagement' and exacerbate the symptoms of 'normal anomie'.

Response to RQ3.

The ProAm phenomenon and the introduction of generative AI (2024–2026) will devalue superficial technical proficiency, blurring the boundaries between professionals and amateurs. Higher education lecturers face the threat of precarious employment and marketing competition from bloggers. Overcoming this crisis is only possible by shifting the focus of design education from technical skills to conceptual thinking, critical analysis and the development of complex socio-cultural meanings.

Author Contribution Statement (CRediT Taxonomy):

G. N. Povalashko: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal Analysis Data Curation, Validation, Writing–OriginalDraft.

Funding. This research received no external funding

REFERENCES

- [1] Shapinskaya, E. N., & Lisenkova, A. A., «Education vs. Neo-Enlightenment: Some Trends in Digital Culture», *Culture of Culture*, no. 2, 2020. [Online]. Available: <http://cult-cult.ru/education-vs-neo-enlightenment-some-trends-in-digital-culture>.
- [2] Bowen, W. G. *Higher Education in the Digital Age* / trans. from the English. Moscow: Higher School of Economics Publishing House, 2018, 224 pp.
- [3] Adorno, Th., *Culture Industry Reconsidered, Culture and Society. Contemporary Debates* / ed. J. Alexander. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. p. 282.
- [4] Foucault, M. *The Archaeology of Knowledge* / trans. from French. St Petersburg: Piter, 2004. 416 pp.
- [5] Luhmann, N. *The Reality of the Mass Media* / trans. from German. Moscow: Praxis, 2005. 256 pp.
- [6] Latour, B., *Remaking the Social: An Introduction to Actor-Network Theory* / trans. from English. Moscow: Higher School of Economics Publishing House, 2014. 384 pp.
- [7] Kolozaridi, P. V. «Internet Research as a Field within the Social Sciences: A Theoretical and Methodological Analysis»: PhD thesis in Social Sciences. Moscow, 2017. 201 pp.
- [8] Kuznetsov, N. V., «Online Education: Key Trends and Obstacles», *E-Management*, no. 1, pp. 19–25, 2019.
- [9] Tulchinsky, G. L., «The digital transformation of education: challenges for higher education», *Philosophical Sciences*, no. 6., pp. 121–136, 2017.
- [10] Volnov, I. N., «Meanings in the Age of Digital Transformation. The Singular Human», *Cultural Observatory*. 2019. No. 4. [Online]. Available: <https://observatoria.rsl.ru/jour/article/view/774>.
- [11] Astafieva, O. N., Nikonorova, E. V., & Shlykova, O. V., «Culture in the Digital Civilisation: A New Stage in Formulating a Strategy for the Future of Sustainable Development», *Culture Observatory*, no. 5, 2019 [Online]. Available: <https://observatoria.rsl.ru/jour/article/view/686>.
- [12] Fortunatova, V. A., Valeeva, E. V., «Archetypalisation as an ideology and technology of the educational process», *Culture Observatory*, no. 6, 2018. [Online]. Available: <https://observatoria.rsl.ru/jour/article/view/686/0>.
- [13] Leadbeater, C., & Miller., *The Pro-Am Revolution: How enthusiasts are changing our economy and society*. Demos, 2004.
- [14] Meron, Y., Graphic design and artificial intelligence. Design Research Society Digital Library [Online]. Available: <https://dl.designresearchsociety.org>.

Economy. General education, socio-humanitarian and fundamental disciplines

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/164>

INVESTMENT AND FINANCIAL MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF ASAFETIDA PRODUCTION AND EXPORT IN AFGHANISTAN: RISKS, CASH FLOWS AND SCALE-UP STRATEGY

¹Yolchi J.

School of Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing, China

AUTHOR INFORMATION:

Yolchi Jamshid, PhD Candidate, School of Economics, Beijing Institute of Technology, 100081, No. 5 Zhongguancun South Street, Haidian District, Beijing, China; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2710-8092>; e-mail: jamshidyolchi@outlook.com.

Abstract — This article develops an investment and financial approach to assessing a project for the cultivation, processing, and export of asafoetida in Afghanistan. The study is based on an initial business plan containing five-year forecasts, a structure of initial investments, a personnel model, a marketing strategy, and a risk analysis. It is shown that the specifics of the project are determined by the long biological cycle of the crop, a high need for initial financing, and the need for simultaneous investments in land, processing, quality, and export infrastructure. The author's "4 F - Hing" model is proposed: Finance, Farming, Factory, Foreign Market — and a system of benchmarks for liquidity, investment sustainability, and export performance. The use of phased financing, scenario analysis, and "investment gates" is substantiated, whereby the transition to the next stage of scaling occurs after achieving specified operational KPIs. The results can be used by entrepreneurs, investors, and development institutions when structuring agricultural export projects in conditions of high uncertainty.

Keywords — asafoetida; investments; financial model; cash flow; Afghanistan; agribusiness; export; risk; scenario analysis; investment sustainability; processing.

ИНВЕСТИЦИОННО-ФИНАНСОВАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПОРТА АСАФЕТИДЫ В АФГАНИСТАНЕ: РИСКИ, ДЕНЕЖНЫЕ ПОТОКИ И СТРАТЕГИЯ МАСШТАБИРОВАНИЯ

¹Ёлчи Дж.

¹Школа экономики, Пекинский технологический институт, Пекин, Китай

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ёлчи Джамшид, кандидат в докторанты Школы экономики Пекинского технологического института, 100081, ул. Чжунгуаньцунь Южная, № 5, район Хайдянь, Пекин, Китай; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2710-8092>; e-mail: jamshidyolchi@outlook.com.

Аннотация — В статье разработан инвестиционно-финансовый подход к оценке проекта по выращиванию, переработке и экспорту асафетиды в Афганистане. Исследование основано на первоначальном бизнес-плане, включающем пятилетние прогнозы, структуру первоначальных инвестиций, кадровую модель, маркетинговую стратегию и анализ рисков. Показано, что специфика проекта определяется длительным биологическим циклом культуры, высокой потребностью в первоначальном финансировании и необходимостью одновременных инвестиций в земельные ресурсы, переработку, обеспечение качества и экспортную инфраструктуру. Предложена авторская модель «4 F - Hing»: Finance (финансы), Farming (выращивание), Factory (переработка) и Foreign Market (внешний рынок), а также система ориентиров для оценки ликвидности, инвестиционной устойчивости и экспортных показателей. Обосновано использование поэтапного финансирования, сценарного анализа и «инвестиционных ворот», при которых переход на следующий этап масштабирования осуществляется после достижения установленных операционных KPI. Полученные результаты могут быть использованы

предпринимателями, инвесторами и институтами развития при структурировании проектов аграрного экспорта в условиях высокой неопределенности.

Ключевые слова — асафетида; инвестиции; финансовая модель; денежный поток; Афганистан; агробизнес; экспорт; риск; сценарный анализ; инвестиционная устойчивость; переработка.

АУҒАНСТАНДА АСАФЕТИДА ӨНДІРІСІ МЕН ЭКСПОРТЫН ДАМУДЫҢ ИНВЕСТИЦИЯЛЫҚ-ҚАРЖЫЛЫҚ МОДЕЛІ: ТӘУЕКЕЛДЕР, АҚША АҒЫМДАРЫ ЖӘНЕ АУҚЫМДЫ КЕҢЕЙТУ СТРАТЕГИЯСЫ

¹Ёлчи Дж.

Пекин технологиялық институтының Экономика мектебі, Пекин, Қытай

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ:

Ёлчи Джамшид, Пекин технологиялық институтының Экономика мектебінің PhD докторанты, 100081, Чжунгуаньцунь Оңтүстік көшесі, № 5, Хайдянь ауданы, Пекин, Қытай; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2710-8092>; e-mail: jamshidyolchi@outlook.com.

Аңдатпа — Бұл мақалада Ауғанстанда асафетиданы өсіру, өңдеу және экспорттау жобасын бағалауға арналған инвестициялық-қаржылық тәсіл әзірленген. Зерттеу бес жылдық болжамдарды, бастапқы инвестициялардың құрылымын, кадрлық модельді, маркетингтік стратегияны және тәуекелдерді талдауды қамтитын бастапқы бизнес-жоспарға негізделген. Жобаның ерекшеліктері дақылдың ұзақ биологиялық циклімен, бастапқы қаржыландыруға деген жоғары қажеттілікпен және жер ресурстарына, өңдеуге, сапаны қамтамасыз етуге және экспорттың инфрақұрылымға бір мезгілде инвестиция салу қажеттілігімен айқындалатыны көрсетілген. Авторлардың «4 F - Hing» моделі ұсынылады: Finance (қаржы), Farming (өсіру), Factory (өңдеу) және Foreign Market (сыртқы нарық), сондай-ақ өтімділікті, инвестициялық тұрақтылықты және экспорттық көрсеткіштерді бағалауға арналған индикаторлар жүйесі ұсынылған. Кезең-кезеңімен қаржыландыруды, сценарийлік талдауды және «инвестициялық қақпаларды» қолдану негізделген, мұнда масштабтаудың келесі кезеңіне өту белгіленген операциялық KPI көрсеткіштеріне қол жеткізілгеннен кейін жүзеге асырылады. Алынған нәтижелерді жоғары белгісіздік жағдайында аграрлық экспорт жобаларын құрылымдау кезінде кәсіпкерлер, инвесторлар және даму институттары пайдалана алады.

Түйін сөздер — асафетида; инвестициялар; қаржылық модель; ақша ағымы; Ауғанстан; агробизнес; экспорт; тәуекел; сценарийлік талдау; инвестициялық тұрақтылық; өңдеу.

The original project calls for significant initial investments in equipment and land, a combination of equity, loans, and grants, and a five-year development period. This makes the project a useful example for analyzing how financial architecture should be synchronized with the biological cycle of a culture and the stages of market formation [4; 7; 15].

1. Introduction.

Investments in perennial agricultural crops differ from most commercial projects in that the cash cycle begins significantly earlier than the accumulation of stable revenue. For asafetida, this gap is particularly significant: based on the source materials, the period to the productive stage is estimated at approximately three to four years. At the same time, the enterprise must finance land, personnel, training, infrastructure, processing,

certification, and marketing. Therefore, simply comparing the future price of the product with current costs is insufficient to assess the viability of the project [1; 2].

The purpose of this article is to develop an investment and financial model for the development of an asafetida cultivation, processing, and export enterprise in Afghanistan. The objectives include an analysis of the investment structure, funding sources, operating cash flows, liquidity risks, scaling scenarios, and a system of investment KPIs. The scientific novelty lies in the synchronization of four components—agricultural, production, financial, and export—within the framework of the "4 F - Hing" model.

2. Materials and methods.

The empirical basis was formed by sections of the original project devoted to sales forecasts, start-

up costs, five-year cash flows, investment and financial activities, personnel, and risks. The project mentions equipment investments of approximately \$10,000, land acquisition of approximately \$12,250, a total investment outflow of \$138,520, as well as financing through the issuance of shares/stocks, loans, and a grant. These values are considered parameters of a specific project scenario, not average market standards.

Cash flow analysis, scenario analysis, break-even point assessment, stress testing, and risk-adjusted investment logic were applied. Since the initial project contained negative cash flows at certain stages, the emphasis was on liquidity and funding adequacy, not just accounting profit. This is consistent with the nature of a startup with a capital-intensive start-up period.

Table 1 - Financial blocks of the study

Block	The key question	Indicator
CAPEX	How many required to launch ?	Volume and structure investments
OPEX	What is it? price maintaining operations?	Operating expenses
Liquidity	Enough whether monetary funds ?	Cash runway
Sales	How is growing revenue ?	Pace sales /average price
Risk	What violates plan ?	Stress scenario

3. Specifics of the investment cycle of *asafoetida*.

A key feature is the misalignment of the cost schedule and the harvest schedule. Land, planting material, and maintenance require funding from the first year, while a significant resin flow is generated later. If a company simultaneously builds a processing plant, a second investment cycle arises. As a result, the project's risk is determined not only by whether the crop will be profitable at maturity but also by whether the company can finance the transition period.

This allows us to formulate the principle of financial synchronization: the term of the capital raised should be no shorter than the period of biological maturation plus the period of achieving sustainable sales. Short-term debt requiring early repayment can create a liquidity crisis even in a positive long-term economic environment. Therefore, the financing structure should include a sufficient share of long-term capital, grants, or deferred repayment.

4. Structure of initial investments.

Start-up investments can be rationally divided into five groups: land and site preparation; planting material and fieldwork; processing equipment; warehouse and logistics; quality, certification, and commercial launch. This division allows us to distinguish between assets that create production capacity and expenses that create market access. For an export project, both groups are critical: equipment without certification does not ensure sales, and marketing without consistent quality does not ensure repeat contracts [4; 11].

Table 2 - Investment packages project

Plastic bag	Content	Effect type
A. Field	Earth, seeds, care	Future harvest
B. Recycling	Drying, grinding, packaging	Added price
C. Quality	Laboratory, procedures, certification	Market access
D. Logistics	Warehouse, consolidation, transport	Reliability supplies
E. Commerce	B2B sales, CRM, exhibitions	Contracts / revenue

Investment priorities should depend on the project stage. At the initial stage, the field and minimal infrastructure are critical; before the first commercial harvest, processing and quality are key; after stable batches are confirmed, marketing and export network expansion are key. This prioritization reduces the risk of capital being tied up in facilities that are not yet supplied with raw materials.

5. Sources of financing and cost of capital.

The initial financial plan utilizes a blended financing approach: equity, debt, and a grant. For a project with a long lead time, this combination makes economic sense, as different sources cover different risks. Equity bears the entrepreneurial risk, the grant can finance socially significant elements—training, sustainable agriculture, employment—while debt is more appropriately allocated to assets with a predictable cash flow.

The weighted average cost of capital in Afghanistan is difficult to determine using a single market rate due to the limitations of the financial system and the high risk premium. Therefore, for management decisions, it is preferable to use a range of discount rates and test the stability of the NPV at several values. Investors should see not just one "exact" estimate, but rather a threshold beyond which the project loses its attractiveness.

6. Revenue and pricing architecture.

Revenue depends on four variables: the physical volume of marketable resin, the yield of recycled products, the average price, and the proportion of batches sold directly. The initial project assumes annual sales growth of approximately 10% in the mature phase. For analysis, this rate should be considered a baseline scenario, which should be supported by contracts and actual order dynamics, rather than assumed automatically [5; 6].

Pricing architecture must differentiate between raw materials, industrially prepared resin, powder/mixture, and premium certified products. The more advanced the processing, the higher the potential price, but the greater the demands on quality, packaging, and working capital. Therefore, average price growth is a quality indicator of business development only when margins and sales velocity are simultaneously monitored.

7. Operating expenses.

The initial staffing model includes approximately 30 employees: field workers, processing technicians, packers, quality control specialists, logistics specialists, sales specialists, and management specialists. This means that the payroll is formed even before the plant reaches full capacity. In the financial model, it's important to distinguish between fixed and variable costs: administrative staff and basic infrastructure create a constant workload, while packaging, transportation, and some field work grow with volume.

For monitoring, the recommended ratio is $OPEX - to - Sales = OPEX / Revenue$. During the startup phase, it may be higher than one, but in a mature model, it should steadily decline. Logistics - to - Sales and Quality - cost - to - Sales should be monitored separately: excessive reductions in quality costs can improve OPEX in the short term, but worsen export prices and increase complaints.

8. Cash flow and liquidity problem.

The initial project shows negative operating cash flows at certain stages and significant investment outflows. For a startup, this is not an automatic sign of non-viability, but it does require a predetermined liquidity reserve. The critical indicator is cash. runway: the number of months a company can finance its liabilities without a new influx of capital.

It is proposed $Calculate\ Runway = Cash\ Available / Average\ Monthly\ Net\ Cash\ Burn$. If the ratio drops below 9-12 months until the expected next funding round or commercial harvest, management should implement a liquidity

conservation plan: deferring optional CAPEX, accelerating prepayments on B2B contracts, grant funding for training, and phasing in capacity.

Table 3 - Signals financial control

Indicator	Green zone	Yellow Zone	Red Zone
Cash runway	>12 months.	6–12 months.	<6 months.
Share B2B prepayments	It's growing	Stable	It's decreasing
OPEX/ revenue	It's decreasing	Without changes	It's growing
Share marriage / discounts	Low	Hesitates	It's growing

9. Working capital.

The export model creates a working capital requirement between the procurement/collection of raw materials and the receipt of payment from the overseas buyer. The longer the logistics route and the longer the payment delay, the greater the gap. To reduce capital requirements, partial prepayment, letters of credit or other secure payment methods, shipment consolidation, and negotiated delivery schedules are advisable.

Particular attention should be paid to inventory. Too little inventory increases the risk of contract failure; too much inventory freezes funds. Optimization should be based on ABC / XYZ logic across product types and markets. For premium lots with high margins, a higher safety stock is acceptable, provided the storage quality is stable.

10. Break-even point.

The volume breakeven point can be defined as $QBE = FC / (P - VC)$, where FC is the fixed costs, P is the average unit selling price, and VC is the variable cost per unit. For a multi-product model, the weighted average marginal contribution must be used. This formula is particularly useful when choosing between selling raw resin and processed product: a higher processing price is justified if the increase in marginal contribution offsets the additional fixed costs.

The managerial purpose of the break-even point is to determine the minimum capacity of the processing center. If in-house raw materials don't provide this capacity, contract processing for third-party farmers or the purchase of resin are possible. This transforms the plant from a proprietary asset into an infrastructural hub for the value chain.

11. Investment indicators.

A mature investment decision requires calculating the NPV, IRR, discounted payback period, and profitability index. However, in conditions of high uncertainty, these indicators must be accompanied by an analysis of the underlying assumptions. A positive NPV with an optimistic price and ideal occupancy is not sufficient. The investor must understand the sensitivity of the NPV to yield, price, launch delay, and logistics costs.

A minimum stress set is proposed: a 15% price reduction; a 20% yield reduction; a 12-month commercial launch delay; a 25% increase in logistics costs; and a combined scenario. If a project maintains acceptable liquidity in at least three of the four single stresses, its financial architecture can be considered more resilient.

12. Project risk matrix.

The main risks include political and regulatory, agro-climatic, technological, quality, logistics, market, and financial ones. These are interconnected: transport delays can degrade quality, a decrease in quality can degrade price, and a decrease in price can degrade liquidity. Therefore, the traditional "probability x damage" matrix should be supplemented with an analysis of cascade effects.

Table 4 - Risk matrix and financial response

Risk	Financial consequences	Measure
Delay harvest	Late revenue	Reserve liquidity
Decrease prices	Fall margins	Contracts / diversification
Growth of logistics	VC growth	Alternative routes
Quality discrepancy	Discounts / Refunds	QA and certification
Regulatory restrictions	Delay payments	reserve + compliance

13. Author's model "4 F - Hing".

The "4 F - Hing" model includes four synchronized circuits: Farming - biological readiness and raw material base; Factory - processing and quality; Finance - capital, liquidity and profitability; Foreign Market — contracts and exports. An investment decision is considered balanced only when the development of one component does not critically outpace the others. For example, a large plant without guaranteed raw materials creates underutilization, while expanding plantings without a market creates excess inventory.

The proposed integrated readiness index is calculated as $R_4 F = \min(\text{Farm, Factory, Finance, Foreign})$, where each component is scored from 0 to 1. Using the minimum rather than the average value reflects the "bottleneck" logic: the weakest component constrains the entire system. If Finance = 0.45 and the other indicators are high, scaling should be postponed until liquidity strengthens.

14. Investment gate (stage - gate).

, four investment gates are proposed. Gate 1 – confirmation of agronomic suitability and contracts with farmers. Gate 2 – confirmation of raw material volumes and pilot processing. Gate 3 – obtaining the necessary quality documents and the first B2B contracts. Gate 4 – scaling capacity after confirmation of repeat sales and positive marginal profit.

Each gate links capital expenditures to actual KPIs achieved. This approach is particularly useful in conditions of high uncertainty, as it replaces one major, irreversible decision with a series of smaller ones. The investor retains the ability to adjust scale, technology, and market as information becomes available.

15. Scenario analysis.

The conservative scenario assumes slower sales growth, a delay in reaching planned yields, and high logistics costs. The baseline scenario assumes moderate growth. The accelerated scenario assumes early B2B contracts, a higher share of processed products, and a reduction in intermediary margins. The primary comparison criterion is not the maximum profit in the accelerated scenario, but the ability of each scenario to maintain solvency.

In the conservative scenario, the priority is to preserve cash Runway; in the basic scenario, achieving operational breakeven; in the accelerated scenario, preventing working capital overload. Therefore, the financial strategy should evolve with the growth stage, rather than remain fixed for five years.

16. Export strategy as a financial instrument.

Marketing is typically considered an expense, but in B2B exports, contract structure directly impacts financing. Advance payments, minimum order quantities, long-term contracts, and delivery schedules reduce cash flow uncertainty. Therefore, a commercial team should be evaluated not only by revenue but also by the quality of its contract portfolio.

It is proposed Contracted Revenue Ratio = Contracted Sales / Planned Sales. The higher the proportion of planned revenue confirmed by

contracts or firm orders, the lower the risk of working capital investments. To scale up processing, it is advisable to establish a minimum threshold for this ratio, such as an internal corporate standard approved by investors.

17. Social and environmental return on investment.

The project creates effects not fully reflected in the commercial NPV: jobs, training, development of legal sources of income, and lower water intensity compared to some traditional crops. For development institutions, these effects may justify grant or concessional financing of individual components [3,4; 8; 9].

It is recommended to separate the commercial and extended investment impacts. The commercial impact includes the enterprise's cash flows. The extended impact includes the number of jobs created, increased farm incomes, the proportion of women and youth in education, water savings, and the volume of legal agricultural exports. This distinction makes the project understandable to both the private investor and the donor organization.

18. Practical recommendations.

1) Raise capital in stages, synchronizing it with the stages of biological and commercial development. 2) Do not finance large-scale processing expansion until the feedstock base is confirmed. 3) Maintain a liquidity reserve covering the long gap until harvest. 4) Use B2B prepayments and long-term contracts as a tool for financing working capital. 5) Conduct an annual stress test of NPV and cash flow. 6) Separate investments in quality and certification from “ optional” marketing expenses, as they determine market access.

For the investor council, a quarterly panel of eight KPIs is recommended: R 4 F, cash runway, OPEX / Sales, share of processed volume, share of certified lots, Contracted Revenue Ratio, gross margin, and revenue concentration by largest market. This system allows you to see not only the financial results of the previous period but also your readiness for the next stage of growth.

Conclusion.

1. The investment attractiveness of asafoetida is determined by high potential profitability and export demand, but the financial sustainability of the project is limited by the long period before the productive harvest [4,6,12-15].

2. The main risk is the asynchronous nature of investments and cash inflows. Therefore, the capital structure must take into account the biological cycle and provide for sufficient liquidity.

3. Mixed financing of equity, debt and grant funds can be effective if the purpose of each source is clearly defined.

4. The author's model “4 F - Hing ” shows that scaling is only possible with a balanced readiness of the field, processing, finances and the external market.

5. The stage - gate approach reduces the irreversibility of decisions and allows the investor to increase investments as raw materials, quality, and contracts are confirmed.

6. For Afghanistan, the development of such a project is capable of combining commercial returns with employment, export diversification and resource conservation [8-11].

REFERENCES

Journal Articles

[3] S. Bisht and P. Mahendra, “Ferula asafoetida: Traditional uses and pharmacological activity,” *Pharmacognosy Reviews*, vol. 6, no. 12, pp. 141–146, 2012. DOI: 10.4103/0973-7847.99948.

Reports and Analytical Materials

[4] FAO, Afghanistan Crop Viability Analysis. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023.

[5] Values Reports, Global Asafoetida Market: Size, Revenue, Growth and Market Share, 2024.

[6] Technavio, Global Asafoetida Market 2023–2028, 2023.

[7] International Trade Centre, Trade Map: International Trade Statistics, 2023.

[8] UNDP, Sustainable Spice Cultivation Practices, 2022.

[11] ICAR–Indian Institute of Spices Research, Analytical Note on the Indian Asafoetida Market, 2023.

[12] GlobeNewswire, Global Organic Spices Market Forecast, 2024.

[13] World Integrated Trade Solution (WITS), Asafoetida Trade and Tariff Reports, 2024.

[15] Ministry of Agriculture, Irrigation and Livestock of Afghanistan (MAIL), Internal Agricultural Data, 2023–2024, 2023–2024.

Online Journals

[1] I. Akrami, “Asafoetida cultivation and harvesting in Bamiyan is gaining momentum,” *DW*, 2020.

- [2] S. Davlatyar, "Hing: Medicinal and aromatic plant," ANIS Daily, 2023.
- [9] Xinhua News Agency, "Asafoetida offers a lucrative alternative to poppy cultivation in Afghanistan," 2024.
- [10] ResearchGate, "Production trend and exports performance of asafoetida in Afghanistan," 2024.
- [14] A. Kumar, "From Afghanistan with Love: India's growing dependence on imported asafoetida," The Dollar Business, 2017.

Экономика. Жалпы білім беретін, әлеуметтік-гуманитарлық және іргелі пәндер.

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/165>

ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED DIGITAL EDUCATIONAL PLATFORMS AS A MEANS OF ENHANCING THE EFFECTIVENESS OF LANGUAGE LEARNING

^{1*}Druzhinina N.V., ¹Akhmetgalina N.S., ¹Zhunussova A.K., ¹Khamitova Sh.A., ¹Myrzakhanova A.T.

¹Non-profit Joint Stock Company «Karaganda Industrial University», Temirtau, Kazakhstan

*Corresponding author's e-mail: n.druzhinina@tttu.edu.kz

Author information:

Druzhinina Natalia Valeryevna, Non-profit Joint Stock Company «Karaganda Industrial University», 30 Republic Avenue, 101400, Temirtau, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0188-9561>, e-mail: n.druzhinina@tttu.edu.kz

Akhmetgalina Nina Sergeevna, Non-profit Joint Stock Company «Karaganda Industrial University», 30 Republic Avenue, 101400, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: n.akhmetgalina@tttu.edu.kz

Zhunussova Altnai Kasimovna, Non-profit Joint Stock Company «Karaganda Industrial University», 30 Republic Avenue, 101400, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: a.zhunussova@tttu.edu.kz

Khamitova Shaizat Amantaevna, Non-profit Joint Stock Company «Karaganda Industrial University», 30 Republic Avenue, 101400, Temirtau, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1918-1529>, e-mail: sh.khamitova@tttu.edu.kz

Myrzakhanova Ainur Temirbulatovna, Non-profit Joint Stock Company «Karaganda Industrial University», 30 Republic Avenue, 101400, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: a.myrzakhanova@tttu.edu.kz

Abstract — This article examines the potential of using artificial intelligence technologies in game-based learning of English for students at technical universities. The relevance of this study stems from the digital transformation of education, the need to motivate engineering students to learn a foreign language, and the expanding potential of generative artificial intelligence in educational settings. This article analyzes modern approaches to integrating intelligent systems, language models, and gaming technologies into the educational process. Particular attention is paid to the use of Chat GPT and other generative artificial intelligence models to create an adaptive educational environment. The article explores the pedagogical benefits of using AI-based gaming scenarios and their impact on developing students' communicative competence. It also presents the results of an analysis of modern scientific research confirming the effectiveness of integrating artificial intelligence and gamification in English language teaching. It concludes that the use of intelligent technologies in game-based learning enhances motivation, develops student independence, and improves the quality of language training for students at technical universities.

Keywords — Artificial intelligence, English language, higher education, technical university, gamification, game technologies, Chat GPT, digital learning, communicative competence, personalized learning, educational technologies, student motivation.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТКЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ЦИФРЛЫҚ БІЛІМ БЕРУ ПЛАТФОРМАЛАРЫ ТІЛДІК ОҚЫТУДЫҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ

^{1*}Дружинина Н.В., ¹Ахметгалина Н.С., ¹Жунусова А.К., ¹Хамитова Ш.А., ¹Мырзаханова А.Т.

¹«Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, Теміртау, Қазақстан

*Корреспондент-автордың e-mail: n.druzhinina@tttu.edu.kz

Авторлар туралы ақпарат:

Дружинина Наталья Валерьевна, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, 101400, Қазақстан Республикасы, Теміртау қаласы, Республика даңғылы, 30, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0188-9561>, e-mail: n.druzhinina@tttu.edu.kz

Ахметгалина Нина Сергеевна, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, 101400, Қазақстан Республикасы, Теміртау қаласы, Республика даңғылы, 30, e-mail: n.akhmetgalina@tttu.edu.kz

Жунусова Алтнай Касимовна, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, 101400, Қазақстан Республикасы, Теміртау қаласы, Республика даңғылы, 30, e-mail: a.zhunussova@tttu.edu.kz

Хамитова Шайзат Амантаевна, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, 101400, Қазақстан Республикасы,

Теміртау қаласы, Республика даңғылы, 30, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1918-1529>, e-mail: sh.khamitova@tttu.edu.kz

Мырзаханова Айнуір Теміртбулатовна, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, 101400, Қазақстан Республикасы, Теміртау қаласы, Республика даңғылы, 30, e-mail: a.myrzakhanova@tttu.edu.kz

Абстракт — Бұл мақалада техникалық университеттер студенттерінің ағылшын тілін ойынға негізделген оқытуында жасанды интеллект технологияларын қолданудың әлеуеті қарастырылады. Бұл зерттеудің өзектілігі білім берудің цифрлық трансформациясынан, инженерлік студенттерді шет тілін үйренуге ынталандыру қажеттілігінен және білім беру ортасында генеративті жасанды интеллекттің кеңірек әлеуетінен туындайды. Бұл мақалада интеллектуалды жүйелерді, тілдік модельдерді және ойын технологияларын білім беру процесіне біріктірудің заманауи тәсілдері талданады. Бейімделгіш білім беру ортасын құру үшін Chat GPT және басқа да генеративті жасанды интеллект модельдерін пайдалануға ерекше назар аударылады. Мақалада жасанды интеллект негізіндегі ойын сценарийлерін қолданудың педагогикалық артықшылықтары және олардың студенттердің коммуникативтік құзыреттілігін дамытуға әсері зерттеледі. Сондай-ақ, ағылшын тілін оқытуда жасанды интеллект пен геймификацияны біріктірудің тиімділігін растайтын заманауи ғылыми зерттеулерді талдау нәтижелері ұсынылған. Онда ойынға негізделген оқытуда интеллектуалды технологияларды қолдану мотивацияны арттырады, студенттердің дербестігін дамытады және техникалық университеттер студенттерінің тілдік дайындық сапасын жақсартады деген қорытынды жасалған.

Кілт сөздер — Жасанды интеллект, ағылшын тілі, жоғары білім, техникалық университет, ойын технологиялары, ChatGPT, цифрлық оқыту, коммуникативтік құзыреттілік, жекелендірілген оқыту, білім беру технологиялары, студенттің мотивациясы.

ЦИФРОВЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЯЗЫКОВОГО ОБУЧЕНИЯ

^{1*}Дружинина Н.В., ¹Ахметгалина Н.С., ¹Жунусова А.К., ¹Хамитова Ш.А., ¹Мырзаханова А.Т.

¹НАО Карагандинский индустриальный университет, Теміртау, Казахстан

* E-mail корреспондента: n.druzhinina@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Дружинина Наталья Валерьевна, НАО Карагандинский Индустриальный университет, 101400, проспект Республики, 30, Теміртау, Казахстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0188-9561>, e-mail: n.druzhinina@tttu.edu.kz

Ахметгалина Нина Сергеевна, НАО Карагандинский Индустриальный университет, 101400, проспект Республики, 30, Теміртау, Казахстан, e-mail: n.akhmetgalina@tttu.edu.kz

Жунусова Алтнай Касимовна, НАО Карагандинский Индустриальный университет, 101400, проспект Республики, 30, Теміртау, Казахстан, e-mail: a.zhunussova@tttu.edu.kz

Хамитова Шайзат Амантаевна, НАО Карагандинский Индустриальный университет, 101400, проспект Республики, 30, Теміртау, Казахстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1918-1529>, e-mail: sh.khamitova@tttu.edu.kz

Мырзаханова Айнуір Теміртбулатовна, НАО Карагандинский Индустриальный университет, 101400, проспект Республики, 30, Теміртау, Казахстан, e-mail: a.myrzakhanova@tttu.edu.kz

Аннотация — В статье рассматриваются возможности использования технологий искусственного интеллекта в игровых формах обучения английскому языку студентов высших технических учебных заведений. Актуальность исследования обусловлена процессами цифровой трансформации образования, необходимостью повышения мотивации студентов инженерных специальностей к изучению иностранного языка и расширением возможностей применения генеративного искусственного интеллекта в образовательной практике. Анализируются современные подходы к интеграции интеллектуальных систем, языковых моделей и игровых технологий в образовательный процесс. Особое внимание уделяется использованию Chat GPT и других генеративных моделей искусственного интеллекта для создания адаптивной образовательной среды. Рассматриваются педагогические преимущества применения игровых сценариев, основанных на технологиях искусственного интеллекта, а также их влияние на формирование коммуникативной компетенции студентов. Представлены результаты анализа современных научных исследований, подтверждающих эффективность интеграции искусственного интеллекта и геймификации в преподавании английского языка. Сделан вывод о том, что использование интеллектуальных технологий в игровых

формах обучения способствует повышению мотивации, развитию самостоятельности обучающихся и улучшению качества языковой подготовки студентов технических вузов.

Ключевые слова — искусственный интеллект, английский язык, высшее образование, технический вуз, геймификация, игровые технологии, Chat GPT, цифровое обучение, коммуникативная компетенция, персонализация обучения, образовательные технологии, мотивация студентов.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Генеративті жасанды интеллект пен ойындық интеграция техникалық салалардағы студенттер үшін тілдік дайындықты жекешелендіру мүмкіндіктерін кеңейтеді.

Педагогикалық тұрғыдан ең мүмкін болатыны - тапсырмаларды жасау, қарым-қатынасты модельдеу және кері байланыс беру үшін жасанды интеллект қолданылатын кәсіби бағытталған ойын сценарийлері.

Жасанды интеллект қолдаушы функцияны орындауы керек; мұғалім оқу мақсаттарына, мазмұнды тексеруге, бағалауға және академиялық этикаға сәйкестікке жауапты.

Ұсынылған тәсілдің тиімділігі мотивация мен тілдік біліктіліктің өлшенетін көрсеткіштерін пайдалана отырып, кейінгі эксперименттік тестілеуді қажет етеді.

КІРІСПЕ

Қазіргі заманғы жоғары білім беру цифрлық трансформация аясында дамып келеді, бұл білім беру процесінің мазмұнына, әдістеріне және ұйымдастырылуына әсер етеді. Бұл трансформацияның ең маңызды бағыттарының бірі - жасанды интеллект (ЖИ) технологияларын енгізу. Генеративті модельдер оқу материалдарын жасауға, диалогты қолдауға, тапсырмаларды студенттің біліктілік деңгейіне бейімдеуге және жедел кері байланыс беруге мүмкіндік береді.

ЖИ пайдалану техникалық университеттерде шетел тілдерін оқытуда ерекше маңызды. Ағылшын тілін жетік білу қазіргі заманғы инженерлердің кәсіби құзыреттілігінің негізгі құрамдас бөлігі болып табылады, себебі ғылыми және техникалық ақпараттың, құжаттаманың және халықаралық коммуникацияның айтарлықтай бөлігі ағылшын тілінде ұсынылады. Дегенмен, техникалық салалардағы студенттер көбінесе шетел тілдерін екінші дәрежелі пән ретінде қабылдайды, бұл олардың оқуға деген ынтасын және тұрақты тілдік тәжірибе көлемін төмендетеді.

Бұл мәселені шешудің бір жолы - ойын элементтерін ойын емес білім беру контекстінде пайдалану. Ойынға негізделген тапсырмалар оқушылардың қызығушылығын арттырып, оқуға белсенді қатысуын ынталандыра алады [5; 6]. Жекелендірілген тапсырмаларды жасай алатын,

кәсіби коммуникациялық жағдайларды модельдейтін және лезде кері байланыс бере алатын ойын элементтерін жасанды интеллектпен біріктіруден қосымша мүмкіндіктер туындайды.

ЮНЕСКО ұсынымдары генеративті жасанды интеллекттің айтарлықтай білім беру әлеуетіне ие екенін, бірақ оны пайдалану педагогикалық тұрғыдан негізделген, ашық және жауапты болуы керек екенін атап көрсетеді [1]. Сондықтан болашақ инженерлердің тілдік дайындығында жасанды интеллект пен ойынға негізделген әдістерді біріктіру әлеуетін зерттеу теориялық және практикалық маңызға ие.

Зерттеудегі олқылығы. Қолданыстағы басылымдар негізінен білім беруде кең ауқымды тілдік модельдерді пайдалануды [2–4] немесе гамификацияны тәуелсіз педагогикалық технология ретінде қарастырады [5; 6]. Техникалық университеттердегі студенттерге кәсіби бағытталған ағылшын тілін оқытуда оларды біріктіріп қолдану шарттары жеткілікті түрде жүйеленбеген. Тілдік әрекеттерді типтік инженерлік тапсырмалармен байланыстыратын және жасанды интеллект жасаған нәтижелерді педагогикалық бақылауды қамтамасыз ететін сценарийлер де шектеулі түрде ұсынылған.

Бұл зерттеудің мақсаты - техникалық университеттердегі студенттерге ойынға негізделген ағылшын тілін оқытуда жасанды интеллектті қолданудың педагогикалық әлеуетін талдау.

Осы мақсатқа жету үшін келесі мақсаттар қойылды:

- тілдік білім беруде жасанды интеллектті қолдануға заманауи тәсілдерді жүйелеу;
- шетел тілін оқытудағы ойын технологияларының ерекшеліктерін анықтау;
- жасанды интеллект пен геймификацияны біріктіру әлеуетін анықтау;
- кәсіби бағытталған ойын сценарийлерінің мысалдарын әзірлеу;
- ұсынылған тәсілдің педагогикалық шарттарын, артықшылықтары мен шектеулерін анықтау.

Ғылыми жаңалық. Бұл зерттеуде жасанды интеллект пен геймификация оқшауланған құралдар ретінде емес, кәсіби бағытталған тілдік оқытудың өзара байланысты компоненттері ретінде

карастырылады. Инженерлік салаларға арналған үш ойын моделі ұсынылып, оларды жауапкершілікпен пайдалану шарттары тұжырымдалған: кәсіби бағытталған тапсырмалар, бейімделетін қиындық, материалдарды мұғалімнің міндетті түрде қайта қарауы, жасанды интеллектті ашық пайдалану және жасалған ақпаратқа сыни көзқарасты дамыту. Зерттеудің практикалық маңыздылығы ұсынылған сценарийлерді «Шет тілі», «Кәсіби бағытталған ағылшын тілі» және «Іскерлік ағылшын тілі» пәндерін оқытуда, сондай-ақ цифрлық курстар мен қосымша білім беру бағдарламаларын әзірлеуде пайдалану мүмкіндігінде жатыр.

ӘДЕБИЕТ ШОЛУЫ

Жасанды интеллект - компьютерлік жүйелерге әдетте адам интеллектінің элементтерін қажет ететін мәселелерді шешуге мүмкіндік беретін технологиялар жиынтығы. Тіл білімінде генеративті модельдер мен табиғи тілді өңдеу технологиялары ерекше маңызды, себебі олар мәтіндерді жасай алады, диалогты қолдайды, жауаптарды талдайды және мазмұнды жеке оқушылардың қажеттіліктеріне бейімдей алады.

Э. Каснечи және бірлескен авторлар ауқымды тілдік модельдердің әлеуетін жекелендірілген оқытумен, интерактивті өзара әрекеттесумен және мұғалімдерді қолдаумен байланыстырады, сонымен қатар сенімсіз жауаптардың, бейтараптықтың және алынған нәтижелерді сын көзбен пайдаланудың қауіптерін атап өтеді [2]. Дж. Э. Чуквуере сонымен қатар жоғары білім берудегі ChatGPT артықшылықтарын, сондай-ақ академиялық тұтастық пен деректер сапасына қатысты шектеулерді атап өтеді [3].

Тіл оқытуда жасанды интеллект коммуникативтік жағдайларды модельдеу, қателерді түзету, әртүрлі қиындық деңгейлеріндегі жаттығуларды жасау және дереу кері байланыс беру үшін пайдаланылуы мүмкін. П. Д. Дип және т.б. жүргізген зерттеу ағылшын тілін екінші тіл ретінде оқытуда ChatGPT қолдануды жазбаша шеберлікті, қызығушылықты және оқу нәтижелерін дамытумен байланыстырады [4]. Дегенмен, әсері педагогикалық сценарийдің, нұсқаулардың сапасына және жауаптарды кейіннен тексеруге байланысты.

Геймификация мотивация мен қызығушылықты арттыру үшін ойын элементтері мен механизмдерін ойын емес контексте қолдану ретінде анықталады [5]. К. М. Капп мақсаттардың, ережелердің, кері байланыстың, қиындық

деңгейлерінің және мағыналы тапсырмалардың маңыздылығын атап өтеді, тек сыртқы марапаттардың ғана емес [6]. Техникалық салалардағы студенттер үшін кәсіби мәселелерді шешуді модельдейтін сценарийлер ерекше маңызды.

Жалпы геймификация элементтеріне ұпайлар, жетістіктер, қиындық деңгейлері, рейтингтер, виртуалды марапаттар, әңгімеге негізделген сценарийлер және командалық жарыстар жатады. Олардың білім беру құндылығы ойын механикасы тілдік мақсаттармен тікелей байланысты болған кезде көрінеді. Жасанды интеллект мұндай орталардың бейімделуін арттырады, бірақ әдіснамалық дизайн мен мұғалімнің біліктілігін алмастырмайды. Ф. Артықбаева мен бірлескен авторлардың жұмысы жоғары білім беруде тілдік дайындықта жасанды интеллект сауаттылығы мен ойындық технологияларды бірлесіп қарастырудың өзектілігін көрсетеді [7].

МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Бұл зерттеу теориялық және аналитикалық сипатта. Материал генеративті жасанды интеллект, кең ауқымды тілдік модельдер, геймификация және жоғары білім беруде шетел тілін оқыту бойынша отандық және халықаралық басылымдардан алынды. Талдауға қарастырылып отырған технологияларды қолданудың педагогикалық әлеуетін, шектеулерін және шарттарын зерттейтін жұмыстар кірді.

Келесі әдістер қолданылды: ғылыми әдебиеттерді талдау және синтездеу; педагогикалық технологиялардың салыстырмалы талдауы; ғылыми деректерді жүйелеу; кәсіби бағытталған ойын жағдайларын педагогикалық модельдеу; және білім беруде жасанды интеллектті қолдану бойынша зерттеу нәтижелерін түсіндіру.

Зерттеудің нысаны техникалық университеттердегі студенттерге ағылшын тілін оқыту процесі болды. Зерттеу тақырыбы ойынға негізделген оқу іс-әрекеттерінде жасанды интеллектті қолданудың педагогикалық әлеуеті болды.

Зерттеу процедурасы үш кезеңнен тұрды: 1) тілдік оқытуға қолданылатын жасанды интеллект пен ойын механикасының функцияларын анықтау; 2) бұл функцияларды болашақ инженерлердің кәсіби коммуникациялық міндеттерімен салыстыру; 3) мотивациялық әлеует, дербестендіру, кәсіби бағыт, кері байланыс және мұғалімнің басқару қабілеті критерийлеріне негізделген ойын сценарийлерін әзірлеу және оларды сапалы талдау.

Этикалық бекіту. Зерттеу жарияланған дереккөздерді талдауға және педагогикалық модельдеуге негізделген; жеке деректер жиналмаған, қатысушыларға эксперименттік араласулар жүргізілмеген және адамдар мен жануарларға қатысты зерттеулер жүргізілмеген. Сондықтан этика комитетінің мақұлдауы қажет емес.

Ақпараттандырылған келісім. Қатысушылар тартылмағандықтан және жеке деректер жиналмағандықтан, қолданылмайды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Соңғы жылдардағы ғылыми жарияланымдарды талдау зерттеушілердің білім беру қызметінде жасанды интеллектіні пайдалануға деген қызығушылығының тұрақты түрде артып келе жатқанын көрсетті. Авторлардың басым бөлігі интеллектуалды технологиялардың студенттердің тілдік даярлығының сапасына оң әсер ететінін атап өтеді [2; 4; 7].

Жүргізілген зерттеу техникалық жоғары оқу орындары студенттеріне ағылшын тілін ойын технологиялары арқылы оқытуда жасанды интеллектіні қолданудың негізгі педагогикалық тиімділіктерін айқындауға мүмкіндік берді.

Біріншіден, интеллектуалды жүйелерді пайдалану студенттердің оқу мотивациясын арттыруға ықпал етеді. Жасанды интеллект элементтері енгізілген ойын тапсырмалары дәстүрлі оқыту түрлерімен салыстырғанда студенттердің қызығушылығын едәуір арттырады.

Екіншіден, интеллектуалды технологиялар білім беру үдерісін дербестендіруге мүмкіндік береді. Студенттер өздерінің тілдік дайындық деңгейі мен кәсіби қызығушылықтарына сәйкес әртүрлі күрделілік деңгейіндегі тапсырмаларды орындайды.

Үшіншіден, генеративті жасанды интеллектіні қолдану ағылшын тіліндегі кәсіби қарым-қатынастың шынайы жағдайларын модельдеуге мүмкіндік береді, бұл болашақ инженерлер үшін ерекше маңызды.

Зерттеу барысында келесі ойын сценарийлері әзірленіп, талданды:

1. Smart Factory

Студенттер виртуалды кәсіпорынды басқарып, ағылшын тілінде кәсіби міндеттерді орындайтын ойын түріндегі өндірістік квест.

Негізгі тапсырмалар:

- техникалық құжаттаманы талдау;
- жабдықтардың ақауларын анықтау;

- өндірістік есептерді дайындау;
- шетелдік серіктестермен іскерлік коммуникация жүргізу.

2. AI Debate

ChatGPT қолданылатын интерактивті пікірталас ойыны.

Тақырыптың мысалы:

"Will artificial intelligence replace engineers in the future?"

(«Болашақта жасанды интеллект инженерлерді алмастыра ма?»)

Жасанды интеллект модератор рөлін атқарады, студенттердің дәлелдерін бағалайды және олардың тілдік дағдыларын жетілдіруге арналған ұсынымдар береді.

3. Technical Escape Room

Шығу үшін тілдік және кәсіби тапсырмалар кешенін орындауды талап ететін виртуалды бөлме үлгісіндегі ойын.

Студенттер келесі тапсырмаларды орындайды:

- техникалық нұсқаулықтарды аудару;
- құжаттамадағы қателерді анықтау;
- виртуалды тапсырыс берушімен келіссөздер жүргізу;
- инженерлік мәселенің шешімін әзірлеу.

Аталған ойын түрлерінің педагогикалық әлеуетін талдау олардың техникалық мамандықтарда білім алатын студенттердің кәсіби қажеттіліктеріне жоғары деңгейде бейімделгенін көрсетті.

1-кесте – Ағылшын тілін ойын технологиялары арқылы оқытуда жасанды интеллектіні қолданудың педагогикалық тиімділіктері

Әсер ету бағыты	Педагогикалық тиімділік
Оқу мотивациясы	Ағылшын тілін үйренуге деген қызығушылықтың артуы
Коммуникативтік құзыреттілік	Ауызша және жазбаша сөйлеу дағдыларын дамыту
Өзіндік жұмыс	Тілдік тәжірибе көлемін ұлғайту
Оқытуды дербестендіру	Тапсырмаларды жеке ерекшеліктерге сәйкес іріктеу
Кәсіби даярлық	Кәсіби коммуникация дағдыларын қалыптастыру
Цифрлық құзыреттер	Жасанды интеллект технологияларымен жұмыс істеу дағдыларын дамыту

Алынған нәтижелер интеллектуалды білім беру жүйелерін пайдалану студенттердің тілдік,

кәсіби және цифрлық құзыреттерін кешенді түрде дамытуға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Студенттердің оқу үдерісіне ең жоғары деңгейде тартылуы ойын технологиялары мен жасанды интеллект құралдарын бірлесіп қолдану барысында байқалады.

Зерттеу нәтижелері тілдік білім беру саласында жасанды интеллектінің елеулі әлеуеті туралы қазіргі отандық және шетелдік ғалымдардың тұжырымдарын растайды [1; 2; 4].

Алынған деректер ойын технологиялары негізінде оқытуда интеллектуалды технологияларды қолдану ағылшын тілін оқытудың дәстүрлі әдістерімен салыстырғанда студенттердің оқу мотивациясының анағұрлым тұрақты қалыптасуына ықпал ететінін көрсетуге мүмкіндік береді. Бұл тиімділік бірнеше факторлардың үйлесуімен түсіндіріледі: білім беру ортасының интерактивтілігі, тапсырмаларды дербестендіру және жедел кері байланыс алу мүмкіндігі.

Кәсіби бағдарланған қарым-қатынас жағдайларын модельдеу мүмкіндігі ерекше назар аударуға лайық. Дәстүрлі тілдік жаттығулардан айырмашылығы, жасанды интеллектіні қолдануға негізделген ойын сценарийлері тілдік даярлықты студенттердің болашақ кәсіби қызметінің мазмұнымен ықпалдастыруға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері білім беру үдерісінде оқытушының жетекші рөлін сақтаудың маңыздылығын көрсетеді. Қазіргі заманғы интеллектуалды жүйелердің мүмкіндіктері кең болғанымен, олар педагогикалық қолдауды, оқыту сапасын бақылауды және студенттердің алынған ақпаратқа сыни көзқарасын қалыптастыруды толықтай алмастыра алмайды.

Осыған байланысты ең тиімді оқыту моделі ретінде жасанды интеллектіні шетел тілін оқытудың дәстүрлі әдістерін толықтыратын қосымша білім беру құралы ретінде пайдалануға негізделген тәсіл қарастырылады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу жоғары техникалық оқу орындары студенттеріне ағылшын тілін ойын технологиялары арқылы оқытуда жасанды интеллектіні пайдаланудың негізгі бағыттарын айқындауға мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері жасанды интеллект технологиялары мен геймификацияны білім беру үдерісіне кіріктіру студенттердің оқу

мотивациясын арттыруға, коммуникативтік құзыреттілігін дамытуға, өзіндік жұмыс дағдыларын жетілдіруге және болашақ инженерлердің кәсіби бағытталған тілдік дағдыларын қалыптастыруға ықпал ететінін көрсетті.

Интеллектуалды чат-боттарды, генеративті тілдік модельдерді және бейімделетін білім беру платформаларын пайдалану нақты студенттің қажеттіліктеріне бағдарланған дербестендірілген білім беру ортасын құруға мүмкіндік береді. Әсіресе кәсіби коммуникацияның нақты жағдайларын модельдейтін ойын сценарийлері жоғары тиімділік танытады.

Зерттеу нәтижелері техникалық жоғары оқу орындарында ағылшын тілін оқыту тәжірибесіне жасанды интеллектіні одан әрі енгізудің болашағы зор екенін растайды. Алдағы уақытта инженерлік бағыттар бойынша білім алатын студенттердің тілдік құзыреттерін қалыптастыруға жасанды интеллекттің әртүрлі құралдарының әсерін сандық тұрғыдан бағалауға бағытталған эксперименттік зерттеулер жүргізу орынды болып табылады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

АВТОРЛАРДЫҢ ҮЛЕСІ

- Дружинина Н.В. әдеби талдау жүргізіп, зерттеудің негізгі идеясын әзірледі;
- Ахметгалина Н.С. деректерді талдады;
- Жунусова А.К. зерттеу талдауын жүргізді;
- Хамитова Ш.А. жұмыстың практикалық бөлігін орындады;
- Мырзаханова А.Т. жұмысты рәсімдеумен айналысты;

Барлық авторлар жұмыстың соңғы нұсқасын мақұлдады.

Авторлық құқық © 2026 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.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] UNESCO. Guidance for Generative AI in Education and Research. Paris: UNESCO, 2023. 64 p.

- [2] Kasneci E., Sessler K., Küchemann S., Bannert M., Dementieva D., Fischer F. et al. Chat GPT for Good? On Opportunities and Challenges of Large Language Models for Education // *Learning and Individual Differences*. 2023. Vol. 103. Article 102274.
- [3] Chukwuere J.E. The Use of Chat GPT in Higher Education: The Advantages and Disadvantages // *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2403.19245>.
- [4] Deep P.D., Martirosyan N., Ghosh N., Rahaman M.S. ChatGPT in ESL Higher Education: Enhancing Writing, Engagement, and Learning Outcomes // *Information*. 2025. Vol. 16. №4. Article 316.
- [5] Deterding S., Dixon D., Khaled R., Nacke L. From Game Design Elements to Gamefulness: Defining Gamification // *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference*. Tampere, 2011. P. 9–15.
- [6] Kapp K.M. *The Gamification of Learning and Instruction*. San Francisco: Pfeiffer, 2012. 336 p.
- [7] Artykbayeva F., Tursynova G., Abdullayeva Z., Mombekova S., Kassymbekova L. Artificial Intelligence and Gamification Literacy in Higher Education Language Learning: Insights from a Gamified Diagnostic Test // *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*. 2025. Vol. 24. №2.

Economy. General education, socio-humanitarian and fundamental disciplines

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/166>

VISUALIZATION OF DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED ASAFOETIDA (HING) VALUE CHAIN IN AFGHANISTAN FROM CULTIVATION TO EXPORT

¹Mohamad Syazli F.

¹Department of Smart Engineering & Advanced Technology, Faculty of Artificial Intelligence, Universiti Teknologi Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia

Author information:

Mohamad Syazli Fathi, Associate Professor, Department of Smart Engineering & Advanced Technology, Faculty of Artificial Intelligence, Universiti Teknologi Malaysia, Jalan Sultan Yahya Petra, 54100 Kuala Lumpur, Malaysia; PhD in Construction Management, Loughborough University, United Kingdom; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0474-6278>; e-mail: syazli@utm.my.

Abstract — This study examines the development of an integrated Asafoetida (Hing) value chain in Afghanistan from cultivation to export using bibliometric analysis and VOSviewer. Metadata from 494,420 Web of Science publications (2020–2025) were analyzed to identify key research themes and relationships. The results highlight strong connections between supply chain management, sustainability, resilience, logistics, quality, digital transformation, and international trade. The findings suggest that integrating cultivation, harvesting, processing, quality control, storage, packaging, transportation, and export activities can improve coordination, product quality, market access, and export competitiveness. Digital technologies can further support traceability, information sharing, forecasting, and supply chain coordination. The analysis also emphasizes the importance of collaboration among farmers, processors, traders, exporters, government institutions, and other value-chain stakeholders. Improving logistics and quality-management practices can reduce inefficiencies and strengthen the reliability of Asafoetida products in international markets. Sustainable production and resilient supply-chain practices can also contribute to rural development and income generation. Therefore, an integrated farm-to-export approach can help create greater economic value and strengthen Afghanistan's position in the international Asafoetida market. The study provides a conceptual basis for developing a sustainable, resilient, and digitally supported Asafoetida value chain in Afghanistan.

Keywords — Asafoetida (Hing); value chain; supply chain management; agriculture; sustainability; logistics; digital transformation; export; Afghanistan.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЦЕПОЧКИ СОЗДАНИЯ СТОИМОСТИ АСАФЕТИДЫ (ХИНГА) В АФГАНИСТАНЕ: ОТ ВЫРАЩИВАНИЯ ДО ЭКСПОРТА

¹Мохаммад Сязли Ф.

¹Кафедра интеллектуальной инженерии и передовых технологий, Факультет искусственного интеллекта, Технологический университет Малайзии, Куала-Лумпур, Малайзия

Информация об авторах:

Мохаммад Сязли Фати, доцент, Кафедра интеллектуальной инженерии и передовых технологий, Факультет искусственного интеллекта, Технологический университет Малайзии, Jalan Sultan Yahya Petra, 54100 Куала-Лумпур, Малайзия; доктор философии (PhD) в области управления строительством, Университет Лафборо, Великобритания; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0474-6278>; e-mail: syazli@utm.my.

Аннотация — В данном исследовании рассматривается развитие интегрированной цепочки создания стоимости асафетиды (хинга) в Афганистане — от выращивания до экспорта — с использованием библиометрического анализа и программного обеспечения VOSviewer. Для выявления основных исследовательских направлений и взаимосвязей были проанализированы метаданные 494 420 публикаций из базы данных Web of Science за период 2020–2025 гг. Результаты демонстрируют тесные взаимосвязи между управлением цепочками поставок, устойчивым

развитием, устойчивостью цепочек поставок к внешним воздействиям, логистикой, качеством, цифровой трансформацией и международной торговлей. Полученные результаты показывают, что интеграция таких видов деятельности, как выращивание, сбор урожая, переработка, контроль качества, хранение, упаковка, транспортировка и экспорт, может способствовать улучшению координации, повышению качества продукции, расширению доступа к рынкам и укреплению экспортной конкурентоспособности.

Цифровые технологии могут дополнительно способствовать обеспечению прослеживаемости продукции, обмену информацией, прогнозированию и координации цепочки поставок. Анализ также подчеркивает важность сотрудничества между фермерами, переработчиками, торговцами, экспортёрами, государственными учреждениями и другими участниками цепочки создания стоимости. Совершенствование логистики и практик управления качеством может снизить неэффективность и повысить надёжность продукции из асафетиды на международных рынках. Устойчивые методы производства и практики формирования устойчивых цепочек поставок также могут способствовать развитию сельских территорий и увеличению доходов населения. Таким образом, интегрированный подход «от фермы до экспорта» может способствовать созданию большей экономической ценности и укреплению позиций Афганистана на международном рынке асафетиды. Исследование формирует концептуальную основу для развития устойчивой, адаптивной и поддерживаемой цифровыми технологиями цепочки создания стоимости асафетиды в Афганистане.

Ключевые слова — асафетида (хинг); цепочка создания стоимости; управление цепочками поставок; сельское хозяйство; устойчивое развитие; логистика; цифровая трансформация; экспорт; Афганистан.

АУҒАНСТАНДА АСАФЕТИДАНЫҢ (ХИНГТІҢ) ӨСІРҮДЕН ЭКСПОРТҚА ДЕЙІНГІ ИНТЕГРАЦИЯЛАНҒАН ҚҰН ТІЗБЕГІН ДАМУ ТҮДІСІ ВИЗУАЛИЗАЦИЯЛАУ

¹Мохаммад Сязли Ф.

¹Интеллектуалды инженерия және озық технологиялар кафедрасы, Жасанды интеллект факультеті, Малайзия технологиялық университеті, Куала-Лумпур, Малайзия

Авторлар туралы ақпарат:

Мохаммад Сязли Фати, доцент, Интеллектуалды инженерия және озық технологиялар кафедрасы, Жасанды интеллект факультеті, Малайзия технологиялық университеті, Jalan Sultan Yahya Petra, 54100 Куала-Лумпур, Малайзия; құрылыс менеджменті саласындағы PhD, Лафборо университеті, Ұлыбритания; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0474-6278>; e-mail: syazli@utm.my.

Аңдатпа — Бұл зерттеуде библиометриялық талдау және VOSviewer бағдарламалық құралы арқылы Ауғанстандағы асафетиданың (хингтің) өсіруден бастап экспортқа дейінгі интеграцияланған құн тізбегін дамыту мәселесі қарастырылады. Негізгі зерттеу бағыттары мен олардың өзара байланыстарын анықтау мақсатында 2020–2025 жылдар аралығындағы Web of Science деректер базасындағы 494 420 жарияланымның метадеректері талданды. Нәтижелер жеткізу тізбегін басқару, тұрақты даму, жеткізу тізбегінің тұрақтылығы, логистика, сапа, цифрлық трансформация және халықаралық сауда арасында тығыз байланыстар бар екенін көрсетті. Алынған нәтижелер өсіру, жинау, өңдеу, сапаны бақылау, сақтау, орау, тасымалдау және экспорттау сияқты қызмет түрлерін интеграциялау үйлестіруді жақсартуға, өнім сапасын арттыруға, нарықтарға қолжетімділікті кеңейтуге және экспорттық бәсекеге қабілеттілікті нығайтуға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Цифрлық технологиялар өнімнің қадағалануын қамтамасыз етуге, ақпарат алмасуға, болжам жасауға және жеткізу тізбегін үйлестіруге қосымша қолдау көрсете алады. Талдау сонымен қатар фермерлер, өңдеушілер, саудагерлер, экспорттаушылар, мемлекеттік мекемелер және құн тізбегінің басқа да қатысушылары арасындағы ынтымақтастықтың маңыздылығын көрсетеді. Логистика мен сапаны басқару тәжірибесін жетілдіру тиімсіздікті азайтып, халықаралық нарықтардағы асафетида өнімдерінің сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Тұрақты өндіріс пен жеткізу тізбегінің орнықтылығын қамтамасыз ететін тәжірибелер ауылдық аумақтардың дамуына және халықтың табысын арттыруға да ықпал ете алады. Сондықтан «фермадан экспортқа дейін» интеграцияланған тәсіл экономикалық құндылықты арттыруға және Ауғанстанның халықаралық асафетида нарығындағы позициясын нығайтуға мүмкіндік береді. Зерттеу Ауғанстанда тұрақты, орнықты және цифрлық технологиялармен қолдау көрсетілетін асафетиданың құн тізбегін дамыту үшін тұжырымдамалық негіз қалыптастырады.

Түйін сөздер — асафетида (хинг); құн тізбегі; жеткізу тізбегін басқару; ауыл шаруашылығы; тұрақты даму; логистика; цифрлық трансформация; экспорт; Ауғанстан.

The development of an integrated asafoetida (hing) value chain is a crucial aspect of improving

agricultural productivity, promoting rural livelihoods, and increasing the export

competitiveness of Afghanistan, where asafoetida is recognized as one of the country's most valuable medicinal and aromatic plant products [1]. Establishing an efficient value chain that connects cultivation, harvesting, processing, quality control, marketing, and export can enhance product quality, reduce post-harvest losses, and create greater economic opportunities for farmers and exporters. Understanding the research landscape in this area is essential for identifying the major themes, research gaps, and emerging directions related to the sustainable development of the asafoetida sector.

This section aims to visualize the scientific literature on the development of an integrated asafoetida (hing) value chain in Afghanistan, from cultivation to export, using VOSviewer software. A bibliometric visualization approach was employed to analyze the co-occurrence of keywords and their relationships, enabling the identification of dominant research clusters, thematic networks, and knowledge trends. The visualization provides a comprehensive overview of the existing research and supports future studies and policy development for strengthening the asafoetida value chain in Afghanistan.

We exported metadata from 494,420 publications from the Web of Science (WoS) database using the following query: "TITLE:(\"asafoetida\" OR \"asafetida\" OR \"hing\" OR \"Ferula asafoetida\" OR \"Ferula assa-foetida\" OR \"Ferula foetida\" OR \"asafoetida resin\" or \"value chain\" OR \"value-chain\" OR \"agricultural value chain\" OR \"agrifood value chain\" OR \"supply chain\" OR \"supply-chain\" OR \"commodity chain\" OR \"value chain development\" OR \"cultivation\" OR \"cultivation practices\" OR \"production\" OR \"agricultural production\" OR \"farming\" OR \"harvesting\" OR \"processing\" OR \"post-harvest\" OR \"postharvest\" OR \"storage\" OR \"marketing\" OR \"commercialization\" OR \"market access\" OR \"trade\" OR \"export\" OR \"exports\" OR \"international trade\" OR \"export development\" OR \"Afghanistan\" OR \"Afghan\"), timespan: 2020–2025. Indexes: SCI - EXPANDED, SSCI, CPCI - S, ESCI. The construction of a network of co-occurrence of keywords and their clustering was carried out using the VOSviewer 1.6.15 program [2].

The minimum occurrence of keywords selected for consideration was four. The total number of keywords in the 494,420 publications considered (Authors and Keywords Plus generated by WoS) is 4002. The number of keywords that appear at least 4 times is 369, and further analysis was carried out on them.

To reduce the number of clusters into which keywords (KW) are aggregated, an additional restriction has been introduced: at least 100 KW per cluster.

Table 1 presents the bibliometric visualization of the development of an integrated Asafoetida (Hing) value chain in Afghanistan, highlighting the interconnected research areas from cultivation and production to processing, marketing, and export. The visualization was generated using VOSviewer to identify key themes, keyword co-occurrence, and relationships within the scientific literature.

Table 1- 40 most frequently occurring keywords in a sample of 494,420 metadata

Key word	N-kw	Key word	N-kw	Key word	N-kw	Key word	N-kw
manag ement	171	integrat ion	55	collab oratio n	35	strategi es	29
impact	155	resilien ce	54	suppl y chain integr ation	35	big data analyti cs	24
perfor mance	147	firm perfor mance	54	design	35	scale develo pment	23
supply chain	157	dynami c capabil ities	48	coordi nation	34	supply chain agility	23
sustain ability	69	capabil ities	41	techn ology	33	agility	23
supply chain resilie nce	68	logistic s	41	infor matio n- techn ology	31	resourc e-based view	22
frame work	66	anteced ents	40	comp etitive advan tage	31	modera ting role	22
model	63	quality	40	infor matio n	31	industr y	22
supply chain manag ement	63	strateg y	39	risk	30	operati onal perfor mance	21
innova tion	59	supply chain perfor mance	37	block chain	30	mediati ng role	19

Notes: keyword is the name of the term; N-kw is the occurrence of the term.

The dominant keywords are related to the topic, its management, impact, performance, supply chain, sustainability, supply chain resilience, framework, model, supply chain management, innovation, integration, resilience, firm performance, dynamic capabilities, capabilities, logistics, antecedents, quality, strategy, and supply chain performance.

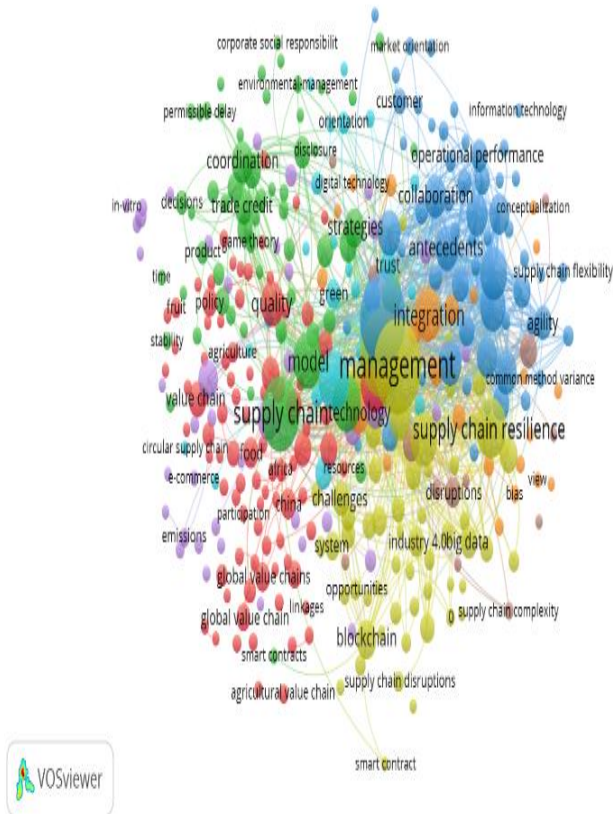


Figure 1- Keyword Co-Occurrence Network
Visualization: 369 Most Frequent Terms in 494,420
Publications

If we consider separately the keywords of the authors themselves, then with a total number of 2,756KW, 157KW occur at least four times, while the total number of keywords plus (Keywords Plus) generated by the WoS platform is 1,548KW and those encountered more than four times are 221KW.

Table 2 - Comparison of the 30 most common keywords used by publication authors and WoS platform keywords

Author Keywords	N-kw	Keywords Plus	N-kw
supply chain	101	trade credit	16
supply chain resilience	68	artificial intelligence	14
supply chain management	63	performance	14
supply chain performance	37	supply chain digitalization	13
sustainability	37	firm performance	12
supply chain integration	35	international trade	12
resilience	27	industry 4.0	11
value chain	26	logistics	11
blockchain	23	digital supply chain	11
supply chain agility	23	information sharing	10
supply chains	23	sustainable development	10
supply chain finance	20	green supply chain management	10
supply chain collaboration	17	collaboration	9
risk management	16	manufacturing	9
digital transformation	16	literature review	9

Table 2 presents the result of a comparison of the 30 most common keywords of publication authors and keywords of the WoS platform. It shows that authors often use more general terms to classify their publications: supply chain, supply chain resilience, supply chain management, supply chain performance, blockchain, sustainability, supply chain integration, resilience, supply chain agility, supply chain collaboration, artificial intelligence, supply chains, risk management, digital transformation, and performance.

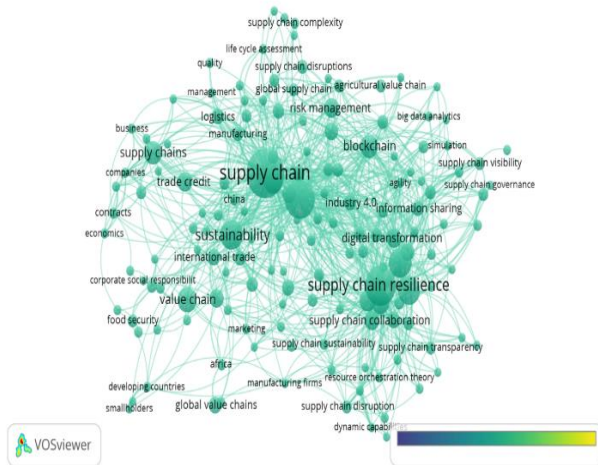


Figure 2- Overlay Visualization of 30 Most Common Keywords: Author-Assigned vs. WoS-Generated Terms

The Web of Science (WoS) platform also generates a list of “Keywords Plus” based on the analysis of the full texts of publications. These terms often describe the topic from a broader perspective than the authors' original keywords. In this case, the dominant terms include: impact, management, performance, framework, dynamic capabilities, firm performance, integration, innovation, model, antecedents, capabilities, information-technology, strategy, collaboration, sustainability, competitive advantage, resilience, technology, logistics, information, which collectively provide a deeper insight into the implementation of the themes addressed by the authors' keywords [3].

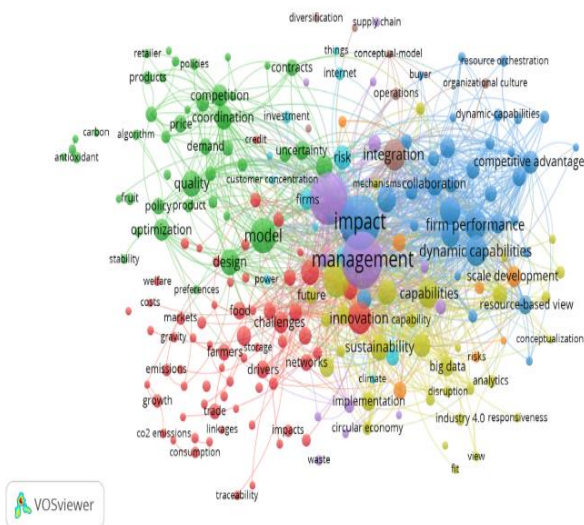


Figure 3- Keywords Plus Co-Occurrence Network Visualization: 221 Most Frequent in 494,420 Publications

This is also reflected in the clustering of author keywords, WoS platform keywords and the sum of these keywords. Clustering is based on the co-occurrence of keywords in a publication; the clustering algorithm is described in detail in the VOSviewer 1.6.15 user manual. Identification of the dominant keywords in each cluster allows us to reduce bias in the further collection of scientific publications on a narrower issue, for example, to compile a systematic review. A well-known problem of narrow specialists: they see their topic well, overestimate the importance of key terms close to them and tend to underestimate other people's topics. At the same time, a significant part of innovations is implemented at the intersection of research areas.

This study provides a comprehensive bibliometric analysis of the research landscape surrounding the development of an integrated Asafoetida (Hing) value chain, with particular attention to the interconnected stages of cultivation, production, harvesting, processing, quality management, marketing, logistics, and export. The development of such an integrated value chain is particularly important for Afghanistan because Asafoetida is an important exportable agricultural commodity and can contribute to rural livelihoods, agricultural income, and international trade. Existing research on Hing production in Afghanistan also identifies important challenges for producers, including limited processing equipment, insufficient market access, inadequate extension support, and high input costs [4]. These challenges demonstrate the need to examine Asafoetida not only as an agricultural product but as an integrated value chain involving farmers, processors, traders, logistics providers, exporters, and international markets.

The present analysis used metadata from 494,420 publications retrieved from the Web of Science database for the period 2020–2025. The search strategy incorporated a broad range of terms associated with Asafoetida, Ferula species, Hing, cultivation, agricultural production, harvesting, processing, post-harvest management, storage, marketing, commercialization, market access, trade, exports, supply chains, value chains, and Afghanistan. VOSviewer was used to construct keyword co-occurrence networks and identify the major thematic relationships within the research landscape. The analysis initially identified 4,002 keywords, of which 369 occurred at least four times and were subsequently included in the analysis. [5]

The results demonstrate that the literature surrounding the development of agricultural and supply-chain systems is highly interconnected. The most frequently occurring terms identified in the study include management, impact, supply chain, performance, sustainability, supply chain resilience, framework, model, supply chain management, innovation, integration, resilience, firm performance, dynamic capabilities, logistics, quality, strategy, and supply chain performance. These findings suggest that the development of an integrated Asafoetida value chain should be approached from a multidimensional perspective rather than being limited to cultivation and production.

The strong occurrence of supply chain, supply chain management, supply chain resilience, logistics, and supply chain performance is particularly relevant to Afghanistan's Asafoetida sector. An integrated value chain requires coordination among producers, collectors, processors, wholesalers, exporters, transport providers, and foreign buyers. Without effective coordination, value can be lost at different stages through inefficient harvesting, inadequate processing, poor storage, weak information sharing, transportation constraints, or limited market access. Therefore, strengthening supply-chain integration can help connect agricultural production with processing and international markets and can potentially improve the overall economic value generated by Asafoetida.

The importance of supply-chain integration is also supported by the broader literature, which increasingly considers supply chains as interconnected systems involving coordination, information sharing, resilience, technology, and sustainability. Bibliometric research on sustainable supply chains demonstrates that major research clusters include sustainability, technological innovation, performance and competitive advantage, sustainable business models, and supply-chain risks [6]. This supports the findings of the present study, where integration, resilience, innovation, technology, sustainability, and performance appear as interconnected research themes.

Fayez Wazani et al. [7] also demonstrated the importance of digitalization in production processes at JSC “Qarmet” within the framework of Industry 4.0. Their research emphasized automated process control, real-time monitoring, automatic detection of production defects, and the application of digital technologies to improve product quality and production performance. Although that study focused on an industrial production environment, its

findings are relevant to the proposed Asafoetida value chain because digital technologies can similarly support information sharing, quality monitoring, traceability, inventory management, production planning, and coordination among participants in an agricultural value chain.

Digital transformation represents an important emerging direction in the present research landscape. Among the author-assigned keywords, digital transformation, artificial intelligence, blockchain, supply chain digitalization, and supply chain collaboration appear as important themes, while Keywords Plus includes information technology, technology, and digital-related concepts. This suggests that future development of the Asafoetida sector could benefit from digital platforms that connect farmers with processors, traders, exporters, and international buyers.

For Afghanistan, digitalization could provide several practical opportunities. A digital value-chain platform could allow farmers to access information about cultivation practices, harvesting schedules, quality requirements, market prices, buyers, and export requirements. Processors and exporters could use digital records to monitor quantities, quality characteristics, processing activities, storage conditions, and shipments. Such systems could also improve transparency between producers and buyers and reduce information asymmetries that may disadvantage small-scale farmers.

The appearance of blockchain and information sharing among the identified research themes is also significant. Blockchain-based systems could potentially support product traceability by recording information about cultivation locations, harvesting, processing, quality inspection, packaging, and export transactions. For a product such as Asafoetida, where product quality and authenticity can influence international market acceptance, improved traceability could contribute to greater buyer confidence and market transparency.

Another important dimension is quality management. The keyword analysis identifies quality as a significant theme, with quality appearing 40 times among the dominant Keywords Plus terms. Quality management is particularly important for Asafoetida because the product passes through several stages between cultivation and final export. Variations in harvesting methods, drying, processing, storage, packaging, and handling can influence the final quality of the product. Therefore, establishing consistent quality-control procedures

throughout the value chain is essential for improving market competitiveness.

Fayez Wazani et al. [8] examined data-driven decision-making within Quality Management Systems based on ISO 9001:2015 and highlighted the importance of statistical analysis for objective process assessment, timely detection of deviations, reduction of process variability, and improvement of management decisions. These findings are relevant to the Asafoetida value chain because data-driven quality management can potentially be applied to production volumes, product quality, processing performance, storage conditions, market demand, and export performance. Consequently, systematic collection and analysis of value-chain data could support more reliable decisions by farmers, processors, exporters, and policymakers.

The research landscape also emphasizes sustainability and resilience. Sustainability appears 69 times among the dominant Keywords Plus terms, while supply-chain resilience appears 68 times. These themes are especially relevant to Afghanistan because agricultural value chains may face multiple risks, including climatic variability, production uncertainty, transportation constraints, market fluctuations, limited infrastructure, and disruptions in domestic and international trade.

A resilient Asafoetida value chain should therefore be capable of responding to disruptions while maintaining the flow of products and information from producers to international buyers. Research on sustainable supply-chain resilience shows that sustainability, supply-chain management, sustainable development, and risk management are closely interconnected themes in the contemporary literature [9]. For the Afghan Asafoetida sector, improving resilience could involve diversifying buyers and export markets, strengthening storage capacity, improving transportation and logistics, developing reliable processing facilities, and increasing access to market information.

Logistics is another important theme identified in the analysis, appearing among the dominant Keywords Plus terms. Logistics is critical because Asafoetida must move through several geographical and organizational stages before reaching international markets. Inefficient transportation, inadequate storage, poor packaging, and delays can reduce product quality and increase transaction costs. Developing an integrated logistics system connecting production areas with processing facilities, domestic markets, border points, and

international buyers could therefore improve the efficiency of the overall value chain.

The role of logistics is closely connected with supply-chain agility and collaboration, which also appear among the major author-assigned keywords. Effective collaboration among farmers, processors, traders, exporters, government agencies, financial institutions, and logistics providers can improve information exchange and facilitate faster responses to changes in demand and market conditions. In the Asafoetida sector, stronger collaboration could also help smallholder farmers obtain better access to processing facilities and international markets.

Another important finding is the presence of competitive advantage, innovation, dynamic capabilities, and strategy within the research landscape. These concepts indicate that value-chain development should not focus exclusively on increasing production. Long-term competitiveness depends on the ability of participants to develop capabilities for innovation, quality improvement, market adaptation, technological adoption, and strategic coordination.

For Afghanistan, this means that increasing Asafoetida production alone may not be sufficient to maximize its economic contribution. Greater value can potentially be created by improving processing, packaging, branding, certification, traceability, marketing, and export coordination. Moving from the export of relatively unprocessed raw material toward higher-value processed and standardized products could provide opportunities to increase the economic return to producers and other participants in the value chain.

The comparison between author-assigned keywords and Keywords Plus further confirms the interdisciplinary character of the field. The authors' keywords emphasize supply chain, supply chain resilience, supply chain management, supply chain performance, sustainability, supply chain integration, blockchain, supply chain agility, supply chain collaboration, risk management, digital transformation, and performance. Meanwhile, Keywords Plus emphasizes broader concepts such as management, impact, performance, framework, dynamic capabilities, firm performance, integration, innovation, information technology, strategy, collaboration, sustainability, competitive advantage, resilience, technology, and logistics.

This difference indicates that the development of an Asafoetida value chain should be understood through several complementary perspectives: agricultural production, supply-chain management,

logistics, digitalization, sustainability, quality management, international trade, and strategic management. Integrating these perspectives can provide a stronger conceptual foundation for developing an effective national Asafoetida value-chain model for Afghanistan.

The findings also support the development of a farm-to-export integrated value-chain framework for Asafoetida. Such a framework could consist of several interconnected stages: cultivation and production; harvesting and collection; primary processing; quality control; drying and storage; packaging and branding; domestic transportation; market coordination; export logistics; and international marketing. Digital information systems could operate across these stages to improve traceability, information sharing, forecasting, and coordination.

The results of the bibliometric analysis can also support the development of future research programs and systematic reviews focused specifically on Asafoetida production and value-chain development. The clustering of keywords provides an opportunity to identify research gaps and investigate the relationships between cultivation, processing, supply-chain resilience, sustainability, digitalization, quality, logistics, and export competitiveness. The clustering approach can also help reduce the risk of examining the topic from an overly narrow perspective because innovations frequently emerge at the intersection of different research areas.

Future empirical research should examine the actual conditions of the Asafoetida value chain in Afghanistan. Important areas include the economic performance of farmers, cultivation costs, productivity, harvesting practices, processing capacity, post-harvest losses, storage conditions, transportation costs, market structures, export destinations, international prices, quality requirements, certification, and the distribution of value among different participants. Such research could provide the quantitative evidence necessary for designing an economically viable and sustainable national value-chain model.

Future studies should also investigate how digital technologies can be practically applied within the Afghan Asafoetida sector. Potential applications include mobile-based farmer platforms, digital marketplaces, electronic traceability systems, blockchain-based certification, demand forecasting, geographic information systems, digital payment systems, and data-driven production planning. These technologies could help connect rural producers with

domestic and international markets while improving transparency and reducing information barriers.

Sustainability should remain a central component of this development model. Sustainable cultivation practices, responsible harvesting, efficient resource use, appropriate processing technologies, and improved waste management can help ensure that expansion of Asafoetida production does not create unnecessary environmental pressures. At the same time, social sustainability should be considered through improved rural employment, farmer income, participation of local communities, and equitable distribution of value throughout the chain.

Also these findings demonstrate that the development of an integrated Asafoetida value chain in Afghanistan is a multidisciplinary issue involving agriculture, supply-chain management, logistics, international trade, technology, quality management, sustainability, and strategic management. The dominant research themes identified through VOSviewer—including management, supply chain, performance, sustainability, resilience, innovation, integration, logistics, quality, strategy, and supply-chain performance—provide a useful conceptual foundation for understanding the sector.

CONCLUSION

The study demonstrates that developing an integrated Asafoetida value chain can create significant opportunities for Afghanistan's agricultural and export sectors. The bibliometric analysis highlights the importance of supply chain integration, sustainability, resilience, logistics, quality management, digitalization, and international trade. Connecting cultivation, harvesting, processing, quality control, storage, packaging, transportation, and export can improve value creation and market competitiveness. Digital technologies, including blockchain and other traceability systems, can further strengthen coordination, transparency, information sharing, and market access. Effective quality control and standardized processing practices are also essential for meeting international market requirements and improving product value. Stronger cooperation among farmers, processors, traders, exporters, and government institutions can reduce supply-chain fragmentation and improve overall efficiency. Investment in logistics, storage, packaging, and export infrastructure can further reduce post-harvest losses and support reliable international distribution. At the same time, sustainable and resilient

production practices can contribute to rural employment, farmer income, and long-term sector development. Therefore, an integrated and digitally supported farm-to-export model can provide a

stronger foundation for sustainable development, higher product quality, and greater international competitiveness of Afghanistan's Asafoetida sector.

REFERENCES

Journal Articles

- [1] D. Salvatore and W. Janssen, «Strengthening Afghanistan's Asafoetida value chain: Production, processing, and export opportunities», Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021.
- [2] Z. S. Gelmanova, A. W. Fayeze Wazani, and K. B. Khapasov, «Visualization of the development of a methodology for automated analysis and support of cyberattack investigations using artificial intelligence methods with VOSviewer», In the World of Science and Education, vol. 11, no. 11, pp. 69–74, 2026. Available: <https://zenodo.org/records/18810763>.
- [3] Z. S. Gelmanova, A. W. Fayeze Wazani, and A. A. Denezhkin, «Digital transformation of sales in the telecom sector: Development and implementation of CRM systems using Freedom Mobile as an example; data visualization using VOSviewer», In the World of Science and Education, vol. 11, no. 11, pp. 69–74, 2025. Available: <https://zenodo.org/records/17213853>.
- [4] M. Hussain Khail, B. Jafary, A. F. Sharifi, et al., «Economic analysis of Hing production in Badakhshan Province», ESRJ, vol. 62, no. 2, pp. 10–18, 2024. [Online]. Available: <https://esrj.edu.af/esrj/article/view/27>.
- [5] T. T. T. Duong, Q. L. Tran, and L. C. Hoang, «Sustainable supply chain management: A bibliometric analysis using VOSviewer», Ho Chi Minh City Open University Journal of Science – Economics and Business Administration, vol. 16, no. 8, pp. 57–77, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.46223/HCMCOUJS.econ.en.16.8.4583.2026>.
- [6] E. Soeryanto Soegoto, S. Luckyardi, E. N. Hayati, et al., «Bibliometric analysis of green supply chain research using VOSviewer», Journal of Eastern European and Central Asian Research, vol. 9, no. 5, 2022. Available: <https://doi.org/10.15549/jeecar.v9i5.1051>.
- [7] Z. S. Gelmanova, A. W. Fayeze Wazani, A. S. Petrovskaya, and G. S. Shakanova, «Data-driven decision making in quality management systems (ISO 9001:2015): A statistical approach and case studies», In the World of Science and Education, vol. 11, no. 11, pp. 98–103, 2026. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20405837>.
- [8] S. Z. H. Syed Jamaludin, M. Mustapa, Z. Mohamad Ramly, and N. Muhammad, «Resilience strategies in sustainable supply chain management: Bibliometric analysis and future research directions», Built Environment Journal, vol. 21, no. 2, pp. 204–223, 2024.

Published Conference Proceedings

- [9] A. Batyrbek, Z. S. Gelmanova, and A. W. Fayeze Wazani, «Measures and procedure for implementation of digitalization of production at JSC «Qarmet»», in 2024 International Conference on Electrical and Computer Engineering Researches (ICECER), IEEE, 2024. Available: <https://doi.org/10.1109/ICECER62944.2024.10920383>.

Chemical and pharmaceutical technologies

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/167>

PHYTOCHEMICAL SCREENING AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF ETHANOL EXTRACT OF SUNGKAI LEAVES (PERONEMA CANESCENS JACK)

^{1*}Primandari S.R.P., ²Kusnanda, A.J., ^{3,4}Elshaarani, T.^{1,2}Universitas Negeri Padang, West Sumatera, Indonesia³University of Khorfakkan, Sharjah, United Arab Emirates⁴Sudan Atomic Energy Commission, Khartoum, Sudan* Correspondent's E-mail: sri.primandari@ft.unp.ac.id

Author information:

Primandari Sri Rizki Putri, Universitas Negeri Padang, 25132, Padang, West Sumatera, Indonesia, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1279-7331>, email: sri.primandari@ft.unp.ac.id**Kusnanda Arif Juliari**, Universitas Negeri Padang, 25132, Padang, West Sumatera, Indonesia, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5538-0317>, email: arifjuliari@fmipa.unp.ac.id**Elshaarani Tarig**, University of Khorfakkan, Sharjah, United Arab Emirates, 887W+2P2, Sharjah, United Arab Emirates, Sudan Atomic Energy Commission, Khartoum, Sudan, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5769-4758>, email: Tarig.Ali@ukf.ac.ae

Abstract — In Indonesia, sungkai leaves (*Peronema canescens* Jack) are popular as herbal plants and have the potential to be classified as a source of secondary metabolite compounds. This study aims to determine the characteristics of sungkai leaf extract and its secondary metabolite content. This study used a 70% ethanol solution to extract secondary metabolite compounds through the maceration method. Determination of antioxidant activity was carried out using the DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) method. Initial characterization was carried out through phytochemical screening of flavonoids and phenolics. Antioxidant activity was determined based on the extract's ability to inhibit DPPH radicals at a concentration of 10–50 ppm, then expressed as an inhibition percentage and IC₅₀ value. The results showed that sungkai leaf extract with 70% ethanol solvent contained flavonoids and phenolics. Increasing the extract concentration resulted in an increase in DPPH radical inhibition activity, with an inhibition percentage of 37.54–81.31%. Although the IC₅₀ of sungkai leaf extract is still below the value of Vitamin C, the IC₅₀ of the extract was 21.98 ppm, categorized as very strong. Therefore, the results of this study are still qualitative and require further quantitative study. This study also contributes to the support that sungkai leaf extract has the potential to be developed into an antioxidant compound.

Keywords — secondary metabolite, herbal compound, antioxidant resource, maceration.

СУНГКАЙ ЖАПЫРАҚТАРЫНЫҢ (PERONEMA CANESCENS JACK) ЭТАНОЛДЫҚ СЫҒЫНДЫСЫНЫҢ ФИТОХИМИЯЛЫҚ СКРИНИНГІ ЖӘНЕ АНТИОКСИДАНТТЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ

^{1*}Primandari S.R.P., ²Куснанда А.Д., ³Эльшаарани Т.^{1,2}Паданг мемлекеттік университеті, Батыс Суматра, Индонезия³Хорфаккан университеті, Шарджа, Біріккен Араб Әмірліктері⁴Судан атом энергиясы жөніндегі комиссиясы, Хартум, Судан*Корреспондент E-mail: sri.primandari@ft.unp.ac.id

Авторлар туралы ақпарат:

Primandari Sri Rizki Putri, Паданг мемлекеттік университеті, 25132, Паданг қаласы, Батыс Суматра, Индонезия. ORCID идентификаторы: <https://orcid.org/0000-0002-1279-7331>. Электрондық пошта: sri.primandari@ft.unp.ac.id.**Куснанда Ариф Джулиари**, Паданг мемлекеттік университеті, 25132, Паданг қаласы, Батыс Суматра, Индонезия. ORCID идентификаторы: <https://orcid.org/0000-0002-5538-0317>. Электрондық пошта: arifjuliari@fmipa.unp.ac.id.**Эльшаарани Тариг**, Хорфаккан университеті, Шарджа қаласы, Біріккен Араб Әмірліктері, мекенжайы: 887W+2P2, Шарджа, Біріккен Араб Әмірліктері; Суданның Атом энергиясы жөніндегі комиссиясы, Хартум қаласы, Судан.ORCID идентификаторы: <https://orcid.org/0000-0002-5769-4758>. Электрондық пошта: Tarig.Ali@ukf.ac.ae.

Абстракт — Индонезияда сунгкай жапырақтары (*Peronema canescens* Jack) дәрілік өсімдік ретінде кеңінен қолданылады және екіншілік метаболиттер қосылыстарының көзі ретінде қарастырылады. Бұл зерттеудің мақсаты — сунгкай жапырақтары сығындысының сипаттамаларын және оның құрамындағы екіншілік метаболиттерді анықтау. Зерттеу барысында екіншілік метаболиттерді бөліп алу үшін мацерация әдісімен 70%-дық этанол ерітіндісі қолданылды. Антиоксиданттық белсенділікті анықтау DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил) әдісі арқылы жүргізілді. Бастапқы сипаттамалар флавоноидтар мен фенолдық қосылыстарға фитохимиялық скрининг жүргізу арқылы анықталды. Антиоксиданттық белсенділік сығындының 10–50 ppm концентрацияларында DPPH радикалдарын тежеу қабілеті негізінде бағаланды. Нәтижелер тежеу пайызы және IC_{50} мәні түрінде көрсетілді. Зерттеу нәтижелері 70%-дық этанолмен алынған сунгкай жапырақтары сығындысының құрамында флавоноидтар мен фенолдық қосылыстар бар екенін көрсетті. Сығынды концентрациясының артуы DPPH радикалдарын тежеу белсенділігінің жоғарылауына әкеліп, тежеу пайызы 37,54–81,31% аралығында болды. Сунгкай жапырақтары сығындысының IC_{50} мәні С дәруменімен салыстырғанда жоғары болғанымен, 21,98 ppm құрады, бұл өте жоғары антиоксиданттық белсенділік санатына сәйкес келеді. Осыған байланысты зерттеу нәтижелері әзірге сапалық сипатқа ие және қосымша сандық зерттеулер жүргізуді қажет етеді. Сонымен қатар, бұл зерттеу сунгкай жапырақтары сығындысының антиоксиданттық қосылыс ретінде әрі қарай әзірлену әлеуетін растайды.

Кілт сөздер — екіншілік метаболиттер, өсімдік тектес дәрілік қосылыс, антиоксиданттық ресурс, мацерация.

ФИТОХИМИЧЕСКИЙ СКРИНИНГ И АНТИОКСИДАНТНАЯ АКТИВНОСТЬ ЭТАНОЛЬНОГО ЭКСТРАКТА ЛИСТЬЕВ СУНГКАЙ (*PERONEMA CANESCENS* JACK)

^{1*}Primandari S.R.P., ^{2*}Куснанда А.Д., ³Эльшаарани Т.

^{1,2} Университет Негери Паданг, Западная Суматра, Индонезия

³ Университет Хорфаккана, Шарджа, Объединённые Арабские Эмираты

⁴ Суданская комиссия по атомной энергии, Хартум, Судан

* E-mail корреспондента: sri.primandari@ft.unp.ac.id

Информация об авторах:

Primandari Sri Rizki Putri, Университет Негери Паданг, 25132, г. Паданг, Западная Суматра, Индонезия.

Идентификатор ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1279-7331>. Электронная почта: sri.primandari@ft.unp.ac.id.

Куснанда Ариф Джулиари, Университет Негери Паданг, 25132, г. Паданг, Западная Суматра, Индонезия.

Идентификатор ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5538-0317>. Электронная почта: arifjuliari@fmipa.unp.ac.id.

Эльшаарани Тариг, Университет Хорфаккана, г. Шарджа, Объединённые Арабские Эмираты, почтовый адрес:

887W+2P2, Шарджа, Объединённые Арабские Эмираты; Суданская комиссия по атомной энергии, г. Хартум, Судан.

Идентификатор ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5769-4758>. Электронная почта: Tarig.Ali@ukf.ac.ae.

Аннотация — В Индонезии листья сунгкай (*Peronema canescens* Jack) широко используются в качестве лекарственного растительного сырья и рассматриваются как потенциальный источник вторичных метаболитов. Цель данного исследования — определить характеристики экстракта листьев сунгкай и установить содержание в нём вторичных метаболитов. Для извлечения вторичных метаболитов использовали 70%-ный раствор этанола, а экстракцию проводили методом мацерации. Определение антиоксидантной активности осуществляли методом DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил). Первичную характеристику экстракта проводили посредством фитохимического скрининга на наличие флавоноидов и фенольных соединений. Антиоксидантную активность оценивали по способности экстракта ингибировать радикалы DPPH при концентрациях 10–50 ppm. Полученные результаты выражали в процентах ингибирования и значении IC_{50} . Результаты показали, что экстракт листьев сунгкай, полученный с использованием 70%-ного этанола, содержит флавоноиды и фенольные соединения. С увеличением концентрации экстракта антирадикальная активность в отношении DPPH возрастала, а процент ингибирования составлял 37,54–81,31%. Несмотря на то что значение IC_{50} экстракта листьев сунгкай выше, чем у витамина С, оно составило 21,98 ppm, что соответствует категории очень высокой антиоксидантной активности. Таким образом, результаты данного исследования пока имеют преимущественно качественный характер и требуют дальнейшего количественного изучения. Кроме того, полученные данные подтверждают перспективность дальнейшей разработки экстракта листьев сунгкай в качестве источника антиоксидантных соединений.

Ключевые слова — вторичные метаболиты, соединения растительного происхождения, источник антиоксидантов, мацерация.

MAIN PROVISION

- Penelitian ini menunjukkan bahwa ekstrak daun sungkai mengandung karakteristik fitokimia berupa flavonoid dan fenolik.
- Metode ekstraksi larutan etanol 70% dan maserasi menghasilkan rendemen 18.94%.
- Penelitian ini menunjukkan bahwa ekstrak daun sungkai memiliki IC_{50} sebesar 21.95.

INTRODUCTION

Indonesia is known as a country with a diverse range of traditional herbal plants. One such plant is the sungkai (*Peronema canescens* Jack), a member of the Verbenaceae family. This plant is abundant on the islands of Kalimantan and Sumatra [1]. Secondary metabolites commonly found in herbal plants include flavonoids, phenolics, saponins, steroids, alkaloids, and terpenoids. The content of these compounds can vary depending on the plant species, plant part, growing location, and the method and solvent used in the extraction process [2]. Several previous studies have shown that sungkai leaves contain several secondary metabolites, particularly flavonoids, phenolics, saponins, and steroids. The activity most associated with secondary metabolites in plants is antioxidant activity [3], [4]. This is because phenolic and flavonoid compounds are known to scavenge free radicals, making plants containing phenolic and flavonoid compounds potentially suitable for development as natural antioxidant sources.

Based on this description, sungkai leaves have the potential to be a source of natural ingredients containing secondary metabolites and possessing antioxidant activity [5]. This study was conducted to determine the characteristics of *Peronema canescens* Jack leaf extract through yield determination, phytochemical screening, and antioxidant activity testing using the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) method. The results are expected to provide information on the potential of sungkai leaves as a natural antioxidant source and serve as baseline information for further research [6].

Research Gap. Although research on sungkai leaves has reported the presence of several secondary metabolites and their antioxidant activity, studies linking the characteristics of secondary metabolites to the extract's ability to scavenge free radicals still need to be developed. Phytochemical screening only provides qualitative information about the compound class, while DPPH testing provides information about antioxidant activity without directly explaining the chemical components that potentially play a role. Therefore, this study was conducted to obtain an overview of the relationship between the secondary metabolite profile from phytochemical screening and the antioxidant activity of the ethanol extract of *Peronema canescens* Jack leaves.

Scientific Novelty. The novelty of this research lies in the re-evaluation of the characteristics of the ethanol extract of *Peronema canescens* Jack leaves obtained through certain extraction conditions and the study of the relationship between phytochemical screening results and DPPH radical scavenging activity. This study provides new experimental data on the characteristics of the extract and its antioxidant activity

as a basis for further research on the bioactive compounds of sungkai leaves.

LITERATURE REVIEW

A. Secondary Metabolites in Plants

The flavonoid, phenolic, alkaloid, terpenoid, steroid, and saponin compounds are classified as secondary metabolites. The presence of secondary metabolites in plants indicates their potential biological function. Flavonoids are a group of phenolic compounds that possess an aromatic ring system with several hydroxyl groups. These hydroxyl groups enable flavonoids to react with free radicals. This reaction occurs through the transfer of hydrogen atoms and electrons [7].

Like flavonoids, the hydroxyl groups in the aromatic structure of phenolic compounds also possess antioxidant properties. These groups donate hydrogen atoms to free radicals, producing phenoxy radicals. The phenoxy radicals are then stabilized by electron delocalization in the aromatic ring [2], [8].

Therefore, the presence of flavonoids and phenolics can be identified by their free radical scavenging ability. The presence of flavonoids and phenolics is usually determined through color reactions or complex formation using reagents in phytochemical screening. However, these tests are only qualitative and are therefore primarily used to provide initial information regarding the chemical composition of extracts.

C. Extraction of Secondary Metabolite Compounds

The process of separating specific compounds from natural materials using solvents is called extraction. The solvent used in extraction is selected based on the solubility of the compounds to be separated. The success of extraction depends on the type and concentration of the solvent, extraction time, particle size, and temperature [9].

One simple extraction method is maceration. In maceration, powdered medicinal plants are soaked in a solvent for a specified period of time, allowing soluble compounds to be drawn from the plant tissue into the solvent. Besides being simple, this method does not require high heat, making it often used for compounds that are relatively sensitive to temperature.

The most commonly used solvent is ethanol. Using ethanol in a mixture with water can help extract compounds with varying polarities. In research on sungkai leaves, ethanol at different concentrations has been used to obtain extracts, which were then analyzed for their phenolic content and antioxidant activity. One study reported that ethanol extracts of sungkai leaves had superior phenolic content and

antioxidant activity compared to water extracts under these test conditions [10].

Therefore, the choice of ethanol as a solvent in sungkai leaf research is expected to produce extracts containing various secondary metabolites, particularly polar and semipolar compounds that have the potential to provide antioxidant activity.

MATERIALS AND METHODS

The main material used in this study was sungkai leaves (*Peronema canescens* Jack) obtained from Nagari Palembayan, Agam Regency, West Sumatra, Indonesia. The chemicals used included 70% ethanol, ethanol p.a., DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl), vitamin C, distilled water, magnesium powder, concentrated HCl, and 10% FeCl₃. The equipment used included an analytical balance, blender, maceration vessel, glassware, test tubes, pipettes, rotary evaporator, volumetric flask, and UV-Vis spectrophotometer.

A. *Simplicia preparation*

The sungkai leaves used were first cleaned of dirt and unnecessary plant parts. The samples were then dried in a place protected from direct sunlight until the leaves were dry. The dried leaves were then ground using a blender to obtain a powdered herbal medicine. The powdered herbal medicine was stored in a closed container and protected from moisture before being used in the extraction process.

B. *Extraction of Sungkai Leaves*

Extraction was carried out using a maceration method with 70% ethanol as the solvent. A total of 250 g of powdered sungkai leaves was placed in a maceration vessel, then 70% ethanol was added at a ratio of 1:10. The mixture was allowed to stand for three days, protected from light, with occasional stirring.

After the maceration process was complete, the mixture was filtered to separate the filtrate from the pulp. The resulting filtrate was then evaporated using a rotary evaporator to obtain a more concentrated extract. The extract was then weighed and stored in a sealed container before analysis.

This extraction step was used to obtain an extract containing various sungkai leaf secondary metabolites based on their solubility in 70% ethanol.

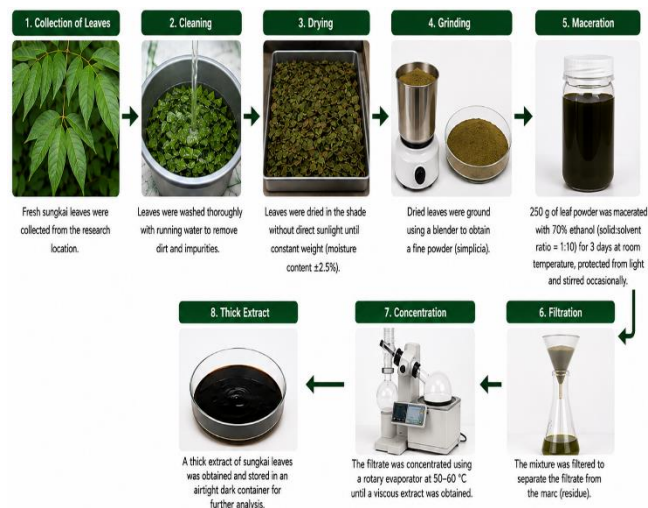


Figure B1 – procedures for Sungkai leaf extraction

C. *Determination of Extract Yield*

The yield is used to determine the percentage of extract obtained compared to the initial weight of the simplex. The yield is determined by using the equation:

$$\text{Yield (\%)} = \frac{\text{extract (g)}}{\text{simplicia (g)}} \times 100 \quad (1)$$

The yield results were used as one of the initial characterization parameters for sungkai leaf extract.

D. *Phytochemical Screening*

Phytochemical screening was conducted to determine the presence of several classes of secondary metabolites in sungkai leaf extract. The compounds analyzed included flavonoids and phenolics.

E. *Flavonoid Test (Shinoda Test)*

2 mL of the extract was placed in a test tube, then magnesium powder and 2-3 drops of concentrated HCl were added. The formation of an orange to red color indicates a positive result for flavonoids. This color change is used as a qualitative indicator of the presence of flavonoid compounds.

F. *Phenolic Test*

2 mL of sungkai leaf extract was placed in a test tube and 2-3 drops of a 5% FeCl₃ solution were added. Antioxidant Activity Testing Using the DPPH Method

The antioxidant activity of sungkai leaf extract was determined using the DPPH method. This method is based on the ability of antioxidant compounds in the extract to donate hydrogen atoms or electrons to the DPPH radical, thereby converting the radical into a more stable form.

G. *Preparation of Extract Solution*

A stock extract solution was prepared at a concentration of 1000 ppm. A 10 mg extract was

weighed and dissolved in ethanol p.a. in a 100 mL volumetric flask to the mark. From this stock solution, extract solutions were prepared at concentrations of 10, 20, 30, 40, and 50 ppm.

H. Preparation of DPPH Solution

A DPPH stock solution was prepared at a concentration of 100 ppm by dissolving 10 mg of DPPH in ethanol p.a. to a volume of 100 mL. The solution was then diluted to obtain a DPPH solution with a concentration of 35 ppm.

I. Antioxidant Activity Measurement

A total of 2 mL of the extract solution at each concentration was mixed with 4 mL of a 35 ppm DPPH solution. The mixture was then incubated for 30 minutes at 37°C under conditions protected from light.

The absorbance of the solution was measured using a UV-Vis spectrophotometer at a wavelength of 517 nm. Vitamin C was used as a reference. Vitamin C solutions were prepared at several concentrations and treated with the same procedure as the extract solutions. The color change was then observed. A blue color indicated the presence of phenolic compounds.

RESULT AND DISCUSSION

A. Characteristics of Sungkai leaves Extract

Sungkai leaf (*Peronema canescens* Jack) extraction was performed using a maceration method with 70% ethanol. The choice of 70% ethanol was based on its ability to extract secondary metabolites with varying polarities. The maceration process was carried out for three days with a 1:10 ratio of the crude drug to the solvent.

From 250 g of crude drug, 47.351 g of sungkai leaf extract was obtained, with a yield of 18.84%. The extraction results are presented in Table 1.

Table A1 – Sungkai Leaves Extract

Parameters	Results
Weight of simplicia	250 g
Solvent	Ethanol 70%
Time during maceration	3 days
Weight of extract	47.351 g
Yield	18.94%

The yield of 18.940% indicates that the maceration process was able to extract several components from sungkai leaf extract. The use of 70% ethanol allows for the extraction of polar to semi-polar compounds. The water in the 70% ethanol solution facilitates

solvent penetration into plant tissue, while the ethanol plays a role in dissolving various organic compounds. Therefore, the resulting extract is expected to contain a fairly diverse mixture of secondary metabolites.

B. Phytochemical Screening Results

Phytochemical screening was conducted to qualitatively determine the presence of several groups of secondary metabolites in the ethanol extract of sungkai leaves. The test results indicated the presence of flavonoids and phenolics.

Table B1 – Phytochemical Screening Results

Secondary metabolite group	Results
flavonoids	+
phenolics	+

(+) detected; (–) not detected

These results indicate that the ethanol extract of sungkai leaves contains several groups of secondary metabolites with the potential to exert biological activity. The presence of flavonoids and phenolics is of particular interest because these two groups of compounds have structures that allow them to react with free radicals [3].

Flavonoids

A positive flavonoid result is indicated by a color change after the addition of magnesium and HCl. This reaction is a commonly used qualitative method for detecting flavonoids. Simply put, the reaction can be described as:

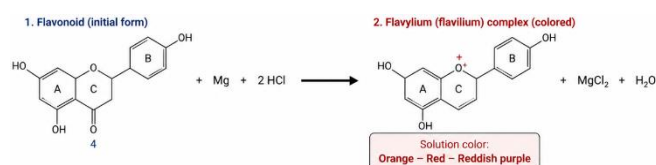


Figure B1 – Reaction of flavonoid test

Magnesium acts as a reducing agent, reducing the carbophilic groups of flavonoids under acidic conditions. This reduction and ring rearrangement leads to the formation of flavylium salts. Flavylium complexes are indicated by an orange to red color [11].

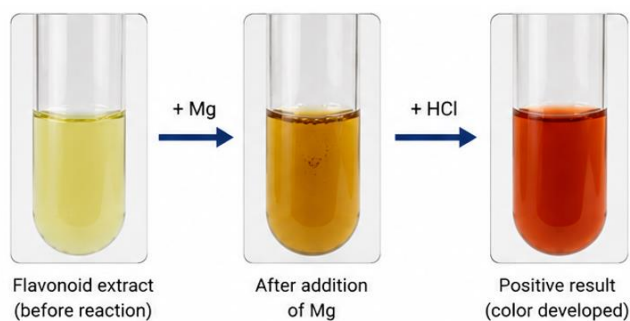


Figure B2 – Color change during flavonoid test

The color change is related to changes in the conjugation system of the flavonoid structure under acidic conditions. Flavonoids have an aromatic ring system and hydroxyl groups that allow for electron stabilization through resonance. The presence of flavonoids is also relevant to antioxidant activity. The hydroxyl groups in the flavonoid structure can donate hydrogen atoms to free radicals, thereby making them more stable [12].

Phenolic

The phenolic test using FeCl_3 yielded a positive result. The reaction between the Fe^{3+} ion and the phenolic group produces a colored complex. The formation of this complex causes a color change that can be observed visually.

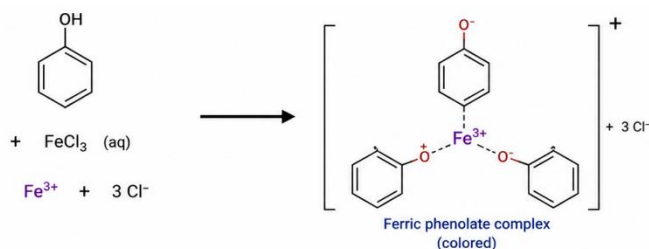


Figure B3 – Reaction of flavonoid test

In aqueous solution, FeCl_3 decomposes to produce Fe^{3+} . The Fe^{3+} ions react with phenolate oxygen (ArO^-) to form a complex compound. The charge transfer in the complex compound produces a blue color.

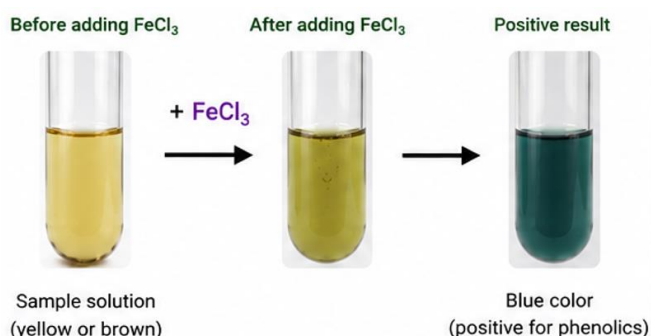


Figure B4 – Reaction of flavonoid test

Phenolic compounds are a group of secondary metabolites that have the potential to contribute to antioxidant activity. The hydrogen atom in the phenolic hydroxyl group can be transferred to a free radical, while the resulting phenoxy radical is relatively stable due to the delocalization of electrons in the aromatic ring [13].

C. Antioxidant Activity

The antioxidant activity of sungkai leaf extract was determined using the DPPH method. Tests were conducted at extract concentrations of 10, 20, 30, 40, and 50 ppm. The results showed an increase in the percentage of inhibition with increasing extract concentration.

Table C1 – DPPH radical scavenging activity of the extract

Extract concentration (ppm)	Absorbance	Inhibition (%)
10	0.343	37.84
20	0.292	47.37
30	0.235	58.99
40	0.176	68.51
50	0.108	81.42

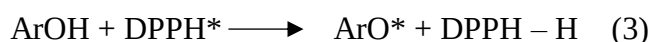
Increasing the extract concentration from 10 to 50 ppm resulted in a decrease in absorbance from 0.343 to 0.108. At the same time, the inhibition percentage increased from 37.84% to 81.42%. This pattern indicates that the higher the extract concentration, the greater the amount of antioxidant components available to react with DPPH radicals. Consequently, the remaining DPPH radical concentration decreases, and the measured absorbance also decreases.

D. Mechanism of Extract Reaction with DPPH Radicals

The antioxidant activity of extracts can be explained by the ability of hydrogen or electron donor compounds to reduce DPPH radicals. In general, the reaction can be written as:



AH is an antioxidant compound that releases a hydrogen atom to the DPPH radical. DPPH, which is originally in the form of a radical, changes to a more stable form. For phenolic compounds, the reaction can be described as:



ArO^* , or phenoxy radicals, produced from the reaction of phenolic compounds can be stabilized through resonance within the aromatic structure [6], [13]. These

two mechanisms give flavonoids and phenolic compounds the ability to scavenge free radicals (act as antioxidants). The color change is the basis for spectrophotometric measurements at a wavelength of 517 nm.

E. IC_{50} of Extract

Based on the relationship between extract concentration and inhibition percentage, the IC_{50} value of the extract was 21.95 ppm. Table 4. IC_{50} value of sungkai leaf extract.

Table E1 – IC_{50} value of sungkai leaf extract

Ssample	IC50 (ppm)	Intrepretation
Sungkai leaf extract	21.95	Very strong
Vitamin C	4.18	Very strong

Thus, sungkai leaf extract has antioxidant activity in the very strong category. However, the IC_{50} value of the extract is still higher than that of vitamin C. Higher values indicate that the concentration required to inhibit 50% of DPPH radicals is higher, so that the radical scavenging activity is lower. Based on these results, sungkai leaf extract shows lower activity than that of vitamin C. This indicates that not all elements in sungkai leaf extract play a role in scavenging DPPH radicals.

F. Relationship Between Secondary Metabolites And Antioxidant Activity

Phytochemical screening results indicated the presence of flavonoids and phenolics in sungkai leaf extract. These two groups of compounds are suspected to play a role in the observed antioxidant activity. This relationship can be explained by the ability of hydroxyl groups to donate hydrogen atoms:



Phenolic compounds that have lost a hydrogen atom form phenoxy radicals (ArO^*). These radicals are relatively stable because the unpaired electron can be delocalized within the aromatic system. Flavonoids also possess a structural system that allows radical stabilization through resonance. Therefore, the ability to reduce DPPH radicals depends on the number of compounds that can donate H atoms or electrons. The greater the number of donors, the greater the ability [12].

In this study, the presence of flavonoids and phenolics, along with the very strong DPPH activity, indicates that flavonoids and phenolics play a role in the antioxidant activity of sungkai leaf extract. However, because the phytochemical screening analysis was only qualitative, this relationship remains indicative.

CONCLUSION

This study showed that maceration using 70% ethanol can produce 18.10% sungkai leaf extract. The results also qualitatively confirmed the flavonoid and phenolic content of sungkai leaves, which exhibited very strong free radical scavenging abilities under the test conditions used. These findings suggest that the bioactive compounds from sungkai leaf extract can be further developed. Chemically, this activity is thought to be related primarily to the presence of flavonoids and phenolics, which have hydroxyl groups and are capable of donating hydrogen atoms or electrons to the DPPH radical. Thus, the ethanol extract of sungkai leaves has potential as a source of natural antioxidant compounds. Characterization using FTIR and GC-MS can be carried out in further research to obtain more specific information regarding the functional groups and chemical components that contribute to antioxidant activity.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Primandari SRP conceptualized and wrote the paper; Kusunda AJ conducted the research; Elshaarani T analyzed the data; all authors approved the final version.

Author Contribution Statement (CRediT Taxonomy): Author 1: Conceptualization (lead), Methodology, Writing – Original Draft. Author 2: Investigation, Resources. Author 3: Formal analysis, Data curation

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to thank to all parties who supported this study.

Copyright © 2026 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] Mohammad Kanedi, Kusuma Handayani, and Wawan Abdullah Setiawan, "Therapeutic potentials of sungkai (*Peronema canescens* Jack.) an Indonesian luxurious woody plant," *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, vol. 11, no. 1, pp. 069–073, Jul. 2022, doi: 10.30574/wjbphs.2022.11.1.0110.

- [2] H. Doloking, N. Tahar, Mukhriani, and Surya Ningsi, "Flavonoids: a review on extraction, identification, quantification, and antioxidant activity," *Ad-Dawaa' Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 5, no. 1, Aug. 2022, doi: 10.24252/djps.v5i1.29329.
- [3] J. Hayat *et al.*, "Phytochemical screening, polyphenols, flavonoids and tannin content, antioxidant activities and FTIR characterization of *Marrubium vulgare* L. from 2 different localities of Northeast of Morocco," *Heliyon*, vol. 6, no. 11, p. e05609, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05609.
- [4] M. Jafari, Y. Ramezan, B. Tajeddin, and M. R. Khani, "Optimization of plasma-activated water-assisted extraction of basil seed (*Ocimum basilicum* L.) mucilage: Effect on phenols, flavonoids, antioxidant, thermal and morphological properties," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 99, p. 103876, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.ifset.2024.103876.
- [5] A. Kokom, Yasmiwar Susilawati, Sri Adi Sumiwi, and Okta Nama Putra, "Pharmacological profile and therapeutic potential of sungkai plant (*Peronema canescens* Jack.): An emerging Indonesian herbal medicine," *Jurnal Sains Farmasi & Klinis*, vol. 11, no. 2, pp. 95–102, Nov. 2024, doi: 10.25077/jsfk.11.2.95-102.2024.
- [6] M. MUHARNI, F. FERLINAHAYATI, H. YOHANDINI, F. RIYANTI, and N. A. P. PAKPAHAN, "The anticholesterol activity of betulinic acid and stigmaterol isolated from the leaves of sungkai (*Paronema canescens* Jack)," *International Journal of Applied Pharmaceutics*, pp. 198–203, Mar. 2021, doi: 10.22159/ijap.2021v13i2.40372.
- [7] F. Fadlilaturrahmah, A. Khairunnisa, A. MP Putra, and I. Sinta, "Uji aktivitas tabir surya dan antioksidan ekstrak etanol daun sungkai (*Peronema canescens* jack)," *Jurnal Ilmiah Ibnu Sina (JIIS): Ilmu Farmasi dan Kesehatan*, vol. 6, no. 2, pp. 322–330, Oct. 2021, doi: 10.36387/jiis.v6i2.737.
- [8] M. Zhu, J. Bao, P. Liang, C. Zhang, S. Li, and F. Hu, "Extraction of flavonoids and phenolic acids from poplar-type propolis: optimization of maceration process, evaluation of antioxidant and antimicrobial activities," *LWT*, vol. 233, p. 118481, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.lwt.2025.118481.
- [9] V.-L. Nguyen, "Effects of drying temperature and extraction conditions on phenolic compounds, flavonoids, and antioxidant activity of *Sonneratia caseolaris* (L.) Engl. fruit," *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 73, p. 103991, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.bcab.2026.103991.
- [10] B. Ouattara, I. Semay, J. C. W. Ouédraogo, Y. L. Bonzi-Coulibaly, P. Gerbaux, and I. W. K. Ouédraogo, "Phenolic compounds from *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf leaf extracts: extraction optimization, flavonoids LC-MS characterization and stability assessment," *Cleaner Chemical Engineering*, p. 100227, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.clce.2026.100227.
- [11] W. Ahmada, N. Msuya, K. Janga, A. Itika, M. G. Mathias, and E. Elisante, "Solubility-guided carbon dioxide expanded liquid extraction of flavonoids and other phenolic compounds from *Garcinia buchananii* bark," *J. Supercrit. Fluids*, vol. 237, p. 107062, Nov. 2026, doi: 10.1016/j.supflu.2026.107062.
- [12] J.-S. Kim, "Flavonoids, an overview: Chemical structures, dietary sources, and biological properties," *Food Engineering Progress*, vol. 24, no. 3, pp. 151–163, Aug. 2020, doi: 10.13050/foodengprog.2020.24.3.151.
- [13] T. Maigoda, J. Judiono, D. B. Purkon, A. N. E. M. Haerussana, and G. P. E. Mulyo, "Evaluation of *Peronema canescens* leaves extract: Fourier Transform Infrared Analysis, total phenolic and flavonoid content, antioxidant capacity, and radical scavenger activity," *Open Access Maced. J. Med. Sci.*, vol. 10, no. A, pp. 117–124, Jan. 2022, doi: 10.3889/oamjms.2022.8221.

Chemical and pharmaceutical technologies. Life safetyDOI: <https://www.doi.org/10.53002/168>**METHODS FOR BETULIN PURIFICATION: A REVIEW**¹**Bakibayev A.A., ¹Lyapunova M.V., ¹Razgulyaeva Yu.D., ¹Salina M.V., ¹Zaitsev A.V.*¹ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*** Correspondent's E-mail: bakibaev@mail.ru***Author information:****Bakibayev A.A.** — Professor, Doctor of Chemical Sciences, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation; e-mail: bakibaev@mail.ru.**Lyapunova M.V.** — Researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation; e-mail: lyapunova.mari@mail.ru.**Razgulyaeva Yu.D.** — PhD Student, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation; e-mail: lyapunova.mari@mail.ru.**Salina M.V.** — Master's Student, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation; e-mail: 89991237185@mail.ru.**Zaitsev A.V.** — Master's Student, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation; e-mail: Deynerys02@mail.ru.

Abstract — Betulin, a pentacyclic triterpenoid abundant in the outer bark of Betula species, represents a valuable natural compound for pharmaceutical, biomedical, and cosmetic applications. Its further utilization, however, requires reliable technologies capable of providing material with a consistently high level of purity. This review examines current strategies for recovering and purifying betulin from birch bark, with emphasis on the relationship between physicochemical properties of the compound and the efficiency of individual separation processes. Solvent-based extraction, recrystallization, chromatographic procedures, and alternative purification techniques are discussed with consideration of solvent polarity, temperature-dependent solubility, hydrogen-bonding interactions, and crystalline solvate formation. Reported experimental procedures and patented technologies are evaluated with respect to product purity, solvent requirements, operational complexity, recovery efficiency, and prospects for technological scale-up. Methods employed for structural identification and purity control, particularly high-performance liquid chromatography and spectroscopic techniques, are also reviewed. Analysis of the published data indicates that recrystallization remains a practical route for obtaining highly purified betulin, although its effectiveness strongly depends on appropriate solvent selection and careful control of processing conditions. Differences in the composition of birch bark associated with species and geographical origin are additionally considered, with particular interest in less extensively investigated taxa such as Betula kirghisorum. The development of more selective, resource-efficient, and environmentally sustainable extraction and purification processes is expected to improve the production of high-purity betulin from renewable birch resources and expand opportunities for its subsequent chemical modification and practical application.

Keywords — betulin; Betula spp.; birch bark; pentacyclic triterpenoids; isolation; purification; solvent extraction; recrystallization.

БЕТУЛИНДІ ТА ЗАРТУ ӘДІСТЕРІ: ШОЛУ¹**Бакибаев А.А., ¹Ляпунова М.В., ¹Разгуляева Ю.Д., ¹Салина М.В., ¹Зайцев А.В.*¹ *Томск мемлекеттік ұлттық зерттеу университеті, Томск қ., Ресей Федерациясы**Корреспондент e-mail: bakibaev@mail.ru***Авторлар туралы ақпарат:****Бакибаев А.А.** — профессор, химия ғылымдарының докторы, Томск мемлекеттік ұлттық зерттеу университеті, Томск қ., Ресей Федерациясы; e-mail: bakibaev@mail.ru.

Ляпунова М.В. — ғылыми қызметкер, Томск мемлекеттік ұлттық зерттеу университеті, Томск қ., Ресей Федерациясы; e-mail: lyapunova.mari@mail.ru.

Разгуляева Ю.Д. — PhD докторант, Томск мемлекеттік ұлттық зерттеу университеті, Томск қ., Ресей Федерациясы; e-mail: lyapunova.mari@mail.ru.

Салина М.В. — магистрант, Томск мемлекеттік ұлттық зерттеу университеті, Томск қ., Ресей Федерациясы; e-mail: 89991237185@mail.ru.

Зайцев А.В. — магистрант, Томск мемлекеттік ұлттық зерттеу университеті, Томск қ., Ресей Федерациясы; e-mail: Deynerys02@mail.ru.

Абстракт — Бетулин — Betula туысына жататын қайың түрлерінің сыртқы қабығында едәуір мөлшерде жинақталатын табиғи пентациклді тритерпеноид. Оның биологиялық қасиеттерінің алуан түрлілігі және фармацевтика, биомедицина мен косметология салаларында пайдалану мүмкіндігі бұл қосылысқа деген ғылыми және практикалық қызығушылықты арттырады. Бетулин негізіндегі өнімдерді әзірлеудің маңызды алғышарттарының бірі — қажетті тазалық деңгейіндегі қосылысты тұрақты әрі тиімді алуға мүмкіндік беретін технологияларды таңдау. Осы шолу жұмысында қайың қабығынан бетулинді бөліп алу және тазарту үшін қолданылатын заманауи тәсілдер жүйеленіп, олардың ерекшеліктері салыстырмалы түрде қарастырылды. Негізгі назар еріткіштік экстракцияға, қайта кристалдандыруға, хроматографиялық бөлуге және физика-химиялық тазартудың басқа әдістеріне аударылды. Тазарту нәтижесіне әсер ететін еріткіштің полярлығы, температураға тәуелді ерігіштік, молекулааралық әрекеттесулер және кристалдық сольваттардың түзілуі сияқты факторлар талданды. Әдебиетте сипатталған тәжірибелік әдістер мен патенттелген технологиялар алынатын өнімнің тазалығы, еріткіш шығыны, технологиялық үдерістің күрделілігі және оны өндірістік деңгейге масштабтау мүмкіндігі бойынша салыстырылды. Бетулиннің құрылымын сәйкестендіру және тазалық дәрежесін анықтау үшін қолданылатын аналитикалық әдістерге, соның ішінде жоғары тиімді сұйықтық хроматографиясы мен спектроскопиялық талдау тәсілдеріне де назар аударылды. Жинақталған деректер қайта кристалдандырудың жоғары тазалықтағы бетулин алудың практикалық тұрғыдан тиімді әдістерінің бірі екенін көрсетеді. Алайда оның нәтижелілігі еріткішті дұрыс таңдауға және үдерістің технологиялық параметрлерін оңтайландыруға тікелей байланысты. Сонымен қатар қайыңның түрлік ерекшелігі мен географиялық өсу жағдайларының бетулин мөлшері мен құрамына ықпалы маңызды зерттеу бағыты болып табылады. Осы тұрғыдан Қазақстан аумағында таралған, салыстырмалы түрде аз зерттелген Betula kirghisorum түрі ерекше қызығушылық тудырады. Экологиялық қауіпсіз, ресурсты үнемдейтін және селективті экстракциялау мен тазарту технологияларын жетілдіру жаңартылатын өсімдік шикізатынан жоғары тазалықтағы бетулин өндірудің тиімді технологиялық негізін қалыптастыруға және оны әрі қарай химиялық модификациялау мен практикалық қолдану мүмкіндіктерін кеңейтуге ықпал етеді.

Кілт сөздер — бетулин; Betula spp.; қайың қабығы; пентациклді тритерпеноидтар; бөліп алу; еріткіштік экстракция; тазарту; қайта кристалдандыру.

МЕТОДЫ ОЧИСТКИ БЕТУЛИНА: ОБЗОР

'Бакибаев А.А., 'Ляпунова М.В., 'Разгуляева Ю.Д., 'Салина М.В., 'Зайцев А.В.

'Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация

** E-mail корреспондента: bakibaev@mail.ru*

Информация об авторах:

Бакибаев А.А. — профессор, доктор химических наук, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация; e-mail: bakibaev@mail.ru.

Ляпунова М.В. — научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация; e-mail: lyapunova.mari@mail.ru.

Разгуляева Ю.Д. — докторант PhD, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация; e-mail: lyapunova.mari@mail.ru.

Салина М.В. — магистрант, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация; e-mail: 89991237185@mail.ru.

Зайцев А.В. — магистрант, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация; e-mail: Deynerys02@mail.ru.

Аннотация — Бетулин — природный пентациклический тритерпеноид, накапливающийся в значительных количествах в наружном слое коры растений рода Betula. Разнообразие биологических свойств и перспективы применения в фармацевтике, биомедицине и косметологии обуславливают устойчивый научный и практический

интерес к данному соединению. Одним из ключевых условий дальнейшего использования бетулина и создания продуктов на его основе является разработка технологически эффективных способов получения вещества с воспроизводимо высокой степенью чистоты. В настоящем обзоре систематизированы современные подходы к выделению и очистке бетулина из бересты и проведено их сравнительное рассмотрение. Основное внимание уделено экстракции органическими растворителями, перекристаллизации, хроматографическому разделению и другим физико-химическим способам очистки. Проанализировано влияние полярности растворителя, температуры, растворимости, межмолекулярных взаимодействий и образования кристаллических сольватов на эффективность разделения и качество конечного продукта. Представленные в научной литературе экспериментальные методы и запатентованные технологические решения сопоставлены по степени очистки бетулина, расходу растворителей, сложности технологического процесса и перспективам масштабирования. Рассмотрены методы идентификации и контроля чистоты получаемого соединения, в том числе высокоэффективная жидкостная хроматография и спектроскопические методы анализа. Обобщение опубликованных данных свидетельствует о том, что перекристаллизация остается практически значимым способом получения высокоочищенного бетулина, однако ее результативность в значительной степени определяется выбором растворителя и оптимизацией технологических параметров. Отдельное внимание уделено влиянию видовой принадлежности и географического происхождения растительного сырья на характеристики выделяемого бетулина. В этом аспекте особый интерес представляет сравнительно малоизученный вид *Betula kirghisorum*, распространенный на территории Казахстана. Совершенствование селективных, ресурсосберегающих и экологически приемлемых методов экстракции и очистки может создать технологическую основу для эффективного получения высокочистого бетулина из возобновляемого растительного сырья и расширить возможности его последующей химической модификации и практического применения.

Ключевые слова — бетулин; *Betula* spp.; береста; пентациклические тритерпеноиды; выделение; экстракция растворителями; очистка; перекристаллизация.

MAIN PROVISION

A comparative analysis of published and patented methods showed that recrystallization is one of the most accessible and effective approaches for obtaining high-purity betulin from birch bark extracts.

The efficiency of betulin purification is primarily determined by the physicochemical properties of the solvent, temperature conditions, betulin solubility, and the formation of crystalline solvates.

The combination of extraction and recrystallization with chromatographic and spectroscopic control provides a reliable approach to the isolation, identification, and purity assessment of betulin.

The selection of an appropriate solvent system and optimization of purification conditions can reduce the content of accompanying triterpenoids and other impurities while minimizing solvent consumption and process complexity.

The reviewed approaches provide a basis for the development of scalable and environmentally sustainable technologies for producing high-purity betulin from renewable birch bark resources.

INTRODUCTION

Natural triterpenoids and their chemically modified analogues continue to be of considerable interest as promising sources of biologically active substances. Among this broad class of natural compounds, betulin occupies a particularly important position because of its availability, diverse biological properties, and potential for further structural modification. Highly purified

betulin has therefore become the subject of extensive research and is increasingly considered as a valuable

starting material for the development of pharmaceutical and cosmetic formulations [1–8].

Research on betulin has a long history extending over two centuries. Early studies describing its extraction from the outer bark of birch species and subsequent isolation in crystalline form appeared during the first half of the nineteenth century. Nevertheless, interest in this triterpenoid has remained substantial, largely because its practical utilization depends not only on its biological properties but also on the availability of reproducible methods for obtaining material of appropriate purity and quality. Existing extraction procedures allow betulin to be recovered from birch bark; however, further improvement of its isolation and purification remains important for both laboratory studies and potential large-scale applications. Consequently, optimization of extraction conditions, purification procedures, and reliable approaches to compound identification continues to represent an important area of research.

Particular attention may also be given to birch species growing under the specific ecological and geographical conditions of Kazakhstan. Investigation of natural triterpenoids isolated from endemic and locally distributed species, including the Kyrgyz birch (*Betula kirghisorum*), provides an opportunity to compare the qualitative and quantitative composition of bark-derived compounds among birch species

originating from different geographical regions. Such comparative studies may help clarify the relationship between geographical origin, environmental conditions, species-specific characteristics, and the accumulation of triterpenoid constituents in plant raw materials. These data may ultimately provide a scientific basis for evaluating *B. kirghisorum* as a potential local source of betulin and related biologically active compounds.

LITERATURE REVIEW

1. General Information on Betulin and Some of Its Derivatives

Betulin 1 is a naturally occurring pentacyclic triterpenoid belonging to the lupane-type triterpenes. Its systematic name is $3\beta,28$ -dihydroxylup-20(29)-ene, also referred to as lup-20(29)-ene- $3\beta,28$ -diol (Fig. 1).

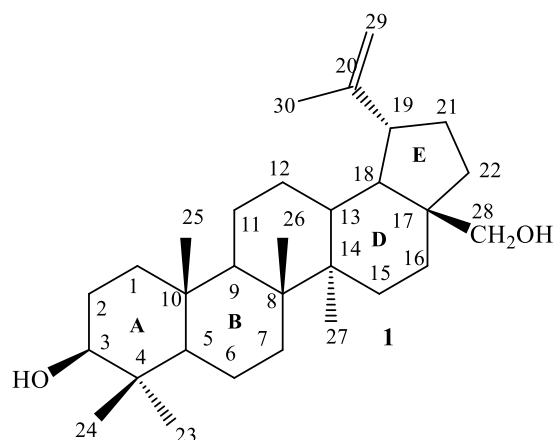


Figure 1. Betulin ($3\beta,28$ -dihydroxylup-20(29)-ene or lup-20(29)-ene- $3\beta,28$ -diol).

The structure of lupane-type triterpenoids is based on a complex polycyclic system containing a cyclopentanoperhydrophenanthrene (sterane) core composed of four fused cyclohexane rings and one saturated cyclopentane ring. According to the conventional numbering of the carbon skeleton, the rings are designated A, B, C, D, and E in order of increasing carbon atom numbers (Fig. 1). A characteristic structural feature of betulin 1, indicating its classification within this group, is the presence of a five-membered E ring and an α -isopropenyl group at the C-19 carbon atom [9].

Birch bark consists of two clearly distinguishable layers: the outer bark and the inner bark. The outer bark is particularly rich in extractive compounds. Betulin 1, which is responsible for the characteristic white color of birch bark, is the major component of nearly all birch

bark extracts. Lupeol 2 is a common accompanying compound during the isolation of betulin (Fig. 2). In addition to betulin 1, birch bark extracts contain several oxidized derivatives, including betulin aldehyde 3, betulonic aldehyde 4, betulinic acid 5, methyl betulinate 6, and 3-oxobetulinic (betulonic) acid 7 (Fig. 2).

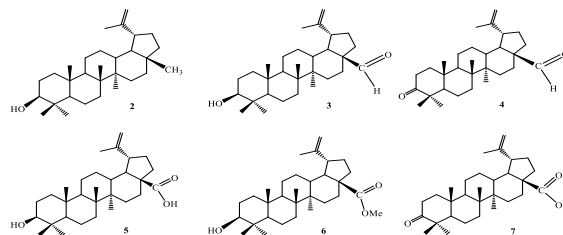


Figure 2. Terpenoids 2–7 accompanying betulin 1 during its isolation from birch bark.

The chemical composition of the bark of several birch species, including *Betula pendula* Roth. (*B. verrucosa* Ehrh.), *Betula pubescens* Ehrh. (*B. alba* L.), and *B. davurica* Pall., has been extensively studied [10]. The betulin content of the outer bark varies from 10 to 40%, depending on the birch species, geographical location and growing conditions, tree age, season, and other factors [11,12].

The diverse properties of betulin are closely associated with its biological role in plants. Betulin is synthesized and accumulated predominantly in the outer protective tissues, where it contributes to the plant's defense against adverse environmental factors. As a component of the protective bark layer, betulin contributes to resistance against radiation, bacteria, fungi, viruses, and insects. The remarkable durability of birch bark is illustrated by its ability to remain preserved in soil for more than 1,000 years without substantial decay, as demonstrated by the well-known birch-bark manuscripts discovered in Novgorod.

METHODS FOR BETULIN PURIFICATION

Betulin (1) is generally obtained as a white crystalline solid that may also display partially amorphous characteristics. Crystallization from commonly used organic solvents does not always produce well-developed large crystals. This behavior can be associated with the structural features of the molecule, particularly the predominance of weakly polar and lipophilic hydrocarbon fragments.

Structurally, betulin (1) contains an olefinic double bond together with two hydroxyl groups of different types: one primary and one secondary alcohol group. The presence of these functional groups substantially

affects its interactions with organic solvents and explains its comparatively greater affinity for media of intermediate polarity than for strongly nonpolar solvents. Betulin has the molecular formula $C_{30}H_{50}O_2$ and a molar mass of 442.72 g/mol. Literature data indicate some variation in its reported melting characteristics. A melting point of 261 °C and an optical rotation of $[\alpha] = +20^\circ$ in pyridine have been reported [14], while Hausmann reported a melting temperature of 258 °C [15]. The compound is odorless and demonstrates good stability upon exposure to atmospheric oxygen and light. It is also generally regarded as non-toxic. According to the literature, betulin (1) is not encountered naturally in an unbound free form [16].

From a physicochemical perspective, betulin is characterized by relatively low chemical reactivity and practically no solubility in water. After isolation, it commonly forms pale or nearly white prismatic crystals. Its solubility increases considerably in several organic media, particularly at elevated temperatures. Betulin dissolves comparatively well in boiling alcohols and is also soluble in ether, chloroform, benzene, pyridine, tetrahydrofuran, and dimethyl sulfoxide. Among alcohols, the reported solubility trend is 1-butanol > 1-propanol > ethanol > 1-pentanol > 1-hexanol > methanol. For ester-based solvents, the corresponding sequence is ethyl acetate > methyl acetate > ethyl formate = methyl formate [17].

In contrast, betulin exhibits limited solubility in nonpolar organic media [18,19]. Its solubility, however, is strongly dependent on temperature as well as solvent properties. This effect can be illustrated by comparing acetone and cyclohexane. At 15.2 °C, approximately 5.2 g/L of betulin can dissolve in acetone, whereas its solubility in cyclohexane is only about 0.1 g/L. Increasing the temperature to 35.2 °C raises these values to 13.7 and 0.67 g/L, respectively. These data demonstrate the pronounced influence of both solvent polarity and temperature on the dissolution behavior of betulin.

Despite its lower solubility in hydrocarbons, the use of nonpolar media can provide important advantages during purification [20]. In particular, recrystallization from such solvents minimizes the formation of solvent-containing crystalline phases. Polar solvents, by contrast, are capable of participating in hydrogen-bonding interactions with the hydroxyl groups of betulin. Hydrogen bonds may therefore be established both between betulin molecules themselves and between betulin and solvent molecules, facilitating solvate formation [20].

Most conventional procedures used for the purification of crude betulin rely on recrystallization from polar protic or aprotic media [21]. Typical solvents include lower aliphatic alcohols, acetone, chloroform, ethyl acetate, and dichloromethane. Although these solvents are suitable for dissolving and recrystallizing betulin, their application has several limitations. In particular, betulin may form crystalline complexes or solvates with the solvent. Furthermore, the selectivity of such systems toward structurally related accompanying components is often insufficient. Crude birch-bark extracts may contain lupeol, polyphenolic compounds, and oxidation products of betulin, including betulinic and betulonic acids as well as related aldehydes. Their efficient separation during conventional recrystallization can therefore be difficult. Another important disadvantage is the loss of the target compound, which may reach approximately 40% during purification.

An alternative strategy aimed at improving the purity of betulin involves recrystallization from high-boiling hydrocarbons. Nonane, which has a boiling point of approximately 151 °C, has been investigated as a representative solvent for this purpose [22,23]. In this procedure, crude betulin is heated under reflux with nonane until complete dissolution of the target compound is achieved.

Recrystallization using nonane has been reported to produce betulin with a purity of up to 98%. The principal advantage of this approach is that a high-boiling hydrocarbon medium reduces the likelihood of forming stable betulin–solvent complexes. At the same time, differences in the physicochemical behavior of the individual components of crude alcoholic birch-bark extracts make their selective separation possible.

The nonane-based procedure may therefore provide not only highly purified betulin but also additional valuable fractions containing polyphenolic compounds and phytosterols. Betulin obtained at approximately 98% purity can be employed in subsequent chemical transformations without an additional purification step. Another technological advantage is the possibility of recovering nonane after the purification process and returning it to the production cycle. Consequently, solvent consumption and overall processing costs can potentially be reduced.

High-purity betulin can also be prepared indirectly through the hydrolysis of its ester derivatives. In particular, betulin diacetate can be hydrolyzed by heating in ethanol in the presence of excess potassium hydroxide. This transformation has been described as an effective route for producing betulin with a purity of approximately 98%.

Chromatographic techniques provide another approach to the purification of lupane- and oleanane-type triterpenoids. Studies [24,25] examining betulin, betulin diacetate, and allobetulin demonstrated favorable results when column chromatography was performed using aluminum oxide as the stationary phase and acetone as the mobile phase. GC–MS analysis indicated that chromatographic treatment increased the proportion of the target triterpenoids by approximately 4–7%, with the final purity reaching about 95–98%. The procedure effectively removes accompanying substances and yields materials suitable for further use in organic synthesis and in electrochemical, microbiological, spectroscopic, and related investigations. Its reported practical benefits include relatively straightforward operation, short processing times, and the ability to obtain highly purified products.

Other purification strategies have also been described. For example, benzene and chloroform have been employed to separate polar and nonpolar contaminants from betulin-containing materials [26]. Another procedure combines alkaline treatment with subsequent removal of accompanying substances using xylene as an aromatic hydrocarbon solvent [27]. These approaches illustrate the variety of solvent systems that have been investigated to exploit differences between the physicochemical properties of betulin and those of associated extractives.

Crystallization conditions have a pronounced effect on the morphology and dimensions of the resulting betulin crystals. In study [26], crystallization of an ethanolic betulin extract produced small, flat, transparent, colorless crystals with an average size of approximately 0.2 mm. In contrast, gradual cooling of a hot saturated ethanol solution to room temperature resulted in substantially larger crystals, with lengths reaching approximately 12 mm. Structural studies have shown that crystallization from ethanol produces an orthorhombic betulin phase containing ethanol in the crystal lattice. The resulting solvate contains betulin and ethanol in a 1:1 ratio, with the two components

associated through hydrogen-bonding interactions [20,28,29].

Melting behavior remains one of the traditional physicochemical parameters used for evaluating the identity and purity of isolated betulin. Published melting temperatures cover a relatively broad interval of approximately 251–261 °C [27], although values near 255 °C are reported most frequently. Thermal observation of ethanol-derived betulin crystals reveals several successive transformations. At approximately 130–140 °C, darkening of the crystals accompanies the release of ethanol. Sublimation becomes noticeable at around 160–170 °C, while heating to 180–200 °C leads to the appearance of new transparent microcrystalline formations on the surface of the initial crystals. Complete melting occurs at approximately 255–256 °C. Subsequent cooling does not restore the original crystalline structure; instead, the material solidifies as an amorphous, glass-like phase. Atmospheric-pressure sublimation has likewise been reported to produce bright white powders consisting of amorphous spherical microparticles [26].

Overall, the available data demonstrate that the efficiency of betulin purification is governed by several interrelated factors, including solvent polarity, temperature, hydrogen-bonding ability, solvate formation, and differences in the solubility of betulin and accompanying birch-bark constituents. Conventional recrystallization, hydrocarbon-based purification, hydrolysis of betulin derivatives, and chromatographic separation each provide different advantages and limitations in terms of purity, product recovery, solvent consumption, and technological complexity. Further optimization of these processes is therefore important for obtaining betulin of reproducible quality and for improving the utilization of birch bark as a renewable source of valuable triterpenoids. Efficient isolation and purification may, in turn, broaden opportunities for the subsequent chemical modification and practical application of betulin and its derivatives.

REFERENCES

- [1] P. A. Krasutsky, “Birch bark research and development,” *Natural Product Reports*, vol. 23, no. 6, pp. 919–942, 2006.
- [2] S. K. Król, M. Kielbas, A. Rivero-Müller, and A. Stepulak, “Comprehensive review on betulin as a potent anticancer agent,” *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, vol. 2015, pp. 1–11, 2015.
- [3] J. J. Tang, J. G. Li, W. Qi, et al., “Inhibition of SREBP by a small molecule, betulin, improves hyperlipidemia and insulin resistance and reduces atherosclerotic plaques,” *Cell Metabolism*, vol. 13, no. 1, pp. 44–56, 2011.
- [4] A. Cunha and R. Batista, “Chemical strategies towards the synthesis of betulinic acid and its more potent antiprotozoal analogues,” *Molecules*, vol. 26, 2021.

- [5] V. Khwaza, B. A. Aderibigbe, and S. Mlala, "Pentacyclic triterpenoids with nitrogen-containing heterocyclic moiety, privileged hybrids in anticancer drug discovery," *Molecules*, vol. 26, no. 9, 2021.
- [6] S. Amiri, S. Dastghaib, and M. Ahmad, "Betulin and its derivatives as novel compounds with different pharmacological effects," *Biotechnology Advances*, vol. 38, 2020.
- [7] A. Al-Snafi, "The medical importance of *Betula alba*—An overview," *Journal of Pharmaceutical Biology*, vol. 5, no. 2, pp. 99–103, 2015.
- [8] A. Hordyjewska, A. Ostapiuk, A. Horecka, and J. Kurzepa, "Betulin and betulinic acid: Triterpenoids derivatives with a powerful biological potential," *Phytochemistry Reviews*, vol. 18, pp. 929–951, 2019.
- [9] P. de Mayo, *Terpeny [Terpenes]*. Moscow, USSR: Inostrannaya Literatura, 1963, 494 p. [In Russian].
- [10] V. I. Sharkov and I. A. Belyaevskii, "K voprosu o khimicheskoi sostave drevesnoi kory. Kora berezy [On the chemical composition of tree bark: Birch bark]," *Lesokhimicheskaya Promyshlennost [Forest Chemical Industry]*, nos. 3–4, pp. 30–33, 1932. [In Russian].
- [11] N. D. Pokhilko and N. I. Uvarova, "Izoprenoidy razlichnykh vidov roda *Betula* [Isoprenoids of various species of the genus *Betula*]," *Khimiya Prirodnikh Soedinenii [Chemistry of Natural Compounds]*, no. 3, pp. 325–341, 1988. [In Russian].
- [12] V. I. Roshchin, N. Yu. Shabanova, and D. N. Vedernikov, "Sposob polucheniya betulina [Method for producing betulin]," Russian Federation Patent RU 2184120, Jun. 27, 2002. [In Russian].
- [13] A. N. Kisilitsyn, "Ekstraktivnye veshchestva beresty: vydelenie, sostav, svoistva, primeneniye [Extractives of birch bark: Isolation, composition, properties, and applications]," *Khimiya Drevesiny [Wood Chemistry]*, no. 3, pp. 3–28, 1994. [In Russian].
- [14] P. Jaaskelainen, "Betulinol and its utilisation," *Paperi ja Puu*, vol. 63, no. 10, pp. 599–603, 1981.
- [15] B. P. Nikol'skii, Ed., *Spravochnik khimika. Tom 2: Osnovnye svoistva neorganicheskikh i organicheskikh soedinenii [Chemist's Handbook. Vol. 2: Basic Properties of Inorganic and Organic Compounds]*. Moscow, USSR: Khimiya, 1964, 1162 p. [In Russian].
- [16] V. A. Levanskii, N. I. Polezhaeva, A. P. Es'kin, V. A. Vink, and B. N. Kuznetsov, "Sposob polucheniya betulina [Method for producing betulin]," Russian Federation Patent RU 2131882 C1, Jun. 20, 1999. [In Russian].
- [17] G. Zhao, W. Yan, and D. Cao, "Simultaneous determination of betulin and betulinic acid in white birch bark using RP-HPLC," *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, vol. 43, no. 3, pp. 959–962, 2007.
- [18] C. Reichardt, *Solvents and Solvent Effects in Organic Chemistry*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag, 2003, 469 p.
- [19] D. Cao, G. Zhao, and W. Yan, "Solubilities of betulin in fourteen organic solvents at different temperatures," *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 52, no. 4, pp. 1366–1368, 2007.
- [20] T. N. Drebuschak, M. A. Mikhailenko, M. E. Brezgunova, et al., "Crystal structure of betulin ethanol solvate," *Journal of Structural Chemistry*, vol. 51, pp. 798–801, 2010.
- [21] M. A. Mikhailenko, T. P. Shakhtshneider, M. E. Brezgunova, et al., "Poluchenie i issledovanie fiziko-khimicheskikh svoistv sol'vatov betulina [Preparation and investigation of physicochemical properties of betulin solvates]," *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya [Chemistry of Plant Raw Material]*, no. 2, pp. 63–70, 2010. [In Russian].
- [22] V. A. Yanovskii, O. S. Andrienko, V. V. Zhuk, A. A. Bakibaev, and V. I. Sachkov, "Sposob ochistki betulina [Method for purification of betulin]," Russian Federation Patent RU 2463306, Oct. 10, 2012. [In Russian].
- [23] V. V. Zhuk, V. A. Yanovskii, E. A. Yanovskaya, A. A. Bakibaev, O. S. Andrienko, Sh. M. Sharafiev, and V. I. Sachkov, "Perekristallizatsiya ekstraktov betulina iz vysokokipyashchikh uglevodorodnykh rastvoritelei [Recrystallization of betulin extracts from high-boiling hydrocarbon solvents]," *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya [Chemistry of Plant Raw Material]*, no. 2, pp. 73–78, 2012. [In Russian].
- [24] S. S. Kalieva, E. A. Mamaeva, A. A. Bakibaev, et al., "Sposoby ochistki nekotorykh pentatsiklicheskh triterpenoidov [Purification methods for some pentacyclic triterpenoids]," *Bulletin of the Karaganda University. Chemistry Series*, no. 2, pp. 35–39, 2017. [In Russian].
- [25] S. S. Kalieva, E. A. Mamaeva, E. Nurpeis, et al., "Spektral'nye i khromatograficheskie kharakteristiki betulina i nekotorykh ego proizvodnykh [Spectral and chromatographic characteristics of betulin and some of its derivatives]," *Bulletin of L. N. Gumilyov Eurasian National University. Natural and Technical Sciences Series*, no. 4, pt. 1, pp. 235–240, 2017. [In Russian].
- [26] P. Šiman, A. Filipová, A. Tichá, et al., "Effective method of purification of betulin from birch bark: The importance of its purity for scientific and medicinal use," *PLOS ONE*, vol. 11, no. 5, 2016.
- [27] P. A. Krasutsky, I. V. Kolomitsyn, and D. A. Krasutskyy, "Depolymerization extraction of compounds from birch bark," U.S. Patent 8,197,870 B2, Jun. 12, 2012.
- [28] S. A. Kuznetsova, G. P. Skvortsova, I. N. Maliar, et al., "Extraction of betulin from birch bark and study of its physico-chemical and pharmacological properties," *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, vol. 40, no. 7, pp. 742–747, 2014.
- [29] K. M. Bhat, "Anatomy, basic density and shrinkage of birch bark," *IAWA Bulletin*, vol. 3, pp. 207–211, 1982.

Chemical and pharmaceutical technologies. Life safety

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/169>

A METHOD FOR COLLECTING AND DISPOSING OF PETROLEUM PRODUCTS USING POLYURETHANE SORBENTS

¹*Ibray D., ¹Iskalieva A., ¹Utesheva Z, ²Bexultanov R., ³Iskaliev A.

¹ School of Chemical Engineering, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

²College of Agriculture, Shihezi University, Xinjiang, China

³LLC "KATOBNEFT"

*Corresponding author email: d_ibray@kbtu.kz

Author information:

Ibray Danat, School of Chemical Engineering, Kazakh-British Technical University, Str. Tole bi, 59, 050000, Almaty, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4549-5229>, e-mail: d_ibray@kbtu.kz

Iskalieva Asylzat Zhambulovna Ph.D, School of Chemical Engineering, Kazakh-British Technical University, Str. Tole bi, 59, 050000, Almaty, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4806-4137>, e-mail: asylzat@bk.ru

Utesheva Zhamilya, School of Chemical Engineering, Kazakh-British Technical University, Str. Tole bi, 59, 050000, Almaty, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1118-6302>, e-mail: zhamilyautesheva87@gmail.com

Bexultanov Rustem Bagdatovich, Master's Student at the College of Agriculture, Shihezi University, North 4th Road, Xinjiang, China, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-6975-4273>, e-mail: rbexult@gmail.com

Iskaliev Aituar, LLC "KATOBNEFT", Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Yugra, 16 Str. Lenina, 628609, Nizhnevartovsk, Russia, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9302-3345>, e-mail: aituar92@bk.ru

Abstract — Environmental pollution by petroleum products represents a critical global challenge, necessitating the development of efficient, sustainable, and reusable remediation technologies. Sorption is widely recognized as one of the most environmentally friendly methods for oil spill cleanup. This review article provides a comprehensive analysis of polyurethane (PU) sorbents, focusing on their structural morphology, sorption capacity, and performance under varying environmental conditions. We examine recent advancements in patent developments, ranging from basic porous architectures to nanomodified matrices and stimuli-responsive "smart" sorbents. Furthermore, the article evaluates the trade-offs between mechanical strength, sorption efficiency, and reusability, while addressing the challenges of scaling laboratory prototypes to real-world industrial applications. The study highlights the role of polyurethane sorbents in promoting a circular economy and outlines future research trajectories, including the shift toward bio-based synthesis and integrated autonomous collection systems.

Keywords — polyurethane sorbents; oil spill remediation; circular economy; environmental protection; nanomodified materials; sorption capacity; sustainable development.

ПОЛИУРЕТАНДЫ СОРБЕНТТЕРДІ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, МҰНАЙ ӨНІМДЕРІН ЖИНАУ ЖӘНЕ КӘДЕГЕ ЖАРАТУ ӘДІСІ

¹*Ибрай Д., ¹Искалиева А., ¹Утешева Ж, ²Бексултанов Р, ³Искалиев А.

¹Химиялық инженерия мектебі, Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

²Шихэцзы университетінің Ауыл шаруашылығы колледжі, Шихэцзы, Қытай

³ООО «КАТОБНЕФТЬ»

* Корреспондент E-mail: d_ibray@kbtu.kz

Авторлар туралы ақпарат:

Ибрай Данат, Химиялық инженерия мектебі, Қазақ-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі, 59, 050000, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4549-5229>, e-mail: d_ibray@kbtu.kz

Искалиева Асылзат Жамбылқызы, PhD, Химиялық инженерия мектебі, Қазақ-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі, 59, 050000, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4806-4137>, e-mail: asylzat@bk.ru

Утешева Жамиля, Химиялық инженерия мектебі, Қазақ-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі, 59, 050000, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1118-6302>, e-mail: zhamilyautesheva87@gmail.com

Бексултанов Рустем Багдатұлы, Шихэцзы университетінің Ауыл шаруашылығы колледжінің магистранты, Солтүстік 4-ші жол, Шыңжаң, Қытай, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-6975-4273>, e-mail: rbexult@gmail.com
Искалиев Айтуар, «КАТОБЬНЕФТЬ» ЖШС, Ханты-Мансийск автономиялық округі – Югра, Ленин көшесі, 16-үй, 628609, Нижневартовск, Ресей, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9302-3345>, e-mail: aituar92@bk.ru

Абстракт — Мұнай өнімдерімен қоршаған ортаның ластануы - тиімді, тұрақты және қайта пайдалануға болатын тазарту технологияларын дамытуды талап ететін ең өткір жаһандық экологиялық мәселелердің бірі. Сорбция әдісі мұнай төгінділерін жоюдың экологиялық қауіпсіз тәсілдерінің бірі ретінде танылған. Бұл шолу мақаласында полиуретанды (ПУ) сорбенттерге, олардың құрылымдық морфологиясына, сорбциялық сыйымдылығына және қоршаған ортаның әртүрлі жағдайларындағы өнімділігіне кешенді талдау жасалған. Біз патенттік әзірлемелердегі соңғы жетістіктерді: қарапайым кеуекті құрылымдардан бастап наномодификацияланған матрицаларға және сыртқы әсерлерге жауап беретін «ақылды» сорбенттерге дейін қарастырамыз. Сонымен қатар, мақалада механикалық беріктік, сорбция тиімділігі мен қайта пайдалану мүмкіндігі арасындағы тепе-теңдік бағаланады, сондай-ақ зертханалық прототиптерді өнеркәсіптік ауқымға дейін ұлғайту мәселелері талқыланады. Жұмыс полиуретанды сорбенттердің айналым экономикасын (circular economy) дамытудағы рөлін көрсетеді және биологиялық негіздегі синтезге көшу мен автономды жинау жүйелеріне интеграциялауды қоса алғанда, зерттеудің перспективалық бағыттарын айқындайды.

Кілт сөздер — полиуретанды сорбенттер; мұнай төгінділерін жою; айналым экономикасы; қоршаған ортаны қорғау; наномодификацияланған материалдар; сорбциялық сыйымдылық; орнықты даму.

МЕТОД СБОРА И УТИЛИЗАЦИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ СОРБЕНТОВ

¹*Ибрай Д., ¹Искалиева А., ¹Утешева Ж, ²Бексултанов Р, ³Искалиев А.*

¹*Школа Химической Инженерии, Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан*

²*Сельскохозяйственный колледж Университета Шихэцзы, Шихэцзы, Китай*

³*ЖШС «КАТОБЬНЕФТЬ»*

**E-mail корреспондентал: d_ibray@kbtu.kz*

Ибрай Данат, Школа химической инженерии, Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, 050000, Алматы, Казахстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4549-5229>, e-mail: d_ibray@kbtu.kz.

Искалиева Асылзат Жамбылқызы, PhD, Школа химической инженерии, Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, 050000, Алматы, Казахстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4806-4137>, e-mail: asylzat@bk.ru.

Утешева Жамиля, Школа химической инженерии, Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, 050000, Алматы, Казахстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1118-6302>, e-mail: zhamilyautesheva87@gmail.com

Бексултанов Рустем Багдатович, магистрант Колледжа сельского хозяйства Университета Шихэцзы, Северная 4-я дорога, Синьцзян, Китай, ORCID ID: : <https://orcid.org/0009-0003-6975-4273>, e-mail: rbexult@gmail.com

Искалиев Айтуар, ООО «КАТОБЬНЕФТЬ», Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, ул. Ленина, д. 16., 628609, Нижневартовск, Россия, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9302-3345>, e-mail: aituar92@bk.ru

Аннотация — Загрязнение окружающей среды нефтепродуктами остается одной из наиболее острых глобальных экологических проблем, требующей разработки эффективных, устойчивых и многообразных технологий очистки. Метод сорбции признан одним из наиболее экологически безопасных способов ликвидации разливов нефти. В данной обзорной статье представлен комплексный анализ полиуретановых (ПУ) сорбентов, с особым вниманием к их структурной морфологии, сорбционной емкости и характеристикам в различных условиях окружающей среды. Мы рассматриваем последние достижения в области патентных разработок - от базовых пористых структур до наномодифицированных матриц и «умных» сорбентов, реагирующих на внешние раздражители. Кроме того, в статье оценивается баланс между механической прочностью, эффективностью сорбции и возможностью повторного использования, а также рассматриваются проблемы масштабирования лабораторных прототипов для промышленного применения. Работа подчеркивает роль полиуретановых сорбентов в развитии экономики замкнутого цикла и определяет перспективные направления исследований, включая переход к синтезу на биологической основе и интеграцию в автономные системы сбора.

Ключевые слова — полиуретановые сорбенты; ликвидация разливов нефти; экономика замкнутого цикла; охрана окружающей среды; наномодифицированные материалы; сорбционная емкость; устойчивое развитие.

MAIN PROVISION

The study demonstrated that polyurethane-based sorbent architectures achieve high oil sorption capacities ranging typically from 18 to 22 g/g, with specialized low-density formulations ($<20 \text{ kg/m}^3$) reaching up to 50 g of oil per 1 g of material.

Polyurethane matrices exhibit high operational stability and structural retention, maintaining effective sorption performance across at least 10 mechanical regeneration cycles (pressing/extraction) without significant loss of absorption efficiency.

Optimization of structural morphology -specifically the formation of a bimodal porous network combining macropores ($>100 \text{ }\mu\text{m}$) for rapid absorption and micropores ($<10 \text{ }\mu\text{m}$) for retention-significantly accelerates hydrocarbon uptake kinetics and selective retention over water.

The incorporation of natural fillers, such as rice or buckwheat husks up to 60 wt%, reinforces the mechanical strength of the polyurethane matrix while preserving high oil capacities of up to 40 g/g in granular formats.

The proposed collection and disposal method enables chemical-free remediation and circumvents high-temperature thermal incineration, making it a reusable, circular-economy-compliant solution for both freshwater and sub-zero marine environments.

INTRODUCTION

Environmental pollution by petroleum products remains one of the most urgent environmental problems. According to the International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF, 2023), up to 10,000 oil spills are recorded worldwide each year, 70% of which affect aquatic ecosystems. The economic damage from such accidents is enormous: for example, the elimination of the consequences of the spill on the Deepwater Horizon platform cost \$ 65 billion. Oil spills also pose a threat to biodiversity, the sustainability of marine and freshwater ecosystems, as well as the safety of drinking water and food chains [1]. Modern methods of eliminating oil pollution include mechanical removal, the use of dispersants, combustion and sorption. Of these, the sorption method is recognized as the most environmentally friendly and universal [4].

The scientific community is paying more and more attention to the development of new generations of sorbents: textile, biodegradable, nanomodified, magnetic and superhydrophobic. Studies have shown that the use of natural materials (cellulose, coconut fibers, sphagnum) after chemical modification provides efficiency comparable to synthetic analogues with a smaller ecological footprint [2-3].

Research Gap. Although numerous studies have reported synthetic sorbents with high initial oil absorption capacities, the systematic integration of structural modification, cyclic mechanical recovery, and circular lifecycle management remains insufficiently investigated. Existing literature predominantly focuses on pristine laboratory prototypes operating in idealized static conditions, leaving critical questions unanswered regarding pore-collapse mechanisms under cyclic compression, selective phase separation in turbulent oil-water emulsions, and low-temperature kinetic performance. Furthermore, a coherent synthesis bridging patented technological advances (such as bimodal open-cell tailoring and bio-filler reinforcement) with practical scalable manufacturing and non-thermal regeneration is currently lacking. This study fills these gaps by analyzing the direct correlation between microstructural architecture and multi-cycle durability, providing a consolidated framework for sustainable PU sorbent deployment.

Scientific Novelty. This study provides a unified comparative assessment that directly correlates specific microcellular parameters particularly the synergy between macroporous transport conduits ($>100 \text{ }\mu\text{m}$) and microporous retention cells ($<10 \text{ }\mu\text{m}$) with multi-cycle mechanical pressing resilience and operational longevity across diverse hydrocarbon grades. For the first time, this work integrates an analytical patent-landscape evaluation with technical performance benchmarks to establish quantitative trade-offs between chemical hydrophobization, natural byproduct incorporation (such as agricultural biomass up to 60 wt%), and non-thermal regeneration efficiency. It extends conventional sorbent research by identifying

the precise mechanical and thermodynamic boundaries required to retain up to 90% sorption capacity over 10 consecutive cycles without generating toxic secondary emissions. The scientific value lies in establishing an actionable structural-property guideline for engineering low-cost, bio-augmented polyurethane matrices ready for industrial transition within a circular economy framework.

LITERATURE REVIEW

Foamy (porous) sorbents: They are porous materials that have many micropores and macropores. This allows them to effectively absorb liquids and gases.

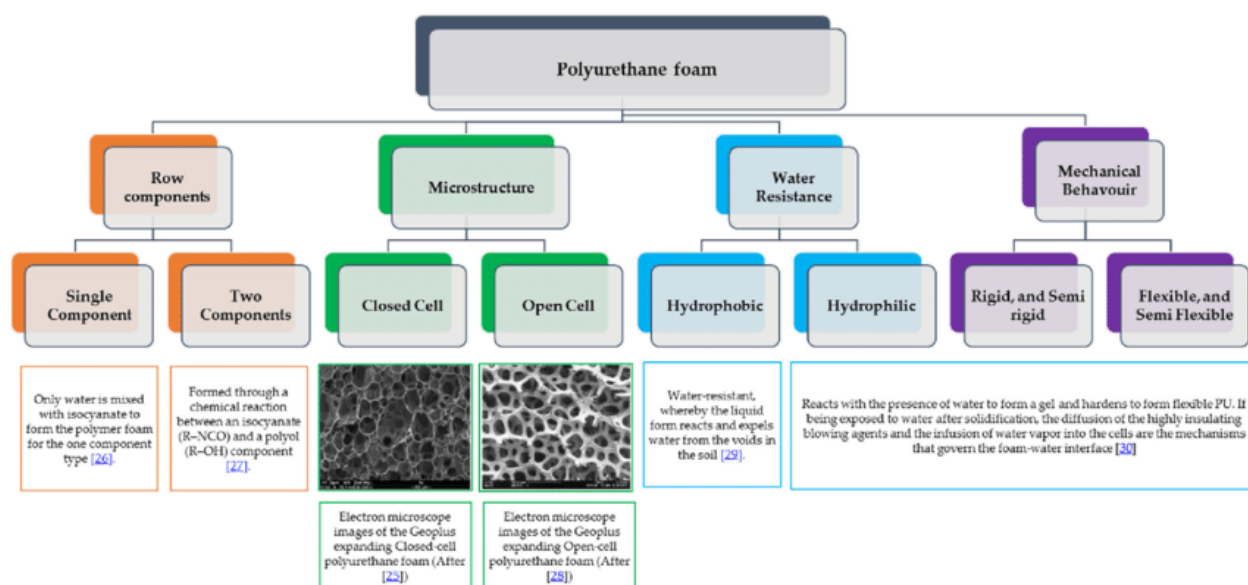


Figure 1 – Types and main characteristics of polyurethane foam materials [5].

Powder sorbents: These are materials consisting of polyurethane powder or granules that are used to adsorb pollutants.

Film sorbents: Used for surface treatment or filtration, have a thin film structure.

Granular sorbents: Polyurethane granules that can be used to remove various pollutants from water or air.

Amorphous sorbents: These are materials without a well-defined crystal structure. They can absorb large amounts of liquid, as they have a disordered porous structure.

Crystalline sorbents: They have an organized structure that limits their absorption capacity, but they can be more stable and durable under certain conditions.

Microporous sorbents: They have small-diameter pores that are capable of adsorbing small molecules.

Mesoporous sorbents: Medium-sized pores suitable for capturing larger molecules.

Macroporous sorbents: With a large pore diameter that absorb molecules with a larger molecular weight.

Currently, various technologies are used to eliminate oil spills:

Mechanical methods: booms, skimmers, vacuum installations.

Chemical methods: dispersants, coagulants.

Biological methods: the use of microorganisms for biodegradation.

Sorption methods: the use of sorbents of various origins (organic, inorganic, synthetic).

Each of these methods has its advantages and disadvantages. For example, mechanical means are effective only under certain conditions, chemical reagents can be toxic, and biological purification requires a long time. Among sorption materials, polyurethane sorbents with high absorption capacity attract special attention.

Table 1 – Table of comparative parameters of oil collection and utilization methods.

Method	Effectiveness	Cost	Environmental friendliness
Mechanical	Medium	High	Neutral
Chemical	High	Low	Toxic
Biological	Low	Medium	Safe
Polyurethane	High	Medium	Safe

Despite the widespread use of traditional methods of oil spill response, their use is associated with a number of significant limitations. In particular, the effectiveness of most technologies is significantly reduced in conditions of high seas and low

temperatures, which limits their use in marine and Arctic regions [6]. In addition, the high cost of chemicals and specialized equipment makes it difficult to implement them into

operational environmental programs, especially in hard-to-reach

areas [7]. An equally important factor is the likelihood of secondary environmental pollution by processed products resulting from the use of chemical and thermal methods. It should also be noted the duration and energy intensity of the recycling process of collected petroleum products, which reduces the overall effectiveness of emergency rescue measures and requires additional logistical and financial resources [8]. These disadvantages emphasize the need to develop new solutions, in particular, the use of polyurethane sorbents, which demonstrate high efficiency and environmental friendliness.

MATERIALS AND METHODS

The patented method of collecting and disposing of petroleum products is based on the use of polyurethane sorbents with high sorption capacity, resistance to repeated use, as well as ease of handling and environmental safety. The sorbents used are characterized by a developed porous structure, which ensures effective absorption of oil and petroleum products from the water surface even in difficult climatic conditions. The process includes immersion of the sorbent in the contamination zone, mechanical extraction and subsequent extraction in order to extract oil, after which the material can be reused. Modern research confirms that modified polyurethane compositions retain their performance properties at low temperatures and at high salinity, and also allow up to 10 regeneration cycles without significantly reducing efficiency. Such characteristics make this approach particularly promising for use in emergency situations, including remote and hard-to-reach regions, as well as within the framework of a sustainable development strategy and a circular economy.

For a more detailed analysis of the effectiveness of the patented method, it is advisable to consider its comparative advantages over existing technologies. First of all, polyurethane sorbents can significantly reduce the total oil spill response time compared to biological and chemical methods, which is especially important in rapid response conditions. An important advantage is economic efficiency: the possibility of repeated use of sorbents significantly reduces the cost of both consumables and waste disposal. In addition, the proposed method does not require the use of toxic chemicals, so its impact on the environment is minimal, which makes it preferable from the point of view of environmental safety.

RESULTS AND DISCUSSION

In recent years, sorption purification methods using polyurethane materials have received

significant development, which is reflected in numerous patent developments.

However, the practical application of polyurethane (PU) sorbents faces significant limitations, among which it should be noted low selectivity when working with oil-water emulsions, gradual degradation of the structure during multiple regeneration cycles, as well as a pronounced dependence of efficiency on external conditions - temperature, salinity of water and degree of turbulence. Within the framework of this review article, special attention is paid to the analysis of experimental data presented in modern patent solutions, which makes it possible to identify the main areas of improvement of PU sorbents. Modern research demonstrates three key areas of modification: optimization of the porous architecture by creating a bimodal structure with a combination of macropores (>100 microns) for rapid absorption and micropores (<10 microns) for effective retention of petroleum fractions; introduction of functional additives, including magnetic nanoparticles and fluorinated polymers; development of advanced regeneration methods such as mechanical heat treatment and solvent extraction. A special emphasis in the review is placed on the correlation between the structural features of sorbents and their operational characteristics in real conditions.

Bembel V.M., Basova S.P., Safonov G.A. [9] developed a sorbent based on cellulose fibers (cotton wool, industrial wool) modified with styrene-butadiene block copolymer. The invention is intended for the removal of oil and petroleum products from the surface of water and soil, including emergency spills and wastewater. The sorbent is not wetted with water, is easy to assemble and can be regenerated repeatedly. The production method involves applying a polymer from an organic solution followed by drying. The authors achieved high oil capacity at low cost and simplicity of technology. The composition is resistant to aggressive environments and retains its structure after several cycles of use. This makes the solution particularly suitable for emergency situations and cleaning of polluted reservoirs.

Grebenkin A.A. and Grebenkin A.N. [10] proposed a method for obtaining sorbent from pulp and paper production waste modified with sodium methyl silicate. The main purpose of the invention is to create a material capable of staying on the surface of water for a long time without the risk of immersion, which is critical in the elimination of emergency spills. The sorbent is obtained by the method of aerial spontaneous drying followed by heat treatment, which increases its hydrophobicity. The developed

composition does not sink even after saturation with oil and effectively absorbs

hydrocarbons. The authors achieved an increase in the "buoyancy" time of the sorbent to full saturation. It is easily collected from the surface of the water and must be disposed of. The solution is relevant for cleaning reservoirs and oil sludge barns.

Abdullin I.Sh., Gafarov I.G., Mishulin G.M. and others [11] developed a sorbent based on rice husk enriched with silica. The material is obtained by heat treatment in plasma at reduced pressure with the introduction of silicon oxide powder. The resulting porous matrix has a pore size of 5-30 microns, and SiO_2 particles have a pore size of 50-250 nm. The sorption capacity is 24-45 g of oil per 1 g of sorbent. This approach makes it possible to use cheap vegetable raw materials and ensure high efficiency of wastewater and natural water treatment from hydrocarbons and heavy metals. The sorbent is environmentally friendly and applicable to a wide range of contaminants.

Sirotkina E.E., Safonov G.A., Bembel V.M., Boltrukevich E.P. (patent RU2061541C1) have developed a sorbent for collecting oil and petroleum products from the surface of water. The invention relates to the field of obtaining new adsorption materials and can be used to clean the water surface from contamination. The sorbent contains fibrous materials: textile waste, industrial cotton wool and other cellulose-containing materials treated with oxidized atactic polypropylene at the following component ratio, % by weight: oxidized atactic polypropylene 3-7, fibrous cellulose material 93-97. This composition provides high sorption capacity and resistance to water. The sorbent is easily collected from the surface of the water and must be disposed of. The solution is relevant for cleaning reservoirs and oil sludge barns.

Sergey Baskakov and the staff of the Laboratory of Nanomaterials Spectroscopy at the PHC PHB iMH RAS [12] have developed a superhydrophobic aerogel based on graphene and polytetrafluoroethylene (Teflon) for collecting oil and petroleum product spills. The sorbent has a density of only 8 g/l and a wetting angle of 169° , which ensures its high hydrophobicity and efficiency in collecting hydrocarbons from the surface of water and land. The material is capable of absorbing up to 61 g of oil per 1 g of sorbent and retains its buoyancy even in stormy conditions. The sorbent can be used repeatedly due to the possibility of restoring sorption properties after heat treatment. The invention is relevant for use in Arctic zones and other difficult conditions. The development has aroused the interest of Russian oil companies and sorbent manufacturers.

Dedov A.G., Ivanova E.A., Belousova E.E., and others [13] proposed a biodegradable composite sorbent based on a copolymer of acrylonitrile with methyl acrylate and a crushed plant of the genus *Sphagnum*. The sorbent is

intended for collecting oil and petroleum products at the bottom of water areas. The material has a low buoyancy, which allows it to sink to the bottom and adsorb hydrocarbons from the water surface. The sorption capacity is 35 g of oil per 1 g of sorbent, and for fuel oil — up to 70 g/g. The sorbent is able to retain sorbate for at least 10 minutes when removed from the surface of the water area. The inclusion of sphagnum promotes the biodegradation of polymer fiber, eliminating the need to recycle waste materials. The sorbent is effective for cleaning ballast water from ships and wastewater.

Dmitrieva Z.T., Bystritskaya M.A. and Bylina I.V. [14] developed a sorbent for collecting oil, oils, fuel oil and other hydrocarbons from the surface of water and land. The invention relates to the field of sorbents and can be used to clean contaminated surfaces. The sorbent is highly effective in removing petroleum products, preventing contamination of water bodies and soil. The material provides fast and efficient absorption of hydrocarbons, reducing environmental damage from oil spills. The sorbent can be used in various conditions, including emergency situations on seas and rivers. The development helps to preserve the ecological balance and prevent the death of flora and fauna.

Melnikov I.N., Olshanskaya L.N., Zakharchenko M.Yu., and others [17] proposed a powdered magnetic sorbent for oil collection containing iron oxide in the form of Fe_3O_4 and coconut activated carbon. The sorbent has a high sorption capacity and activity in a magnetic field, which ensures effective removal of oil from various surfaces. The use of this sorbent makes it possible to quickly and effectively clean contaminated areas, reducing environmental damage. The sorbent is easily collected from the surface of the water and must be disposed of. The solution is relevant for use in emergency situations and for regular cleaning of reservoirs. The development has the potential for wide application in various climatic conditions. The sorbent can be used in various industries, including oil and gas and chemical.

Lektorskaya V.E., Prutenko D.A., Pomogaibo S.B., and others [15] developed a sorbent for collecting oil and a method for its production. The sorbent consists of powdered carbon, polyamide fiber, rubber chips and a hydrophobizer. The manufacturing process involves grinding the rubber material to a crumb about 4-6 mm in size, treating the polyamide fiber with a hydrophobizer, and mixing the components in a specific sequence. This composition provides high sorption capacity and resistance to water. The sorbent is easily collected from the surface

of the water and must be disposed of. The solution is relevant for cleaning reservoirs and oil sludge barns. The development contributes to the effective removal of petroleum products from contaminated surfaces.

M.V. Abramov, L.A. Zekel, V.D. Ivanov, and others [16] have developed a sorbent for collecting petroleum products from the surface of water and a method of its application. The sorbent is based on hydrophobized ash xenospheres treated with bitumen, which ensures high efficiency in the collection of petroleum products. The use of this sorbent makes it possible to effectively clean water surfaces from oil pollution, ensuring environmental safety. The development is relevant for use in emergency situations and for regular cleaning of reservoirs. The sorbent is easily collected from the surface of the water and must be disposed of. The solution helps to reduce environmental damage from oil spills. The development has the potential for wide application in various climatic conditions.

Research by the team led by Kuznetsov, A.V. (2002) showed that polyurethane sorbents with an apparent density of $<20 \text{ kg/m}^3$ and a micropore fraction $>50\%$ demonstrate a sorption capacity of up to 50 g of oil per 1 g of material. Experiments have confirmed that such sorbents remain effective after 10 cycles of regeneration by pressing.

Yerofeevskaya L.A., Sivtsev S.I., Vit A.A., and others [18] have developed an oil biosorbent for cleaning and restoring oil-contaminated lands. The sorbent has the ability to activate the processes of microbiological activity in oil-contaminated soils in a wide range of ambient temperatures from $+5$ to $+40$ °C. The use of this sorbent makes it possible to effectively clean and restore contaminated areas, ensuring environmental safety. The sorbent is easily available for execution and does not require expensive and time-consuming operations. The solution is relevant for use in various natural and climatic conditions. The development has the potential for wide application in various industries, including oil and gas and chemical. The sorbent helps to reduce environmental damage from oil spills.

Petrov, S. I. and co-authors (2008) found that the addition of buckwheat husks or rice (up to 60% by weight) The polyurethane matrix increases the mechanical strength of the sorbent without reducing the oil capacity (up to 40 g/g). Field tests have shown that the granular form (0.5–4 cm) is suitable for use on polluted soils.

The results of experimental studies indicate that the sorption capacity of polyurethane sorbents directly depends on the morphology of the porous

structure and the methods of chemical modification used. It has been found that, on average, such sorbents are capable of absorbing from 18 to 22 grams of oil per gram of material,

which makes them highly effective in comparison with a number of alternatives. A significant factor affecting the kinetics of sorption is the preliminary hydrophobization of the surface, which promotes faster and more selective absorption of hydrocarbons. In addition, polyurethane sorbents demonstrate resistance to degradation of their characteristics during reuse: their efficiency is maintained for at least ten sorption and regeneration cycles without significant loss of oil capacity. Such properties confirm the potential of polyurethane materials in the context of sustainable and reusable solutions for oil spill response.

Minimal environmental pollution. Unlike chemical reagents, PU sorbents do not contain toxic components and do not form dangerous by-products during operation. Reducing the amount of waste. Thanks to repeated regeneration, sorbents can be used up to 10 times without significant loss of efficiency, which reduces the amount of waste generated. High selectivity. Polyurethane materials absorb mainly petroleum products, practically without absorbing water. This avoids contamination of the treated environment with secondary impurities. Reduction of greenhouse gas emissions. Traditional recycling systems often use the incineration of contaminated materials. PU sorbents make it possible to dispense with thermal recycling, which reduces emissions of CO_2 and other greenhouse gases. The possibility of environmentally friendly disposal. Modern polyurethane matrixes can be recycled or used as secondary raw materials, which corresponds to the principles of circular economy. Absence of negative impact on biocenoses. Sorbents do not harm flora and fauna, as they do not release harmful substances into the aquatic environment and do not break down into toxic fragments. Together, these factors make polyurethane sorbents an effective and safe solution for environmental protection in both the short and long term.

Application and development prospects

Polyurethane sorbents are widely used in various fields due to their versatility, high sorption capacity and the possibility of repeated use. First of all, they are in demand in the elimination of emergency oil spills in open water bodies, including seas, rivers and coastal zones. Their use is especially important at low temperatures, as modified polyurethanes retain elasticity and

functionality even at subzero temperatures. One of the promising areas is the use of PU sorbents in the oil production and refining industries. In such conditions, it is possible not only to promptly eliminate emergency spills, but also to organize constant monitoring and local wastewater treatment. In addition, polyurethane

materials can be used for wastewater filtration and reuse of purified water at technological stages. In the future, nanomodification of polyurethane matrices will become a key area of development. The addition of nanoparticles (for example, metal oxides or carbon nanostructures) will increase the specific sorption capacity, increase selectivity to certain pollutants, and improve the mechanical characteristics of the material [19]. In addition, it is expected to develop "smart" sorbents capable of changing their structure under the influence of external factors (pH, temperature, magnetic field), which will provide more flexible and precise control of the purification process. Thus, polyurethane sorbents represent not only an urgent, but also a strategically promising solution for combating environmental pollution, having the potential to integrate into innovative technological platforms of the 21st century.

CONCLUSION

The analysis shows that polyurethane sorbents represent one of the most promising areas in the field of collection and disposal of petroleum products. Their high sorption capacity, selectivity, resistance to reuse and environmental safety make them especially valuable in the context of modern environmental protection requirements. Unlike traditional mechanical, chemical and biological methods, the use of polyurethane sorbents makes it possible to achieve higher cleaning efficiency at lower cost and minimal impact on nature. In addition, the ability to regenerate and possible inclusion in the circular economy favorably

distinguish PU sorbents from their analogues. Patented technologies based on

polyurethane compositions demonstrate a variety of development paths: from simple porous structures to nanomodified matrices with controlled properties. It is especially important to create materials adapted to different climatic and operational conditions. In the future, in-depth research is needed to increase the durability of sorbents, reduce the cost of their production and develop environmentally friendly methods of their regeneration and disposal. The development of smart and biocompatible polyurethane systems may be the next step in the evolution of oil pollution control methods. Thus, polyurethane sorbents are not only an effective tool for environmental cleaning, but also an important element of sustainable development, integrated into the global environmental protection agenda.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest, financial or otherwise.

CRedit author statement: *A.Iskalieva: Conceptualization, Methodology, Writing original draft, Investigation. D.Ibray: Investigation, Project administration, Resources and Validation. Z.Utesheva: Visualisation, Reviewing, and Editing.*

Copyright © 2026 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] A. T. Hoang and X. P. Nguyen, "A review on sorbent devices for oil-spill control," *Environmental Pollution*, vol. 241, pp. 105–115, Oct. 2018.
- [2] Y. Zhang, Y. Chen, J. Zhang, L. Zhang, and M. Liu, "A review of bio-based materials for oil spill treatment," *Water Research*, vol. 135, pp. 262–277, May 2018.
- [3] J. Y. Tan, S. Y. Low, and P. C. Lee, "Application of sorbents for oil spill cleanup focusing on natural sorbent materials," *Molecules*, vol. 25, no. 19, Art. no. 4522, Oct. 2020.
- [4] J. Li, X. Li, C. Zhang, J. Wang, and L. Chen, "Recent advances in developing cellulosic sorbent materials for oil spill cleanup," *Journal of Cleaner Production*, vol. 320, Art. no. 128848, Oct. 2021.
- [5] "Types and main characteristics of polyurethane foam materials," *ResearchGate*, Fig. 3, 2021.
- [6] J. Cisneros-Aguirre and M. Afonso-Correa, "Integrated application of innovative technologies for oil spill remediation in Gran Tarajal Harbor: A scientific approach," *Waste*, vol. 2, no. 4, pp. 414–450, Nov. 2024.
- [7] H. Duarte, M. J. Aliaño-González, A. Romano, and B. Medronho, "Advancements in detection and mitigation strategies for petroleum-derived contaminants in aquatic environments: A comprehensive review," *Sensors*, vol. 24, no. 11, Art. no. 3284, May 2024.
- [8] A. Dhaka and P. Chattopadhyay, "A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills," *Journal of Environmental Management*, vol. 288, Art. no. 112428, Jun. 2021.
- [9] V. Bembel, S. Basova, G. Safonov, and I. N. S. Ran, "Sorbent for collecting oil and petroleum products from the water surface," Russian Patent RU 2097125 C1, Aug. 7, 1995.
- [10] A. A. Grebenkin, A. N. Grebenkin, and O. S. O. O. Technologies, "A method for obtaining a sorbent for cleaning the water surface from oil and petroleum products," Russian Patent RU 2798581 C1, Dec. 9, 2022.

- [11] I. N. Sh. Abdullin, I. G. Gafarov, G. Mishulin Jr., G. Z. Paskalov, T. N. Svetlakova, V. A. Usenko, and R. F. Sharafiev, "A sorbent for removing petrochemical contaminants from liquid media and a method for its production," Russian Patent RU 2459660 C2, Nov. 9, 2010.
- [12] Russian Academy of Sciences, "Patented superhydrophobic aerogel for collecting oil spills," *RAS News*, 2023.
- [13] A. G. Dedov, E. A. Ivanova, E. E. Belousova, P. B. Kashcheeva, E. Yu. Karpova, R. K. Idiatulov, M. P. Kirpichnikov, E. I. Lobakova, S. G. Vasilyeva, A. E. Solovchenko, and F. Gubkina, "Biodegradable composite sorbent of petroleum and petroleum products," Russian Patent RU 2528863 C1, Jun. 3, 2013.
- [14] "Sorbent of petroleum products," Russian Patent RU 2071829 C1, Jan. 20, 1997.
- [15] V. E. Lektorskaya, A. Prutenko, S. B. Pomogaibo, G. G. Pomogaibo, and V. Smolyaninov Jr., "Sorbent for oil collection and method of its production," Russian Patent RU 2479348 C1, Aug. 31, 2011.
- [16] M. Abramov, L. Zekkel, V. Ivanov, Yu. Itkin, S. Krechetova, Shpirt Jr., E. Chunin, and A. O. Materials, "A sorbent for collecting petroleum products from the surface of water and a method for collecting petroleum products," Russian Patent RU 2069184 C1, Nov. 23, 1993.
- [17] I. N. N. Melnikov, L. N. Olshanskaya, M. Yu. Zakharchenko, I. G. Ostroumov, V. Kairgaliev, S. Ya. Pichkhidze, and F. Gagarina, "Powdered magnetic sorbent for oil gathering," Russian Patent RU 2710334 C2, Apr. 2, 2018.
- [18] "An oil-biosorbent for cleaning and restoring oil-contaminated lands," Russian Patent RU 2816706 C1, Apr. 3, 2024.
- [19] J. Ge, H.-Y. Zhao, H.-W. Zhu, J. Huang, L.-A. Shi, and S.-H. Yu, "Advanced sorbents for oil-spill cleanup: Recent advances and future perspectives," *Advanced Materials*, vol. 28, no. 47, pp. 10459–10490, Dec. 2016.
- [20] Y. Zhou, F. Wang, X. Zhao, and Y. Wang, "Recent advances of textile sorbents for oil spills cleanup: A review," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 52, no. 4, pp. 1–25, Aug. 2023.

МЕТАЛЛУРГИЯ, ТЕХНОЛОГИИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кабылканов С.К.

Cr–Mn ЖҮЙЕСІНДЕГІ КӨПКOMPONENTTІ OKCИДТІ БАЛҚЫМАЛАРДЫҢ ТЕРМИЯЛЫҚ МІНЕЗ-ҚҰЛҚЫ, ФАЗАЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРІ ЖӘНЕ ТҮТҚЫРЛЫҒЫ: ЭКСПЕРИМЕНТТІК-ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ТӘСІЛ.....	5
--	---

Жақан А.М.

КОМІРТЕКТІ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ МЕНШІКТІ ЭЛЕКТРЛІК КЕДЕРГІСІН ЗЕРТТЕУ	18
--	----

Sadyk Zh.

INVESTIGATION OF THE THERMAL TRANSFORMATIONS OF RICE HUSK BY DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS FOR THE PRODUCTION OF SILICON CARBIDE.....	25
---	----

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТ,
СТРОИТЕЛЬСТВО**

Ахажанов С.Б., Касенова А.Н., Калданова Б.О.

АРҚАЛЫҚТАРДЫҢ ИЛУ ТЕОРИЯЛАРЫН НАҚТЫЛАУ: КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЕСЕПТЕУДІҢ ЖЕҢІЛДЕТІЛГЕН ӘДІСІ	30
--	----

Мулдағалиев З.А., Бестембек Е.С., Абуов Е.З.

ЦИФРЛАНДЫРУ ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТІНІ ДАМУ ТУРАСЫНДА ИНЖЕНЕРЛІК КАДРЛАРДЫ ОЗЫҚ ДАМУ СТРТЕГИЯСЫ.....	43
--	----

Кунаев В.А., Fathi M.S. Оспанова А.З.

ДОМЕННЫЙ ШЛАК В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ОТ ЗАМЕНЫ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ К ИНЖЕНЕРИНГУ СВОЙСТВ	55
---	----

**ИТ-ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

Derenok A.N.

IMPROVING THE ACCURACY OF THERMAL CABLE MEASUREMENTS BASED ON MULTI-POINT AVERAGING OF DS18B20 SENSORS	62
---	----

Судаков В.В., Гревцов Д.В., Султанов Н.М.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ТРАВМ НА ОСНОВЕ НОСИМОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ.....	68
---	----

Молдазым Н.М., Вдовин О.В., Гревцов Д.В.

ЕДИНАЯ AI-ПЛАТФОРМА СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МЧС РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН: АРХИТЕКТУРА И СЛИЯНИЕ РАЗНОРОДНЫХ ДАННЫХ.....	74
---	----

**ЭКОНОМИКА. ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ, СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ И
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

<i>Povalyashko G.</i> THE DISCOURSE OF OPEN PLATFORMS AND THE TECHNO-HUMANITARIAN BALANCE IN MODERN CREATIVE EDUCATION.....	85
<i>Yolchi J.</i> INVESTMENT AND FINANCIAL MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF ASAFETIDA PRODUCTION AND EXPORT IN AFGHANISTAN: RISKS, CASH FLOWS AND SCALE-UP STRATEGY	92
<i>Дружинина Н.В., Ахметгалина Н.С., Жунусова А.К., Хамитова Ш.А., Мырзаханова А.Т.</i> ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТКЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ЦИФРЛЫҚ БІЛІМ БЕРУ ПЛАТФОРМАЛАРЫ ТІЛДІК ОҚЫТУДЫҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ	99
<i>Mohamad Syazli F.</i> VISUALIZATION OF DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED ASAFOETIDA (HING) VALUE CHAIN IN AFGHANISTAN FROM CULTIVATION TO EXPORT	106
ХИМИЧЕСКИЕ И ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.	
<i>Primandari S.R.P., Kusnanda, A.J., Elshaarani, T.</i>	
PHYTOCHEMICAL SCREENING AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF ETHANOL EXTRACT OF SUNGKAI LEAVES (PERONEMA CANESCENS JACK)	115
<i>Bakibayev A.A., Lyapunova M.V., Razgulyaeva Yu.D., Salina M.V., Zaitsev A.V.</i> METHODS FOR BETULIN PURIFICATION: A REVIEW	123
<i>Ibray D., Iskalieva A., Utesheva Z, Bexultanov R., Iskaliev A.</i> A METHOD FOR COLLECTING AND DISPOSING OF PETROLEUM PRODUCTS USING POLYURETHANE SORBENTS.....	130

Ответственный секретарь: Солтан А.

Технический редактор: Луценко В.С.

Компьютерная верстка: Солтан А.

30.09.2026 ж. бастап басылып шығарылады. Пішімі 60x84 1/16. Кітап-журнал қағазы.
Көлемі 13 шартты б.т. Таралымы 500 дана. Бағасы келісім бойынша. ҚарИУ Маркетинг, медиа
және креативті технологиялар департаменті.
Индекс 74946.

Дата выхода 30.09.2025 г. Формат 60x84 1/16. Бумага книжно-журнальная.
Объем 13 уч.-изд.л. Тираж 500 экз. Цена договор. Департамент маркетинга, медиа и креативных
технологий КарИУ.
Индекс 74946.
