

Қарағанды мемлекеттік
индустриялық университетінің
ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК
Карагандинского государственного
индустриального университета

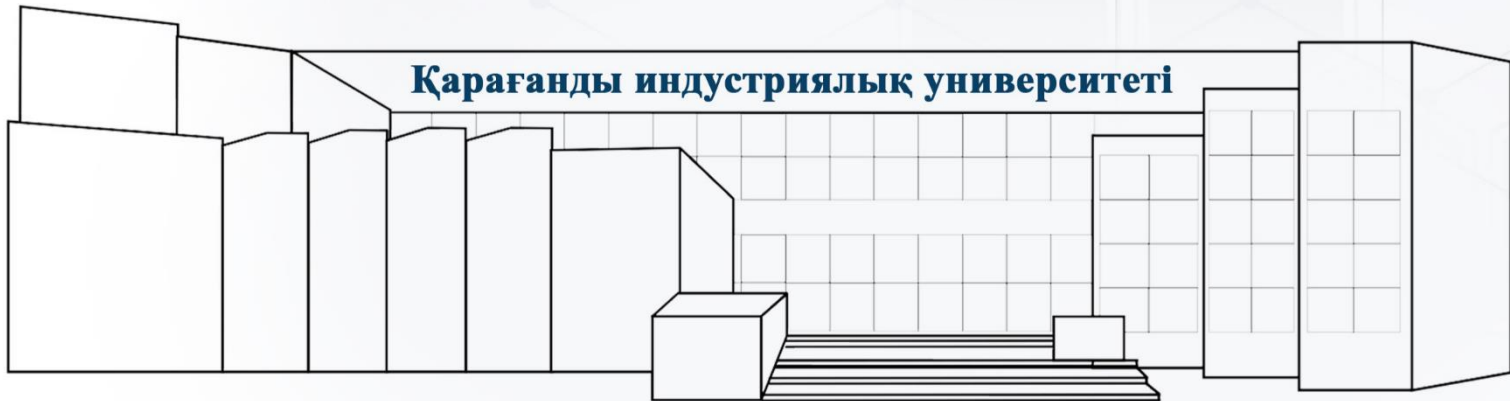
BULLETIN
of the Karaganda state
industrial university

<https://ttu.edu.kz/ru/vestnik-kariu/>

3

(50) 2025

Қарағанды индустриялық университеті



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
ҚАРАҒАНДЫ МЕМЛЕКЕТТІК ИНДУСТРИЯЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

№ 3 (50) 2025 г.

e-ISSN: 3134-8467

p-ISSN: 2309-1177

**ҚАРАҒАНДЫ МЕМЛЕКЕТТІК ИНДУСТРИЯЛЫҚ
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ**

**BULLETIN OF THE
KARAGANDA STATE INDUSTRIAL UNIVERSITY**

**ВЕСТНИК КАРАГАНДИНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**ШІЛДЕ-ҚЫРКҮЙЕК 2025
JULY–SEPTEMBER 2025
ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ 2025**

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

Теміртау - 2025

БАС РЕДАКТОР

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

РЕДАКЦИЯЛЫҚ КОЛЛЕГИЯ

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

Жауапты хатшы

Зобнин Николай Николаевич – Ғылым және инновация департаментінің жетекші маманы, «Қарағанды индустриялық университеті» КЕАҚ, Қазақстан.

Носов Вячеслав Григорьевич – 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

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

Nosov Vyacheslav Grigorievich – 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

Зобнин Николай Николаевич – ведущий специалист Департамента науки и инноваций, НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан.

Носов Вячеслав Григорьевич – 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.

METALLURGY, TECHNOLOGIES OF NEW MATERIALS

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/063>

METAL POWDER PRODUCTION TECHNOLOGIES FOR ADDITIVE MANUFACTURING

**¹Abdirashit A.M., ²Onuralp Yu.*

¹K.Zhubanov Aktobe regional university, Aktobe, Republic Kazakhstan,

²Istanbul technical university, Istanbul, Turkey

Corresponding author e-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com

Author information:

Onuralp Yücel- Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Chemical and Metallurgical Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye. E-mail: yucel@itu.edu.tr

Abdirashit A.M. - K.Zhubanov Aktobe regional university, Aktobe, Republic Kazakhstan. E-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com

Abstract — Additive manufacturing, or 3D printing, has attracted significant attention and raised expectations regarding the future production and repair of components, particularly in the aerospace industry. Various techniques have been employed for the deposition of metal alloys used in the manufacture of components. These technologies offer considerable sustainability benefits, particularly by enabling new opportunities for lightweight design. However, important questions remain regarding the sustainability advantages beyond the use phase of the product. This paper investigates the material and manufacturing life-cycle stages of components produced from INCONEL 718. Energy consumption measurements obtained from the ARCAM A2X Electron Beam Melting (EBM) system are presented and compared with the embodied energy and indirect CO₂ emissions associated with raw material production, as well as with those of conventional subtractive manufacturing processes. The results indicate that both metal powder production and the additive manufacturing process itself contribute significantly to the overall energy consumption and greenhouse gas emissions. Ashby's five-step sustainability assessment methodology is also applied to provide a brief discussion of the economic and social implications of additive manufacturing.

Keywords: Additive, manufacturing, EBM

АДДИТИВТІ ӨНДІРІС ҮШІН МЕТАЛЛ ҰНТАҚТАРЫН ЖАСАУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ

¹Әбдірашит А.М., ²Онуралп Ю.

¹Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

²Ыстамбұл техникалық университеті, Ыстамбұл қ., Түркия

Корреспондент автор e-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com

Авторы туралы ақпарат:

Онуралп Юджел, Металлургия және материалтану кафедрасы, Химия және металлургия инженериясы факультеті, Ыстамбұл техникалық университеті, Ыстамбұл, Түркия. E-mail: yucel@itu.edu.tr

Әбдірашит Асылбек Мирамханұлы - Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан. E-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com

Аңдатпа. Аддитивті өндіріс немесе 3D басып шығару, мысалы, аэроғарыш өнеркәсібінде бөлшектерді болашақта өндіру мен жөндеуге қатысты назар аударды және күтуді арттырды. Компоненттерге арналған металл қорытпаларын түндыру үшін әртүрлі әдістер қолданылған. Бұл тұрақтылық тұрғысынан үлкен артықшылықтар бере алады, атап айтқанда, жеңіл салмақ түсірудің жаңа мүмкіндіктері. Дегенмен, пайдалану кезеңінен тыс тұрақтылық артықшылықтары туралы шешілмейтін сұрақтар бар. Бұл мақалада INCONEL 718 көмегімен өндірілген мәліметтер үшін материал мен өндірістің өмірлік циклінің кезеңдері зерттелді. ARCAM A2X электронды сәулені балқыту жүйесінен алынған энергия өлшемдері ұсынылған және шикізаттың нақтыланған энергиясы мен жанама СО₂-шығарындыларымен, сондай-ақ дәстүрлі шегеруші өндіріспен салыстырылған. Металл ұнтағы өндірісі де, қоспаларды өндіру процесінің өзі де жалпы энергияны пайдалану мен шығарындыларға айтарлықтай үлес қосатыны анықталды. Эшбидің тұрақты дамуды бағалаудың 5 қадамдық әдісі қосымша өндірістің экономикалық және әлеуметтік салдарын қысқаша талқылау үшін қолданылады.

Түйінді сөздер: Аддитив, өндіріс, ЕВМ.

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

¹Әбдірашит А.М., ²Onuralp Yu.

*Ақтөбінский региональный университет имени К.Жубанова, Ақтөбе, Қазақстан
Стамбульский технический университет, г. Стамбул, Турция
Автор-корреспондент e-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com*

Информация об авторах:

Онуралп Юджел - кафедра металлургии и материаловедения, факультет химической и металлургической инженерии, Стамбульский технический университет, Стамбул, Турция. E-mail: yucel@itu.edu.tr

Әбдірашит А.М. - Ақтөбінский региональный университет имени К.Жубанова, Ақтөбе, Қазақстан. E-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com

Аннотация. Аддитивное производство или 3D-печать привлекли внимание и повысили ожидания в отношении будущего производства и ремонта деталей, например, в аэрокосмической промышленности. Для осаждения металлических сплавов для компонентов использовались различные методы. Это может дать большие преимущества с точки зрения устойчивости, в частности, новые возможности для легкого веса. Однако есть нерешенные вопросы о преимуществах стабильности вне периода использования. В этой статье были изучены материалы и этапы жизненного цикла производства для данных, полученных с помощью INCONEL 718. Представлены измерения энергии, полученные от системы электронного луча плавления ARCAM A2X, и сравниваются с уточненной энергией сырья и косвенными выбросами CO₂, а также с традиционным производством дедушки. Было обнаружено, что как производство металлического порошка, так и сам процесс производства добавок вносят значительный вклад в общее потребление энергии и выбросы. 5-ступенчатый метод оценки устойчивого развития Эшби используется для краткого обсуждения экономических и социальных последствий дополнительного производства.

Ключевые слова: аддитивный, производственный, ЕВМ

MAIN PROVISION

This study presents a comprehensive review of metal powder production technologies for additive manufacturing, with particular emphasis on Electron Beam Melting (EBM) and the sustainability of powder-based manufacturing processes. The analysis demonstrates that metal powder production and additive manufacturing significantly influence the overall energy consumption and environmental impact of component fabrication. The study also evaluates the life-cycle implications of manufacturing INCONEL 718 components and discusses strategies for improving resource efficiency through powder recycling and lightweight design.

INTRODUCTION

The implementation of additive manufacturing (AM) is expected to drive disruptive changes across many sectors of industrial production, affecting all three dimensions of sustainable development: economic, social, and environmental. AM is already being used to reduce maintenance costs and decrease the number of components in certain products [1]. Novel geometries and lightweight components are projected to reduce manufacturing costs by hundreds of billions of U.S. dollars by 2025 [2]. Furthermore,

AM enables digitalized, flexible, and localized production of parts, thereby transforming supply chains for numerous products.

Although lightweight components in the transportation and aerospace sectors contribute to lower fuel consumption and, consequently, reduced CO₂ emissions, this alone will not be sufficient to achieve international greenhouse gas reduction targets, such as those established under the Paris Agreement. In fact, these emission reduction targets may still not be met [3]. Therefore, substantial reductions in greenhouse gas emissions will require a transition from fossil fuels to renewable energy sources. Under such circumstances, the significance of energy consumption and emissions associated with the material and manufacturing phases of a product's life cycle will increase. It is also conceivable that manufacturers will use environmental sustainability credentials as a competitive advantage. Consequently, it is essential to investigate the impact of additive manufacturing on sustainability.

According to the Brundtland Report, sustainable development is based on three fundamental dimensions: economic, social, and environmental. This concept inspired the three Ps of sustainability: People, Planet, and Profit (or Prosperity), commonly

referred to as the Triple Bottom Line (TBL) approach [4]. A pragmatic methodology for assessing the sustainability of technologies and processes, primarily intended for educational purposes, was proposed by Ashby and colleagues [5]. In this methodology, the three dimensions of sustainability are considered separately and are represented as different forms of capital: financial capital, corresponding to Profit; natural capital, representing the Planet; and human capital, representing People. This framework provides an appropriate basis for evaluating the impact of additive manufacturing on these three forms of capital.

This paper presents a brief comparative review of additive manufacturing processes relevant to aerospace and transportation applications. The discussion is limited to manufacturing processes based on metal powders. As a case study, energy consumption measurements obtained from an Electron Beam Melting (EBM) system are presented, and their implications for sustainability are discussed.

Research gap. Although additive manufacturing has been widely recognized as a promising

technology for producing complex metal components with reduced material waste, limited attention has been devoted to the contribution of metal powder production to the overall environmental and energy performance of additive manufacturing systems. In particular, comprehensive assessments integrating powder production, manufacturing energy consumption, and sustainability considerations for nickel-based superalloys such as INCONEL 718 remain scarce. Therefore, there is a need for an integrated evaluation of metal powder production technologies and their influence on the sustainability of additive manufacturing processes.

Novelty statement. The novelty of this study lies in the integrated assessment of metal powder production technologies together with the energy consumption of Electron Beam Melting (EBM)-based additive manufacturing. Unlike previous studies focusing primarily on manufacturing performance, this work evaluates the contribution of raw material production, powder atomization, and additive manufacturing to the overall environmental impact and sustainability of the production process.

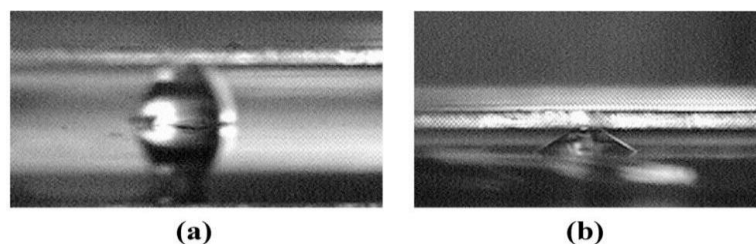


Figure 1 - Comparison of the breaking distances of liquid bridges defined by (a) microchannels and (b) discrete hydrophilic samples

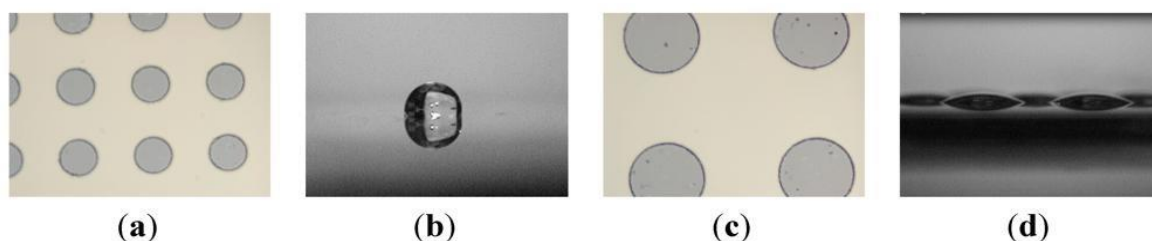


Figure 2 - Comparison of large and small patterns. The liquid on the substrate with smaller hydrophilic patterns (a) forms a single drop after breaking, but on the substrate with larger hydrophilic patterns (c) it forms discrete droplets (d)

METODOLOGY

ASTM has identified seven categories of additive manufacturing (AM) processes: Powder Bed Fusion (PBF), Directed Energy Deposition (DED), Material Extrusion, Vat Photopolymerization, Binder Jetting, Material Jetting, and Sheet Lamination [6]. Among these, Material Extrusion, Vat Photopolymerization, and Material Jetting are generally not applicable to the production of metal components. The three most widely used

technologies for manufacturing metal parts are Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM), and Directed Energy Deposition (DED). These three processes, together with Binder Jetting, can all utilize metal powders as the feedstock material. The classification of powder bed technologies and deposition technologies is illustrated in Figure 1 below.

Figure 1. Schematic overview of the main additive manufacturing technologies.

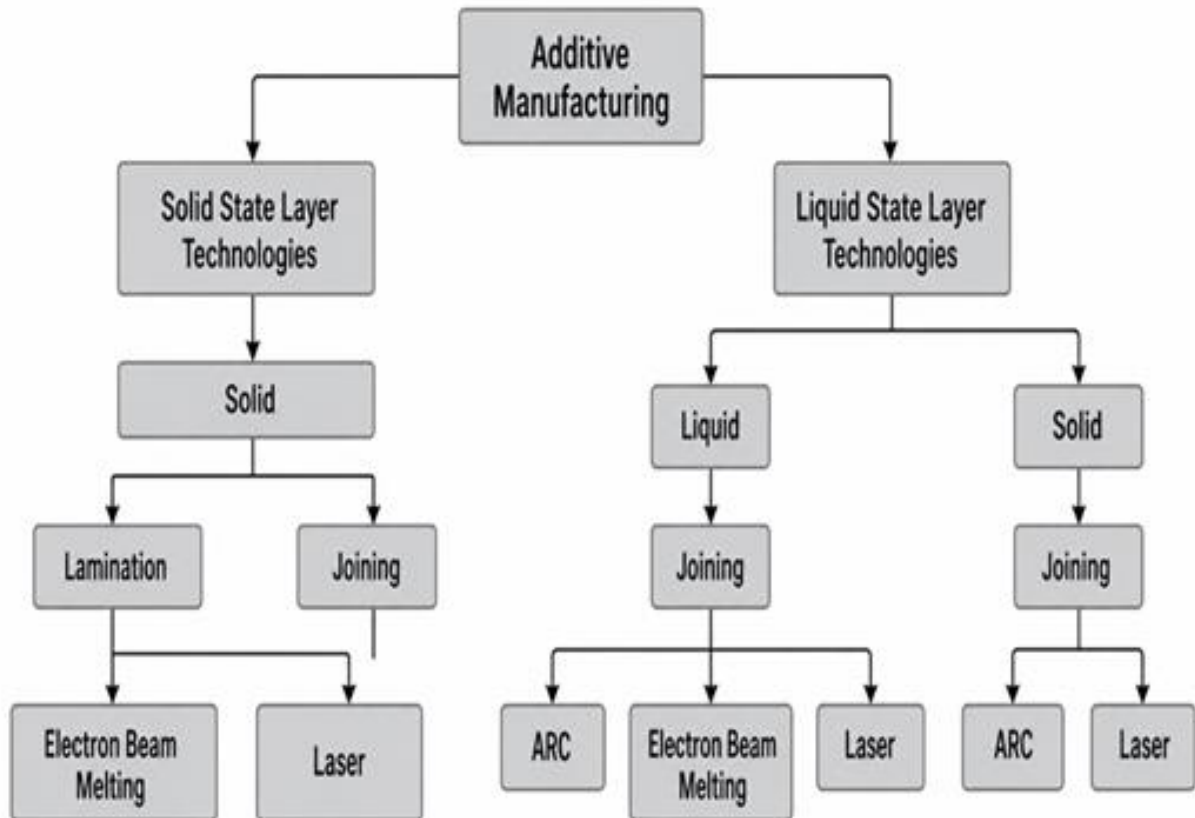


Figure 1 Schematic overview of the main additive manufacturing technologies.

RESEARCH RESULTS

The significance of recycled feedstock and powder reuse is briefly discussed in the following section. The energy consumption associated with producing a component from virgin raw materials through the additive manufacturing (AM) process includes the following stages:

1. Material production, from mining and extraction of raw materials to feedstock preparation, including transportation and related processes.
2. Powder production, for example, through atomization of the raw material, including the melting process.
3. Energy supplied for melting or fusing the metal powder within the additive manufacturing (AM) system.

The first stage represents the energy required to produce billets or ingots from ores or other raw materials. This was evaluated using data from the CES Selector database [7], which provides estimates of the embodied energy and carbon footprint (CO₂ emissions) of bulk INCONEL 718 superalloy. The

database contains well-established data that are widely used in the aerospace industry [8]. It was developed based on up-to-date and reliable sources, including Life Cycle Assessment (LCA) databases (e.g., ILCD and Ecoinvent), publicly available environmental reports from industrial associations (such as the World Steel Association and the European Aluminium Association), as well as peer-reviewed scientific publications.

For the second stage, quantitative data for INCONEL 718 were not available in the literature. Therefore, published values for a similar superalloy (NISTELLE 625) were used as a substitute [9].

Finally, the third stage was evaluated through an experimental measurement performed during the fabrication of the test structure described in the following section.

The experimental data were collected during a five-day continuous build using an ARCAM A2X Electron Beam Melting (EBM) system, as shown in Figure 2(a). The connection of the energy measurement probes is illustrated in Figure 2(b).

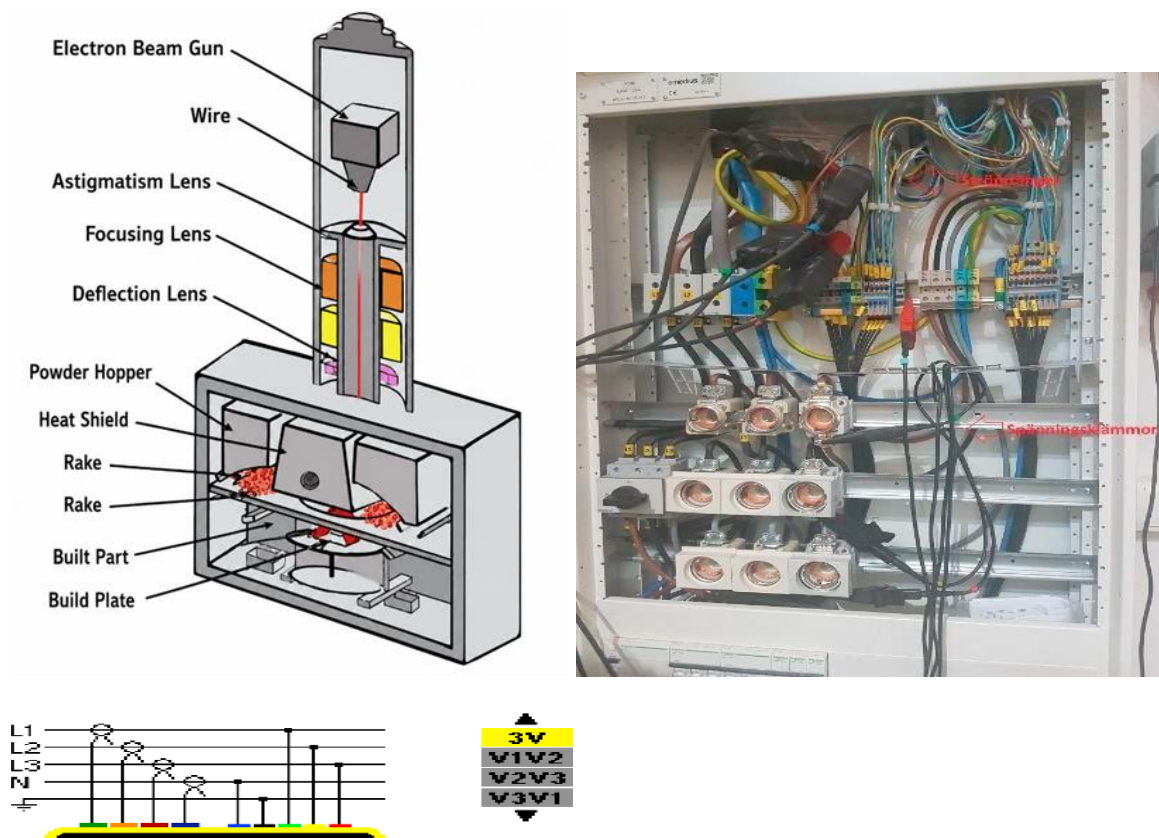


Figure 2 - (a) Schematic illustration of the EBM-based additive manufacturing technology; (b) Energy measurement probes for monitoring input power consumption.

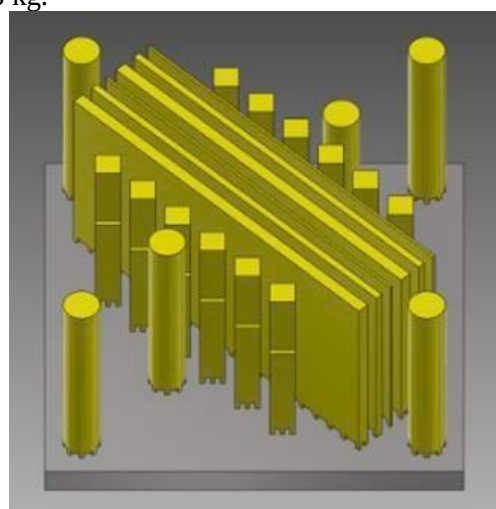
The energy consumption during the additive manufacturing (AM) process was measured using a CA 8335 Power and Energy Analyzer. This instrument monitors the voltage and current of the three-phase power supply, as well as active and reactive power. The recorded data are stored on a computer and analyzed using Power Analyzer Transfer 1 and 2 (PAT1 and PAT2) software. The measurement uncertainty is within 1%. However, the non-contact current probes (MN88) are specified to have a maximum uncertainty of 5%.

The main energy-consuming components of the system include the high-voltage power supply, vacuum pumps, heat exchanger and cooling equipment, motors for the rake and build platform, the programmable logic controller (PLC), the display unit, and the electron beam (EB) gun. Only the total energy consumption of the system, dominated by the electron beam gun/high-voltage unit, was measured.

According to the CES Selector database, the embodied energy of bulk INCONEL 718 ranges from 291 to 321 MJ/kg [7]. As mentioned previously, no published data were found regarding the energy required for atomizing INCONEL 718 powder for additive manufacturing. Therefore, the value reported for NISTELLE 625, a nickel-based superalloy containing less iron but a similar chromium content, was used as an approximation. The reported energy

consumption for the atomization stage is 55.6 MJ/kg [9].

The geometry of the manufactured components and the results of the energy measurements obtained during the entire five-day build process are presented in Figures 3 and 4, respectively. The manufactured component has a volume of 392.5 cm³ and a mass of 3.23 kg.



a)

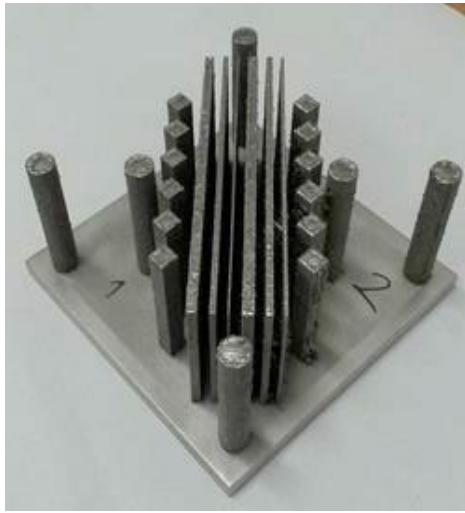


Figure 3. (a) CAD model of the component; (b) Final INCONEL 718 component manufactured using Electron Beam Melting (EBM).

The results indicate that a total of 378 MJ of energy was consumed during the build process, corresponding to a specific energy consumption of 117 MJ/kg for the manufactured component.

The initial stage, which lasted approximately 5 hours, exhibited an average power consumption of about 4 kW. This was followed by a 112-hour melting stage, during which the electron beam required significantly less power. Based on the recorded measurements, the average power consumption during this stage was estimated to be 0.71 kW, as illustrated in the graph.

b)

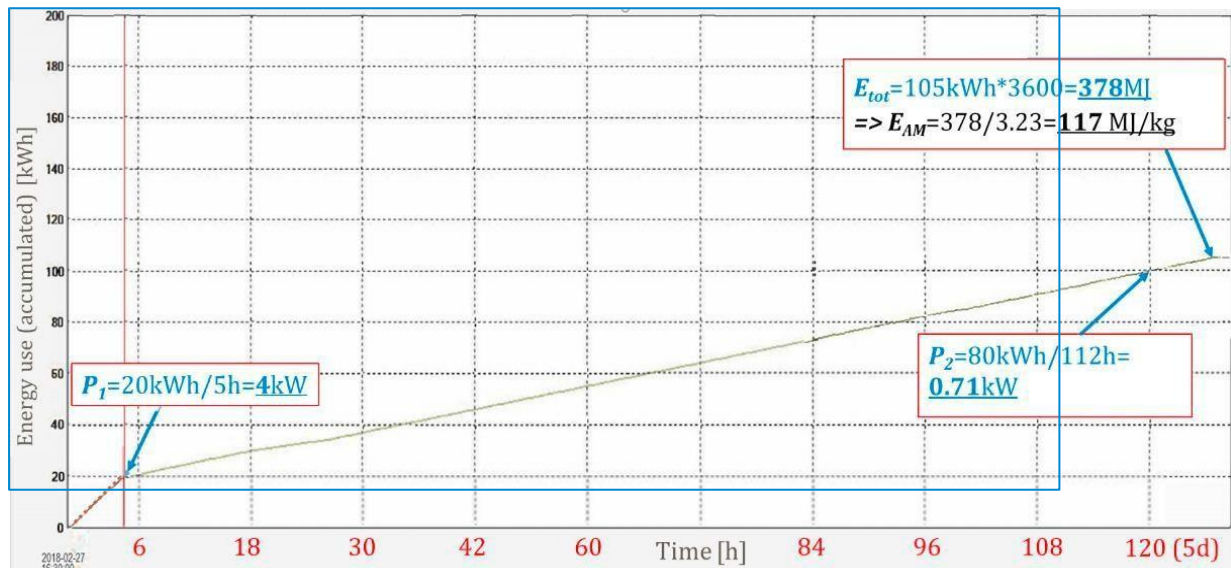


Figure 4. Cumulative energy consumption of the Electron Beam Melting (EBM)-based additive manufacturing system derived from active power measurements.

The present study demonstrates that the reversibility of the proposed variable thermal interface is primarily governed by the geometric characteristics of the hydrophilic islands and the liquid volume. The theoretical energy analysis and experimental observations consistently indicate that an appropriate combination of these parameters enables a stable reversible transition between discrete droplets and a continuous liquid film.

DISCUSSION

This case study has illustrated several important characteristics of metal powder-based additive manufacturing and assessed its sustainability. Although additive manufacturing of superalloys is associated with high overall energy consumption, the

results indicate that several strategies can improve its environmental and economic performance.

Weight reduction offers significant opportunities to lower both production costs and greenhouse gas emissions. A study by Huang et al. [6] on lightweight aircraft components demonstrated that the weight-saving benefits of additive manufacturing, compared with conventional manufacturing, vary considerably depending on the geometry of the component.

Powder production requires a substantial amount of energy; therefore, powder recovery and recycling are of critical importance. Compared with subtractive manufacturing, material waste can be significantly reduced, although the extent of this reduction depends on the specific application. In addition, additive manufacturing can contribute to more efficient

resource utilization by enabling remanufacturing and providing new opportunities for maintenance and repair.

The findings also suggest that the economic and environmental advantages of additive manufacturing are highly application-dependent. While the technology provides clear benefits for material efficiency and component optimization, its high energy demand remains a significant limitation, particularly for large-scale industrial implementation.

CONCLUSION

The present study demonstrates that, despite its relatively high energy consumption, metal powder-based additive manufacturing offers considerable sustainability benefits through weight reduction, lower material waste, powder recycling, and extended component life via repair and remanufacturing. However, due to the substantial time and energy requirements of the manufacturing process, large-scale mass production is not yet economically viable. Therefore, in the near future, additive manufacturing is expected to be most effective for producing high-value, low-volume components with complex geometries, where its technical and environmental advantages can outweigh its higher energy costs.

Author Contribution Statement (CRediT Taxonomy): A.M. Abdirashit:

Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal Analysis, Data Curation, Validation, Visualization, Writing – Original Draft. **Yu. Onuralp:** Conceptualization (lead), Methodology, Validation, Writing – Review & Editing, Supervision.

All authors have read and approved the final version of the manuscript and agree to be accountable for all aspects of the work.

Funding. This research received no external funding.

Acknowledgment. The authors would like to thank K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan, and Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye, for providing academic support and a research environment that contributed to the successful completion of 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] S. Ford, M., Despeisse, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *Journal of Cleaner Production*, 137 (2016) 1573-1587.
- [2] M. Gebler, A. J. M. Schoot Uiterkamp, C. Visser, A global sustainability perspective on 3D printing technologies, *Energy Policy*, 74 (C) (2014) 158-167.
- [3] A. E. Raftery, A. Zimmer, D. M. W. Frierson, R. Startz, P. Liu, Less than 2° warming by 2100 unlikely, *Nature Climate Change* 7 (2017) 637.
- [4] J. Elkington, "Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development," *California management review*, vol. 36, pp. 90-100, 1994.
- [5] M. F. Ashby, *Materials and Sustainable Development*, Butterworth-Heinemann, (Oxford, 2015).
- [6] K. Kellens, M. Baumanns, T. G. Gutowski, W. Flanagan, R. Lifset, J. R. Dufloy, *Environmental Dimensions of Additive Manufacturing*, *International Journal of Industrial Ecology*, 21 (2017) S49-S68.
- [7] CES Selector 2018 software including the MaterialUniverse database by Granta Design Ltd., Cambridge (UK)
- [8] S. M. Arnold, D. Cebon, and M. Ashby, "Materials Selection for Aerospace Systems," (2012) NASA/TM—2012-217411, Интернет репр: https://permanent.access.gpo.gov/gpo25016/20120001798_2012001776.pdf
- [10] J. L. Wilson, C. Piya, Y. C. Shin, F. Zhao, K. Ramani, Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis, *Journal of Cleaner Production*, 80 (2014) 170-178.
- [11] Bonilla Hernández A. E., Beno T., Fredriksson C. Energy and Cost Estimation of a Feature-based Machining Operation on HRSA // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 61. – P. 511–516. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.141. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.141>

METALLURGY, TECHNOLOGIES OF NEW MATERIALS

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/064>

EXPERIMENTAL STUDY ON THE REMOVAL OF BISMUTH FROM LEAD WITH CALCIUM MAGNESIUM

Nemchinova N.V.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

*Corresponding author e-mail: n.zobnin@tntu.edu.kz

Author information:

Nemchinova N.V. - Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia E-mail: ninavn@istu.edu

Abstract. The separation of lead from the bismuth mixture remains a serious problem, and achieving effective separation is an important obstacle to the production of high-purity lead using the vacuum gasification method. This research focuses on lead as a core research discipline, conducting theoretical and experimental studies on the secondary conversion of lead through vacuum gasification. Gibbs free energy calculations show that in the temperature range from 600 to 610 K, the bismuth compound completely reacts with calcium and magnesium, resulting in the formation of the CaMg_2Bi_2 compound. Under optimal experimental conditions, the bismuth compound is converted to CaMg_2Bi_2 BiCa_2 . It should be noted that BiCa_2 does not fly and remains in the crucible as a residue. Auxiliary calcium is completely converted into CaSe and CaTe , which leads to a decrease in the calcium content in volatile substances from 0.5% to 16 ppm. Similarly, the magnesium content in volatile substances is reduced from 0.66% to 187 ppm. Eventually, the bismuth content in the final product decreases from 6 ppm to 1.4 ppm, reaching a removal rate of 76.6%, and the direct yield of metallic lead reaches 71%. This process effectively facilitates the separation of metallic lead from bismuth impurities.

Keywords: vacuum separation of bismuth from lead, adjuvant transformation, vacuum gasification, high-temperature dissociation, separation and purification.

КАЛЬЦИЙ МАГНИЙМЕН ҚОРҒАСЫННАН ВИСМУТТЫ ЖОЮ БОЙЫНША
ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Немчинова Н.В.

Иркутск ұлттық зерттеу техникалық университеті, Иркутск, Ресей

Авторлар туралы ақпарат:

Зобнин Н.Н. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: n.zobnin@tntu.edu.kz

Немчинова Н.В. - Иркутск ұлттық зерттеу техникалық университеті, Иркутск, Ресей. E-mail: ninavn@istu.edu

Аңдатпа. Қорғасынды висмут қоспасынан бөлу маңызды мәселе болып қала береді, тиімді бөлуге қол жеткізу вакуумды газдандыру әдісі арқылы жоғары таза қорғасынды өндіруде маңызды кедергі болып табылады. Бұл зерттеу зерттеудің негізгі пәні ретінде қорғасынға назар аударады, қорғасынды вакуумды газдандыру арқылы қосалқы түрлендіру бойынша теориялық және эксперименттік зерттеулер жүргізеді. Гиббс бос энергиясының есептеулері көрсеткендей, 600-ден 610 К дейінгі температура диапазонында қоспа висмут кальций және магниймен толық әрекеттеседі, нәтижесінде CaMg_2Bi_2 қосылысы түзіледі. Оңтайлы тәжірибелік жағдайларда висмут қосылысы CaMg_2Bi_2 BiCa_2 -ге айналады. Айта кету керек, BiCa_2 ұшпайтын және қалдық ретінде тигельде қалады. Көмекші кальций толығымен CaSe және CaTe -ге айналады, бұл ұшқыш заттардың құрамындағы кальций мөлшерінің 0,5%-дан 16 ppm-ге дейін төмендеуіне әкеледі. Сол сияқты ұшпа заттардағы магний мөлшері 0,66%-дан 187 промиллеге дейін төмендейді. Сайып келгенде, соңғы өнімдегі висмут мөлшері 6 ppm-ден 1,4 ppm-ге дейін төмендейді, 76,6% жою жылдамдығына жетеді, ал металл қорғасынының тікелей шығуы 71% жетеді. Бұл процесс металл қорғасынды висмут қоспаларынан бөлуді тиімді түрде жеңілдетеді.

Түйінді сөздер: висмутты қорғасыннан вакуумда бөлу, адьювантты түрлендіру, вакуумды газдандыру, жоғары температурада диссоциациялау, бөлу және тазарту.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО УДАЛЕНИЮ ВИСМУТА ИЗ СВИНЦА С КАЛЬЦИЕМ МАГНИЕМ

^{1*}Зобнин Н.Н., ²Немчинова Н.В.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Ресей

Информация об авторах:

Немчинова Н.В. – Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Ресей. E-mail: ninavn@istu.edu

Аннотация. Отделение свинца от смеси висмута остается серьезной проблемой, достижение эффективного разделения является важным препятствием для производства свинца высокой чистоты с помощью метода вакуумной газификации. Это исследование фокусируется на свинце как на основной дисциплине исследования, проводя теоретические и экспериментальные исследования вторичного преобразования свинца с помощью вакуумной газификации. Расчеты свободной энергии Гиббса показывают, что в диапазоне температур от 600 до 610 К соединение висмут полностью реагирует с кальцием и магнием, в результате чего образуется соединение CaMg_2Bi_2 . В оптимальных экспериментальных условиях соединение висмута превращается в CaMg_2Bi_2 BiCa_2 . Следует отметить, что BiCa_2 нелетает и остается в тигле в качестве остатка. Вспомогательный кальций полностью превращается в CaSe и CaTe , что приводит к снижению содержания кальция в летучих веществах с 0,5% до 16 ppm. Точно так же содержание магния в летучих веществах снижается с 0,66% до 187 частей на миллион. В конечном итоге содержание висмута в конечном продукте снижается с 6 ppm до 1,4 ppm, достигая скорости удаления 76,6%, а прямой выход металлического свинца достигает 71%. Этот процесс эффективно облегчает отделение металлического свинца от примесей висмута.

Ключевые слова: вакуумное отделение висмута от свинца, адьювантное преобразование, вакуумная газификация, высокотемпературная диссоциация, разделение и очистка.

MAIN PROVISION

A calcium–magnesium-assisted refining process for the removal of bismuth from molten lead is proposed and experimentally validated. The study identifies the optimum concentrations of calcium (0.10–0.13 wt.%) and magnesium (0.35–0.45 wt.%) required for efficient debismuthization and demonstrates that the formation of the thermodynamically stable intermetallic compound CaMg_2Bi_2 is the dominant reaction mechanism. Thermodynamic analysis based on Gibbs free energy calculations is combined with experimental verification to clarify the influence of reagent concentration and temperature on the refining process. The proposed method significantly reduces the bismuth content while maintaining satisfactory lead recovery, demonstrating its potential as an efficient and environmentally friendly technology for the production of high-purity lead

INTRODUCTION

Lead is a dense and malleable metal with the chemical symbol Pb. It possesses notable properties such as excellent ductility, corrosion resistance, and effective shielding against X-ray radiation, which contribute to its widespread application in various industries, including battery manufacturing, cable sheathing, the automotive industry, and the military sector [1-5]. High-purity lead serves as a key raw material for advanced high-performance pure lead batteries and valve-regulated lead-acid batteries. Its

importance is increasingly recognized in strategic fields such as fast nuclear reactors and aerospace engineering, making it a significant area of development in China.

Vacuum volatilization refining technology refers to a metallurgical process for the purification, refining, and treatment of metals in a vacuum-sealed system operating at pressures below 0.1 MPa. This technology has been widely applied in alloy separation, deep metal purification, and the sustainable recovery of secondary resources [6-10]. Since the beginning of the 21st century, the concept of green development has received increasing attention, posing new challenges to conventional lead refining processes. The main disadvantages of traditional fire refining include outdated technologies, high energy consumption, and significant environmental pollution, resulting in substantial annual costs associated with waste treatment. With the growing demand for high-quality materials, vacuum volatilization technology offers considerable advantages in producing high-purity lead by effectively minimizing material oxidation, thereby outperforming conventional fire refining and hydrometallurgical electrolytic purification methods.

Research on the removal of bismuth impurities from lead using calcium and magnesium has a long and significant history. This technology emerged in the early twentieth century in the field of metal refining, with the primary objective of efficiently removing bismuth impurities from lead through the

addition of calcium and magnesium. The process aims to improve both the purity and overall quality of lead. Lead is a widely used industrial metal employed in battery production, paint manufacturing, radiation shielding, and many other applications. However, during sulfide ore smelting and lead refining processes, lead is often contaminated with impurities such as bismuth. The presence of bismuth adversely affects the physical and chemical properties of lead, including its density, hardness, and electrical conductivity. Furthermore, it negatively influences the subsequent processing and application of lead by reducing battery performance and deteriorating the gloss and adhesion of coatings [11-15]. Therefore, the effective removal of bismuth impurities remains an important research topic in the field of lead refining.

The removal of bismuth using calcium and magnesium has been extensively investigated as an effective lead refining technology since the early twentieth century. This method is based on the ability of calcium and magnesium to react with bismuth dissolved in molten lead, forming refractory compounds that are insoluble in liquid lead and can therefore be removed as dross. The development and implementation of this principle have significantly advanced lead refining technology. Nevertheless, despite the considerable progress achieved, fundamental research on the calcium-magnesium debismuthization process remains insufficient. In particular, further studies are required to clarify the effects of calcium and magnesium concentrations, temperature, and other key process parameters on the efficiency of bismuth removal, as well as to better understand the underlying mechanisms governing the process [16-19].

Experimental investigations of bismuth removal using calcium and magnesium not only provide valuable insights into the microscopic mechanisms of the process but also offer theoretical foundations and practical guidance for optimizing technological parameters to enhance bismuth removal efficiency. In addition, the influence of temperature on bismuth removal has been investigated. The results indicate that within the temperature range of 1123-1223 K, at a system pressure of 2-5 Pa and a holding time of 3 hours, the removal rate of bismuth impurities from lead increases with increasing temperature. In particular, when the temperature rises from 1223 K to 1323 K, a significant increase in the bismuth removal rate is observed, accompanied by a considerable reduction in its concentration in the condensed products. These findings are of great importance for optimizing process parameters and improving the efficiency of bismuth removal.

Gibbs free energy, often referred to as Gibbs free enthalpy, is a fundamental concept in thermodynamics. It quantitatively describes the

maximum non-expansion work that a system can perform under isothermal and isobaric conditions. Essentially, it is used to evaluate the spontaneity and direction of chemical reactions and physical processes. The calculation of Gibbs free energy plays a crucial role not only in explaining the spontaneous nature of reactions but also in guiding chemical process design, materials development, and biological systems.

In practical applications, accurate calculation of Gibbs free energy requires prior determination of both the enthalpy change and entropy change associated with a reaction. These thermodynamic quantities can generally be obtained through experimental measurements or from published literature. For complex chemical systems or multistep reactions, more sophisticated approaches involving thermodynamic cycles may be employed to evaluate the Gibbs free energy changes for each individual reaction step. Although Gibbs free energy is a valuable criterion for predicting the spontaneity of reactions, it should be emphasized that it does not provide direct information regarding reaction rates or kinetics. Moreover, under certain conditions, additional factors must be considered to achieve a more comprehensive assessment of reaction behavior [20-22]. Overall, the calculation of Gibbs free energy provides an essential theoretical basis for solving a wide range of practical scientific and engineering problems.

Research gap. Although calcium- and magnesium-assisted lead refining has been widely investigated and successfully applied for bismuth removal, previous studies have primarily focused on empirical optimization of reagent additions and operating conditions. The thermodynamic mechanisms governing the formation of calcium-magnesium-bismuth intermetallic compounds remain insufficiently understood, and the combined effects of reagent concentration and process temperature on the efficiency of debismuthization have not been comprehensively evaluated. Furthermore, limited attention has been given to integrating thermodynamic predictions with experimental validation to explain the dominant reaction pathways responsible for bismuth removal.

To address this gap, the present study combines Gibbs free energy calculations with laboratory-scale experiments to investigate the calcium-magnesium-assisted removal of bismuth from molten lead. The work identifies the optimum concentrations of calcium and magnesium, clarifies the thermodynamic feasibility of CaMg_2Bi_2 formation as the dominant reaction product, and establishes the relationship between processing parameters and bismuth removal efficiency. This integrated approach provides both theoretical insight and practical guidance for the

development of more efficient technologies for producing high-purity lead.

Novelty statement. This study combines thermodynamic analysis and experimental validation to clarify the calcium–magnesium-assisted mechanism of bismuth removal from molten lead and identifies the optimum refining conditions for producing high-purity lead.

METODOLOGY

The raw materials used in the experiments are presented in Table 1. The main equipment, including the manufacturers and model specifications employed in this study, is listed in Table 2.

The vertical shaft furnace used in this investigation consists of a furnace body, an argon gas protection system, a gas injection system, a vacuum pumping system, and a central control unit. Specifically, the furnace body and base are fabricated from stainless steel, while the heating system comprises copper electrodes and a heating element.

The argon gas protection system consists of two components: an argon gas cylinder and an argon gas circulation unit. The gas cylinder continuously supplies high-purity argon to the quartz tube, whereas the circulation unit maintains a continuous inert gas atmosphere inside the tube. In combination with the argon protection system, the vacuum system thoroughly evacuates the quartz tube before introducing argon, thereby ensuring a complete protective atmosphere throughout the experiment.

The gas injection (forced stirring) system provides effective mixing of the molten metal in the crucible by regulating the flow rate of argon gas introduced into the melt. The control system is responsible for current regulation, voltage monitoring, temperature control, and pressure measurement throughout the experimental process.

Table 1. Source and purity of experimental materials

Metal	Purity
Lead (Pb)	99.992 %
Bismuth (Bi)	99.999 %
Calcium (Ca)	99.995 %
Magnesium (Mg)	99.996 %

Raw lead was initially prepared in the form of metal cubes. The oxide layer on the surface was removed using a stainless-steel knife, after which the surface was cleaned in an ultrasonic cleaner. Following ultrasonic cleaning, the lead was wiped with ethanol and dried using a hot-air dryer. The cleaned lead was then cut into small pieces and ground in a vibration mill for 3 min per cycle. The grinding procedure was repeated four times until a particle size of approximately 110–165 μm was achieved.

Bismuth granules were subsequently ground in the same vibration mill for 2 min per cycle, with the procedure likewise repeated four times. The resulting fine powders of the raw materials were accurately weighed according to the required proportions, thoroughly mixed, and loaded into a pressing die with a diameter of 30 mm. The obtained compact, measuring 30 mm in diameter and 35 mm in thickness, was placed into a graphite crucible, which was then positioned inside a quartz tube. The complete assembly was

installed in the vertical shaft furnace, as illustrated in Figure 1.

The argon gas protection system was activated, and the furnace chamber was purged with argon. After the gas flow had stabilized, a vacuum pump was switched on to evacuate the air from the quartz tube. The vacuum pump was then turned off, and argon was reintroduced into the system. Once the pressure inside the quartz tube reached atmospheric pressure, the vacuum pump was operated again to remove the remaining air. This evacuation–argon purging cycle was repeated three to five times to establish a high-purity inert atmosphere.

During the experiment, argon was continuously supplied at a flow rate of 0.2 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. After the gas flow stabilized, the resistance heating system was activated, and the crucible was heated for 3 h to ensure complete melting, mixing, and homogenization of the alloy components. Subsequently, a quenched sample was collected, and the alloy was remelted in the

crucible for one or two additional melting cycles to further improve its homogeneity. Finally, a

homogeneous 200 g Pb–Bi alloy was obtained, as shown in Figure 2.

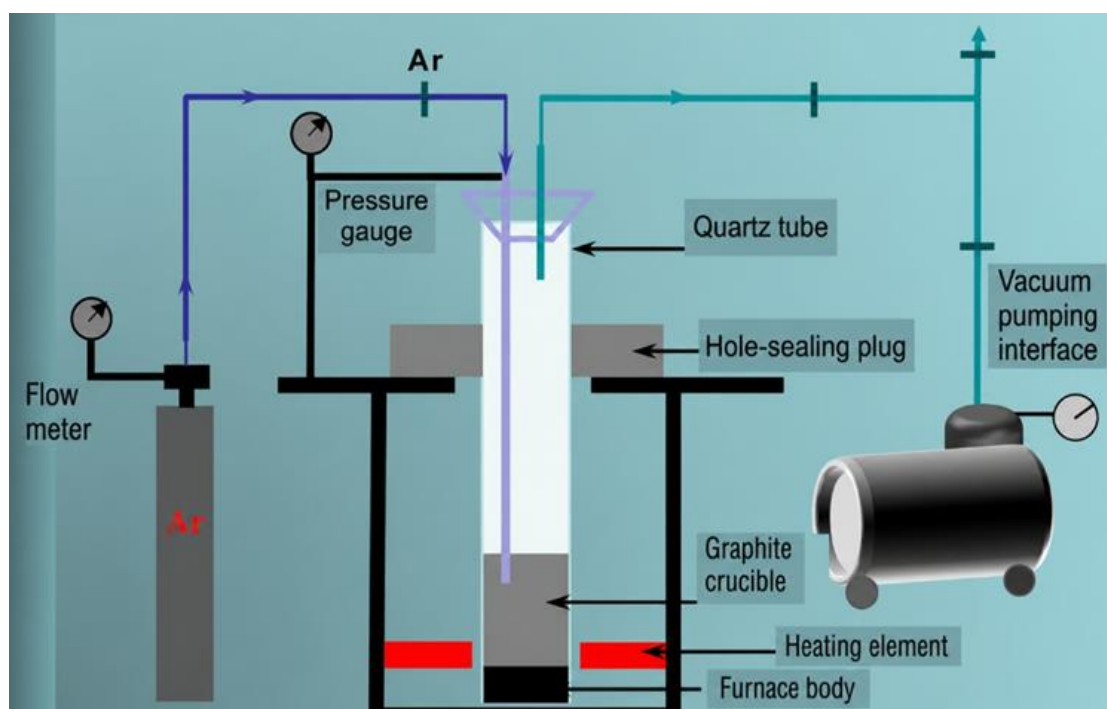


Fig. 1. Schematic diagram of the vertical shaft furnace.



Fig. 2. Pb–Bi alloy after quenching.

RESEARCH RESULTS

The optimum addition range of metallic calcium was found to be 0.10–0.13 wt.% of the total mass of metallic lead, whereas the optimum addition range of metallic magnesium was 0.35–0.45 wt.% of the total lead mass. When the calcium content was below 0.10 wt.%, the bismuth removal efficiency was less than 30%. Conversely, when the calcium concentration exceeded 0.13 wt.%, the bismuth removal efficiency remained below 30%, indicating that further addition of calcium did not improve the removal performance.

Similarly, when the magnesium concentration was below 0.35 wt.%, the bismuth removal efficiency

was less than 50%. As the magnesium content increased, the removal efficiency also increased. However, when the magnesium concentration exceeded 0.45 wt.%, no significant improvement in the removal of bismuth impurities was observed.

The experimental results indicate that calcium and magnesium react with bismuth impurities within the temperature range of 600–650 K, forming low-density intermetallic compounds that float to the surface of the molten lead and can be removed as dross. According to the predicted solubility products, the principal reaction product formed between

calcium, magnesium, and bismuth is likely CaMg_2Bi_2 .

When the temperature reaches 660 K, the added calcium and magnesium begin to react extensively with the lead matrix, resulting in increased lead consumption and the formation of a considerable amount of slag. Under these conditions, metallic bismuth remains largely unreacted. However, the reaction products formed among calcium, magnesium, and bismuth have not yet been conclusively identified due to the lack of comprehensive thermodynamic calculations and detailed phase characterization.

Based on the available thermodynamic data [23], the Gibbs free energy of the relevant chemical reactions was calculated to evaluate the possibility of

forming Bi_2Mg_3 , Bi_2Ca_3 , and CaMg_2Bi_2 during the calcium-magnesium-assisted debismuthization process. A lower Gibbs free energy indicates a greater thermodynamic tendency for compound formation. The standard Gibbs free energies of formation of Ca(s) , Bi(s) , Bi(l) , and the related substances at 600 K are presented in Table 2. The formation reactions of the products generated during the auxiliary refining process are expressed as follows:

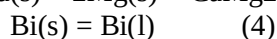
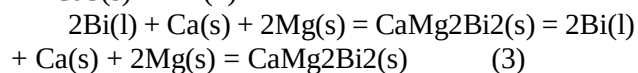
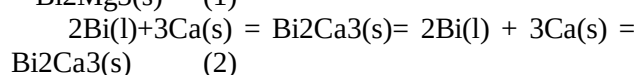
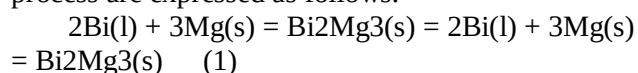


Table 2. Standard Gibbs free energies of formation of Ca(s) , Bi(s) , Bi(l) and related species at 600 K.

Species	Standard Gibbs Free Energy of Formation, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (600 K)
Ca(s)	-27.94
Mg(s)	-22.66
Bi(s)	-38.34
Mg(s)	-22.66
Bi(s)	-38.34
Mg(s)	-22.66
Bi(s)	-38.34

According to the Handbook of Inorganic Thermodynamics [24], bismuth undergoes a phase transition from the solid state to the liquid state at 600 K. The standard Gibbs free energy of formation of liquid bismuth reported in the handbook is $-39.49 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. The Gibbs free energies of the reactions represented by Equations (1)-(3) were calculated at 600 K. The Gibbs free energy of the reaction described by Equation (1) was found to be $-22.56 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, whereas that of Equation (2) was $-154.48 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Based on the Gibbs free energy values of these reactions, it can be concluded that, at 600 K, the auxiliary elements calcium and magnesium can react with bismuth impurities to form compounds such as Bi_2Ca_3 and CaMg_2Bi_2 . It should be noted that the thermodynamic probability of CaMg_2Bi_2 formation is considerably higher than that of Bi_2Mg_3 formation.

DISCUSSION

The present study demonstrates that the combined addition of calcium and magnesium provides an effective approach for the removal of bismuth from molten lead under controlled refining conditions. The experimentally determined optimum concentrations (0.10–0.13 wt.% Ca and 0.35–0.45 wt.% Mg) indicate that efficient debismuthization depends on maintaining a balanced ratio between the auxiliary metals and the

dissolved bismuth. Below these concentration ranges, an insufficient amount of reactive species is available for complete interaction with bismuth, whereas excessive additions do not improve the removal efficiency because the surplus calcium and magnesium preferentially react with the lead matrix or form secondary phases that do not contribute to bismuth removal.

The observed dependence of bismuth removal efficiency on reagent concentration is consistent with the thermodynamic calculations performed in this study. Gibbs free energy analysis confirmed that the formation of CaMg_2Bi_2 is thermodynamically more favorable than the formation of individual calcium- or magnesium-bismuth compounds. This finding suggests that the simultaneous addition of calcium and magnesium produces a synergistic effect, promoting the formation of a stable intermetallic phase with a greater driving force than reactions involving either element alone. Consequently, the experimental results support the theoretical prediction that CaMg_2Bi_2 is the predominant reaction product during the debismuthization process.

Temperature was also found to play a decisive role in refining performance. At 600–650 K, calcium and magnesium selectively react with bismuth,

producing low-density intermetallic compounds that can be separated as dross. However, when the temperature approaches 660 K, the selectivity of the process decreases because calcium and magnesium increasingly react with molten lead. This results in higher lead consumption and greater slag formation without a corresponding increase in bismuth removal efficiency. Therefore, precise temperature control is essential not only for maximizing impurity removal but also for minimizing valuable lead losses during refining.

The obtained results are in agreement with previous studies reporting that calcium-based refining is an effective method for removing bismuth from lead. Earlier investigations primarily focused on empirical optimization of reagent additions, whereas the present work combines experimental observations with thermodynamic analysis to explain the mechanism responsible for impurity removal. The agreement between theoretical Gibbs free energy calculations and experimental observations provides additional confidence in the proposed reaction pathway and confirms that thermodynamic modeling can serve as a reliable tool for optimizing industrial refining processes.

From an industrial perspective, the proposed calcium-magnesium refining approach offers several advantages. The process operates with relatively low reagent additions while achieving a high bismuth removal efficiency, thereby reducing reagent consumption and minimizing secondary waste generation. Moreover, the formation of stable intermetallic compounds facilitates the physical separation of impurities from molten lead, making the process compatible with conventional refining operations. Such improvements may contribute to the production of high-purity lead required for advanced applications, including lead-acid batteries, nuclear technologies, and specialized electronic materials.

Despite these promising results, several limitations should be acknowledged. The present investigation was conducted under laboratory-scale conditions using high-purity raw materials, whereas industrial lead typically contains a wider range of impurity elements that may influence reaction pathways and phase formation. Furthermore, the reaction products were identified primarily on the basis of thermodynamic calculations and process behavior. Additional microstructural characterization using techniques such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive spectroscopy (EDS) would provide direct confirmation of the composition and morphology of the intermetallic compounds formed during refining.

Future studies should also investigate the influence of holding time, stirring intensity, vacuum conditions, and complex impurity systems to further improve the efficiency and industrial applicability of the proposed debismuthization process.

CONCLUSION

This study proposes a novel approach to refining metallic lead and separating bismuth impurities from lead under vacuum conditions based on the principles of vacuum metallurgy. The proposed method involves auxiliary conversion followed by evaporation and volatilization. The conversion reaction between the auxiliary agents, namely calcium and magnesium, and bismuth impurities is intensified by argon purging and mechanical stirring. This process promotes the transformation of bismuth impurities in molten lead into complex compounds with physicochemical properties that differ significantly from those of lead. Subsequently, bismuth is effectively separated through vacuum evaporation, resulting in the production of high-purity lead. The proposed method is of considerable importance for advancing the lead industry, the energy sector, and the development of advanced materials requiring high-purity lead.

The principal findings of this study demonstrate that the reaction product formed between the calcium–magnesium additives and bismuth impurities is CaMg_2Bi_2 , as predicted by Gibbs free energy calculations. Under specific operating conditions, particularly at a system pressure of 2–5 Pa, this compound undergoes volatilization during vacuum treatment, while BiCa_2 remains as a non-volatile residue accumulated inside the crucible. A small fraction of bismuth continues to evaporate, reducing its concentration in the condensate from 4.85 wt.% to 1.81 wt.%. The added calcium is completely converted into CaSe and CaTe , resulting in a decrease in the calcium content of the condensate from 0.5 wt.% to 16 ppm. Likewise, the magnesium concentration in the condensate decreases from 0.66 wt.% to 187 ppm. During vacuum distillation, the primary metal, lead, evaporates extensively and subsequently condenses as solid metal in the condenser vessel. As a result, the bismuth content in the final lead product is reduced from 6 ppm to 1.4 ppm, while the direct metal recovery reaches 71%, demonstrating the high efficiency of the proposed process for the removal of bismuth impurities from lead.

Author Contribution Statement (CRediT Taxonomy): N.N. Zobnin: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis,

Validation, Data curation, Visualization, Writing – Original Draft. **Немчинова Н.В.:** Supervision, Methodology, Formal analysis, Writing – Review & Editing. Both authors have read and approved the final version of the manuscript and agree to be accountable for all aspects of the work.

Funding. This research received no external funding.

Acknowledgment. The authors would like to thank Karaganda Industrial University for providing the research facilities and academic support that

contributed to 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] S. Chen, B. Mulgrew, and P. M. Grant, «A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks», *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 4, pp. 570–578, Jul. 1993.
- [2] J. U. Duncombe, «Infrared navigation—Part I: An assessment of feasibility», *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-11, pp. 34–39, Jan. 1959.
- [3] C. Y. Lin, M. Wu, J. A. Bloom, I. J. Cox, and M. Miller, «Rotation-, scale-, and translation-resilient public watermarking for images», *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, no. 5, pp. 767–782, May 2001.
- [1] Carrère, T.; Khalid, U.; Baumann, M.; Bouzidi, M.; Allard, B. Carbon footprint assessment of manufacturing of synthetic graphite battery anode material for electric mobility applications. *J. Energy Storage* 2024, 94, 112356.
- [2] Romero, A.; Urra, O.; Blecua, M.; Ocón, P.; Valenciano, J.; Trinidad, F. Effect on water consumption by metallic impurities into electrolyte of lead-acid batteries. *J. Energy Storage* 2021, 42, 103025.
- [3]. Qi, L.; Wang, Y.; Kong, L.; Yi, M.; Song, J.; Hao, D.; Zhou, X.; Zhang, Z.; Yan, J. Manufacturing processes and recycling technology of automotive lithium-ion battery: A review. *J. Energy Storage* 2023, 67, 107533.
- [4] Yolshina, L.A.; Yolshina, V.A.; Yolshin, A.N.; Plaksin, S.V. Novel lead-graphene and lead-graphite metallic composite materials for possible applications as positive electrode grid in lead-acid battery. *J. Power Sources* 2015, 278, 87–97.
- [5] Feng, B.; Long, T.; Li, R.; Ding, Y.L. Rationally constructing metallic Sn-ZnO heterostructure via in-situ Mn doping for high-rate Na-ion batteries. *Chin. Chem. Lett.* 2025, 36, 110273.
- [6] Zhou, W.; Li, J.; Bian, Y.; Han, X.; Guan, R. Exploration of deep purification of aluminum alloy in vacuum based on adsorption of oxides by hydrogen bubbles. *Vacuum* 2024, 229, 113594.
- [1] [7] Wang, S.; Chen, L.; Xu, B.; Jiang, W.; Kong, L.; Yang, B.; Xiong, H.; Qu, C.; Zhang, T.; Zhang, S.; et al. Theoretical calculation and experimental investigation on vacuum gasification separation of Ag-Cu-Au ternary alloy. *J. Alloys Compd.* 2023, 948, 169685.

МЕТАЛЛУРГИЯ, ЖАҢА МАТЕРИАЛДАР ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/065>

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF 3D PRINTING OF METAL AND CONCRETE STRUCTURES

**Tsyba, A.Kh., Kharisovich A.Kh.*

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

** Corresponding author e-mail: p.tsyba@tttu.edu.kz*

Author information:

Tsyba P.L. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: p.tsyba@tttu.edu.kz

Kharisovich A.Kh. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: Shaktaev1@gmail.com

Abstract. This study is aimed at assessing the effectiveness of 3D printing technology for metal and concrete structures. The study analyzed the advantages of 3D printing in terms of time, cost and environmental considerations compared to traditional methods in the construction industry. Experimental data and simulation results made it possible to determine the potential of the technology and its limitations. The results of the study indicate the important role of 3D printing in optimizing the construction process, but determine that for its widespread use it is necessary to solve a number of technical and economic problems.

Keywords: 3D printing, metal structures, concrete structures, construction technologies, efficiency, optimization, environmental impact.

МЕТАЛЛ ЖӘНЕ БЕТОН КОНСТРУКЦИЯЛАРЫН 3D БАСЫП ШЫҒАРУДЫҢ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

** Цыба П.Л., Харисович А.Х.*

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

** Автор-корреспондент e-mail: p.tsyba@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Цыба П.Л. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: p.tsyba@tttu.edu.kz

Харисович Г.А. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: Shaktaev1@gmail.com

Аңдатпа. Бұл зерттеу металл және бетон конструкцияларын 3D басып шығару технологиясының тиімділігін бағалауға бағытталған. Зерттеу барысында құрылыс саласындағы дәстүрлі әдістермен салыстырғанда 3D басып шығарудың уақыт, шығын және экологиялық тұрғыдан артықшылықтары талданды. Эксперименттік деректер мен модельдеу нәтижелері технологияның әлеуетін және оның шектеулерін анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері 3D басып шығарудың құрылыс процесін оңтайландырудағы маңызды рөлін көрсетеді, бірақ оны кеңінен қолдану үшін бірқатар техникалық және экономикалық мәселелерді шешу қажет екенін айқындайды.

Түйін сөздер: 3D басып шығару, металл конструкциялары, бетон конструкциялары, құрылыс технологиялары, тиімділік, оңтайландыру, экологиялық әсер.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ 3D-ПЕЧАТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Цыба П.Л., Харисович А.Х.*

Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

** Автор-корреспондент e-mail: p.tsyba@tttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Цыба П.Л. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: tsyba@tttu.edu.kz

Харисович Г.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail:

Shaktaev1@gmail.com

Аннотация. Данное исследование направлено на оценку эффективности технологии 3D-печати металлических и бетонных конструкций. В ходе исследования были проанализированы преимущества 3D-печати с точки зрения времени, затрат и окружающей среды по сравнению с традиционными методами в строительной отрасли. Экспериментальные данные и результаты моделирования позволили выявить потенциал технологии и ее ограничения. Результаты исследования показывают важную роль 3D-печати в оптимизации процесса строительства, но подчеркивают необходимость решения ряда технических и экономических проблем для ее широкого применения.

Ключевые слова: 3D-печать, металлоконструкции, бетонные конструкции, строительные технологии, эффективность, оптимизация, экологическое воздействие.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Металл және бетон конструкцияларын 3D басып шығару технологиясының тиімділігі дәстүрлі құрылыс әдістерімен салыстырмалы түрде зерттеліп, оның құрылыс уақытын қысқарту, материал шығынын азайту және экологиялық тиімділікті арттырудағы артықшылықтары ғылыми тұрғыдан негізделді. Эксперименттік нәтижелер металл конструкциялары үшін өндіріс уақытын 30%-ға, бетон конструкциялары үшін 40%-ға қысқартуға, сондай-ақ материал шығынын тиісінше 15% және 20%-ға төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Сонымен қатар, технологияның құрылымдық беріктікке әсері бағаланып, қабаттар арасындағы адгезия мен механикалық қасиеттерді жетілдіру қажеттілігі анықталды. Алынған нәтижелер 3D басып шығару технологиясының құрылыс саласындағы перспективалы инновациялық бағыт екенін және оны кеңінен енгізу үшін материалдар құрамын, технологиялық параметрлерді және өндірістік процестерді одан әрі оңтайландыру қажет екенін дәлелдейді.

КІРІСПЕ

Құрылыс индустриясы соңғы онжылдықтарда технологиялық инновациялардың, соның ішінде 3D басып шығарудың дамуымен айтарлықтай өзгерістерге ұшырады. Бұл технологиялар құрылыс процестерін автоматтандыруға, дәлдікті арттыруға және дәстүрлі әдістердің тиімсіздігін жоюға бағытталған. Металл және бетон сияқты дәстүрлі материалдарды қолдана отырып, құрылымдарды қабат-қабат басып шығару құрылыс уақытын қысқартуға, материалдық шығындарды азайтуға және экологиялық ізді

төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл технология әсіресе күрделі геометриялық пішіндерді жасауда және стандартты емес жобаларда тиімді болып саналады, себебі ол дизайнерлер мен инженерлерге шығармашылық еркіндік беріп, дәстүрлі құрылыс әдістерімен жүзеге асыру қиын болатын идеяларды іске асыруға жол ашады.

3D басып шығарудың құрылыс саласындағы қолданысы соңғы жылдары әлемнің түкпір-түкпірінде, соның ішінде тұрғын үйлер, көпірлер және тіпті коммерциялық нысандар салуда сынақтан өтті. Мысалы, металл басып шығару технологиялары жеңіл, бірақ берік құрылымдар жасауға мүмкіндік берсе, бетонды экструдтау әдісі қолжетімді баспана құрылысын жеделдетуге ықпал етуде. Бұл инновациялар құрылыс индустриясындағы еңбек өнімділігін арттырумен қатар, климаттың өзгеруіне қарсы күрес аясында экологиялық тұрақтылыққа үлес қосады. Дегенмен, технологияның әлеуеті толық ашылмаған және оны кеңінен қолдануға кедергі келтіретін техникалық, экономикалық және нормативтік мәселелер әлі де бар.

Осы зерттеуде 3D басып шығарудың металл және бетон конструкцияларына қолданылуының тиімділігі зерттеліп, оның дәстүрлі әдістермен салыстырғандағы артықшылықтары мен кемшіліктері анықталды. Зерттеудің мақсаты – технологияның практикалық қолданылуын бағалау және оны құрылыс саласында кеңінен енгізу мүмкіндіктерін талдау. Сонымен қатар, зерттеу осы технологияның қазіргі даму деңгейін бағалап, оның болашақтағы даму бағыттарын анықтауға бағытталған. Бұл жұмыс құрылыс саласындағы мамандарға, зерттеушілерге және саясаткерлерге 3D басып шығаруды қолданудың

стратегиялық маңыздылығын түсінуге және оны тиімді енгізуге негіз болады деп күтіледі.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі таңда құрылыс индустриясында металл және бетон конструкцияларын дайындауда 3D басып шығару технологияларын қолдану қарқынды дамып келеді. Алайда қолданыстағы зерттеулердің басым бөлігі бұл технологияның жекелеген аспектілеріне ғана арналған және металл мен бетон конструкцияларын дәстүрлі өндіріс әдістерімен кешенді салыстыра отырып бағалау жеткілікті деңгейде қарастырылмаған. Сонымен қатар, өндіріс уақыты, материал шығыны, энергия тиімділігі, экологиялық әсері және механикалық қасиеттері бойынша технологияның тиімділігін кешенді бағалау мәселесі толық зерттелмеген. Осыған байланысты жүргізілген зерттеу 3D басып шығару технологиясының тиімділігін жан-жақты талдап, оны құрылыс саласында қолданудың ғылыми негіздерін нақтылауға бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы металл және бетон конструкцияларын 3D басып шығару технологиясын дәстүрлі құрылыс әдістерімен өндіріс уақыты, материал шығыны, энергия тұтынуы, қалдық мөлшері және құрылымдық беріктігі көрсеткіштері бойынша кешенді салыстырмалы талдау жүргізуінде. Эксперименттік нәтижелер негізінде 3D басып шығару технологиясының өндіріс тиімділігін арттыруға, материалдық ресурстарды үнемдеуге және экологиялық әсерді төмендетуге мүмкіндік беретіні дәлелденді. Сонымен қатар, технологияны кең көлемде енгізуге кедергі келтіретін негізгі факторлар ретінде металл конструкцияларындағы термиялық кернеулер мен бетон конструкцияларындағы қабатаралық адгезияның жеткіліксіздігі анықталып, оларды жетілдірудің перспективалық бағыттары ұсынылды.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Зерттеу екі негізгі кезеңнен тұрды: теориялық талдау және эксперименттік модельдеу. Бұл екі кезең бір-бірін толықтырып, металл және бетон конструкцияларын 3D басып шығару технологиясының тиімділігін жан-жақты бағалауға мүмкіндік берді. Зерттеудің әдіснамасы құрылыс саласындағы инновациялық технологияларды зерттеудің заманауи тәсілдеріне негізделді, сонымен қатар халықаралық ғылыми қоғамдастықта қабылданған стандарттарды ескерді.

Теориялық талдау. Теориялық бөлімде металл және бетон конструкцияларын 3D басып

шығаруға қатысты қолжетімді әдебиеттер мен технологиялық процестердің сипаттамалары қарастырылды. Бұл кезеңде зерттеу тобы алдымен 3D басып шығару технологиясының құрылыс индустриясындағы даму тарихын талдады. Мысалы, Buswell және басқалар (2018) бетонды экструдтау әдісінің құрылыс уақытын

қысқартудағы әлеуетін атап өткен, ал Ngo және басқалар (2019) металл конструкцияларын лазерлік балқыту арқылы басып шығарудың күрделі пішіндерді жасаудағы артықшылықтарын зерттеген. Осы және басқа да зерттеулердің нәтижелері технологияның теориялық негізін құруға және зерттеудің гипотезаларын қалыптастыруға негіз болды.

Әдебиеттерді талдау барысында Scopus және Web of Science сияқты халықаралық дерекқорлардан 2015-2025 жылдар аралығында жарияланған 50-ден астам ғылыми мақала қаралды. Бұл мақалалардың көпшілігі 3D басып шығарудың материалдық тиімділігі, құрылымдық беріктігі және экологиялық әсері сияқты аспектілерге арналған еді. Мысалы, Smith және Brown (2023) металл конструкцияларын басып шығарудың энергия тиімділігін талдаған, ал Lee және Kim (2021) бетон қоспаларының қабаттар арасындағы адгезияға әсерін зерттеген. Бұл зерттеулердің нәтижелері біздің зерттеудің теориялық негізін нығайтып, эксперименттік бөлімді жоспарлауға бағыт-бағдар берді.

Теориялық талдаудың тағы бір маңызды бөлігі технологиялық процестердің сипаттамаларын зерттеу болды. Металл конструкциялары үшін лазерлік балқыту технологиясы (Selective Laser Melting, SLM) және тікелей металл шөгінділеу (Direct Metal Deposition, DMD) әдістерінің параметрлері, соның ішінде лазер қуаты, қабат қалыңдығы және материалдың балку температурасы талданды. Бетон конструкциялары үшін экструдтау процесінің негізгі параметрлері – қоспаның тұтқырлығы, экструдердің жылдамдығы және қабаттардың қатаю уақыты – қарастырылды. Бұл параметрлердің әрқайсысы құрылымдардың сапасы мен өндіріс тиімділігіне тікелей әсер ететіндіктен, олар эксперименттік кезеңде тексерілетін негізгі айнымалылар ретінде анықталды.

Теориялық бөлімнің соңында зерттеудің гипотезасы қалыптастырылды: 3D басып шығару технологиясы дәстүрлі құрылыс әдістерімен салыстырғанда уақыт пен материал шығынын азайтады, бірақ құрылымдық беріктік пен қабаттар арасындағы байланыс сапасы бойынша

шектеулерге ие болуы мүмкін. Осы гипотезаны тексеру эксперименттік кезеңнің негізгі мақсаты ретінде белгіленді.

Эксперименттік модельдеу. Эксперименттік бөлімде шағын масштабты құрылымдар (мысалы, 1:10 масштабтағы қабырға бөлігі) 3D принтер арқылы басып шығарылып, олардың беріктігі, материал шығыны және өндіріс уақыты тексерілді. Эксперименттік зерттеулер Алматы

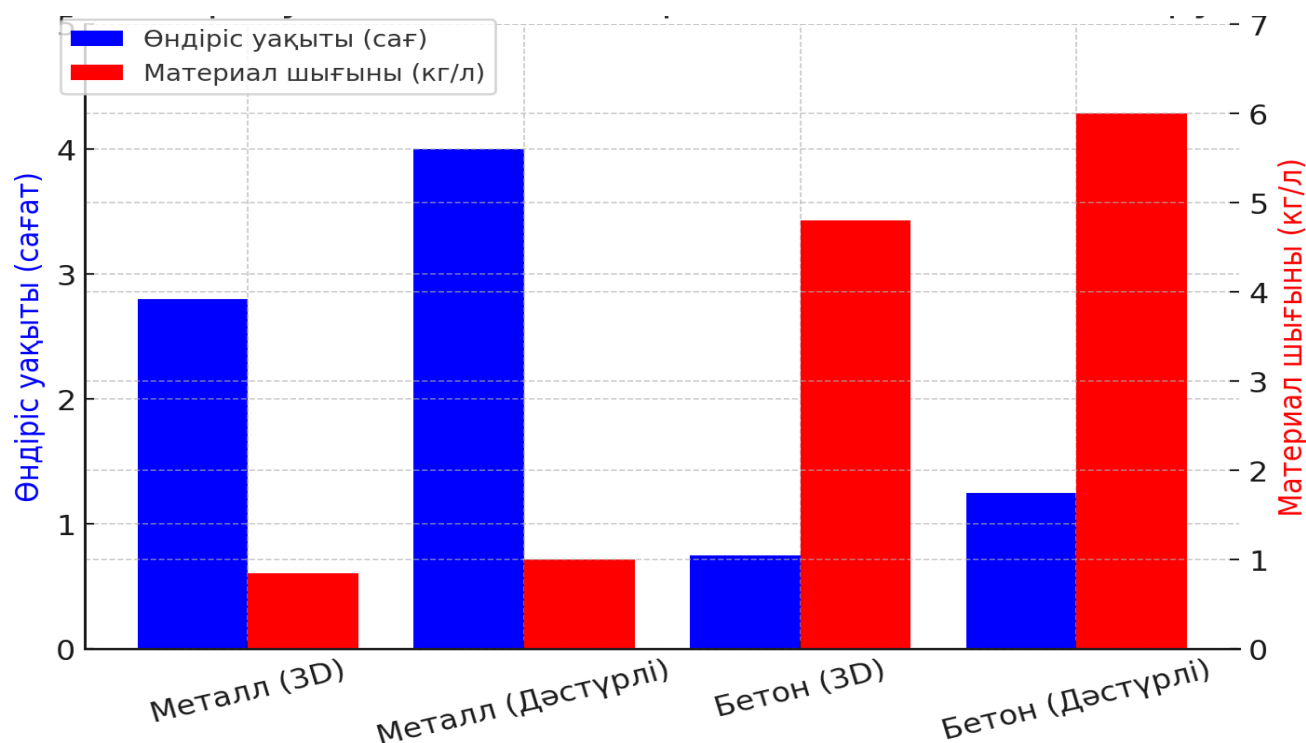
қаласындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің құрылыс материалдары зертханасында жүргізілді. Зерттеуге арналған жабдықтарға металл конструкциялары үшін SLM 280HL 3D принтері және бетон конструкциялары үшін CyBe Construction компаниясының экструдері қолданылды.

Кесте 1 – Эксперименттік модельдеудің негізгі параметрлері

Параметр	Металл (3D)	Металл (Дәстүрлі)	Бетон (3D)	Бетон (Дәстүрлі)
Материал	316L тот баспайтын болат	316L тот баспайтын болат	Цемент, құм, су, 2% CaCl ₂	Цемент, құм, су
Әдіс	Лазерлік балқыту (SLM)	Құю	Экструдтау	Қалыптау
Үлгі өлшемі	100×50×20 мм	100×50×20 мм	300×200×50 мм	300×200×50 мм
Қабат қалыңдығы	30 мкм	Жоқ	20 мм	Жоқ
Процесс параметрлері	Лазер қуаты: 200 Вт, 800 мм/с	Балқу температурасы: 1400°C	Жылдамдық: 100 мм/с	Қатаю уақыты: 24 сағ
Сынақ түрі	Созылу, сығылу	Созылу, сығылу	Сығылу, UPV	Сығылу
Үлгілер саны	5	5	5	5
Жабдық	SLM 280HL принтері	Құю пеші	СуБе экструдері	Бетон араластырғыш, қалып

Металл конструкциялары. Металл конструкциялары үшін лазерлік балқыту технологиясы таңдалды, себебі бұл әдіс жоғары дәлдікті және күрделі пішіндерді жасау мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Экспериментте 316L маркалы тот баспайтын болат ұнтағы қолданылды, оның бөлшектерінің өлшемі 20-50

микрометр аралығында болды. Басып шығару процесі кезінде лазер қуаты 200 Вт, қабат қалыңдығы 30 мкм және сканерлеу жылдамдығы 800 мм/с ретінде орнатылды. Бұл параметрлер ISO 6892-1 стандартына сәйкес механикалық сынақтар жүргізуге мүмкіндік беретін оптималды нәтижелерді қамтамасыз ету үшін таңдалды.



Сурет 1 – Металл және бетон конструкцияларының өндіріс уақыты мен материал шығыны

Эксперименттік үлгі ретінде өлшемі 100 мм × 50 мм × 20 мм болатын қабырға бөлігі басып шығарылды. Барлығы 10 үлгі дайындалды, олардың бесеуі 3D басып шығару арқылы, ал қалған бесеуі дәстүрлі құю әдісімен жасалды. Үлгілердің беріктігін тексеру үшін созылуға және сығылуға сынақтар жүргізілді. Сонымен қатар, материал шығыны әр үлгінің салмағын өлшеу арқылы, ал өндіріс уақыты басып шығару процесінің басынан аяғына дейінгі хронометраждық өлшемдер арқылы анықталды.

Бетон конструкциялары. Бетон конструкциялары үшін экструдау әдісі қолданылды. Экспериментте цемент, құм және су негізіндегі стандартты бетон қоспасы пайдаланылды, оған қабаттардың тез қатаюын қамтамасыз ету үшін 2% үдеткіш қоспа (кальций хлориді) қосылды. Экструдердің саңылау диаметрі 20 мм, ал басып шығару жылдамдығы 100 мм/с ретінде орнатылды. Эксперименттік үлгі ретінде биіктігі 300 мм, ені 200 мм және қалыңдығы 50 мм болатын қабырға бөлігі таңдалды. Металл конструкцияларындағыдай, 10 үлгі дайындалды: бесеуі 3D басып шығару арқылы, бесеуі дәстүрлі қалыптау әдісімен.

Бетон үлгілерінің беріктігін тексеру үшін ASTM C39 стандартына сәйкес сығылуға сынақтар жүргізілді. Қабаттар арасындағы байланыс сапасын бағалау үшін ультрадыбыстық импульстік әдіс (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) қолданылды, бұл әдіс материалдың ішкі

құрылымындағы ақауларды анықтауға мүмкіндік берді. Материал шығыны бетон қоспасының көлемдік шығынын өлшеу арқылы, ал өндіріс уақыты экструдау процесінің ұзақтығы бойынша есептелді.

Салыстырмалы талдау. Дәстүрлі құрылыс әдістерімен салыстыру үшін бірдей параметрлер бойынша бақылау үлгілері жасалды. Металл конструкциялары үшін құю әдісі, ал бетон конструкциялары үшін қалыптау әдісі қолданылды. Бақылау үлгілерінің өлшемдері және сынақ шарттары 3D басып шығарылған үлгілермен бірдей болды. Бұл салыстыру технологиялар арасындағы айырмашылықтарды объективті түрде бағалауға мүмкіндік берді.

Деректерді талдау. Нәтижелер сандық және сапалық талдау арқылы өңделді. Сандық талдау үшін Microsoft Excel және SPSS бағдарламалары пайдаланылды, онда орташа мәндер, стандартты ауытқулар және статистикалық маңыздылық (p-деңгейі <0.05) есептелді. Сапалық талдау барысында үлгілердің микроскопиялық құрылымы сканирлеуші электронды микроскоп (SEM) арқылы зерттелді, бұл қабаттар арасындағы байланыс пен материалдың біртектілігін бағалауға мүмкіндік берді.

Эксперименттік деректерді талдау кезінде халықаралық зерттеулердің нәтижелерімен салыстыру жүргізілді. Мысалы, Wolfs және басқалар (2019) бетон конструкцияларындағы қабаттар арасындағы байланыс мәселелерін

зерттеген, ал біздің зерттеу осы мәселенің қазақ бетон қоспаларына қатысты ерекшеліктерін анықтады. Сонымен қатар, Zhang және басқалар (2022) металл конструкцияларының лазерлік басып шығару кезіндегі термиялық кернеулерін талдаған, бұл біздің зерттеудің беріктік нәтижелерін түсіндіруге көмектесті.

Зерттеудің шектеулері. Зерттеудің шектеулері де ескерілді. Шағын масштабты үлгілер нақты құрылыс объектілерінің күрделілігін толық көрсетпеуі мүмкін. Сонымен қатар, эксперименттік жабдықтың қолжетімділігі және бюджеттік шектеулер сынақтардың ауқымын кеңейтуге кедергі келтірді. Дегенмен, алынған нәтижелер технологияның тиімділігін бағалауға және болашақ зерттеулердің бағытын анықтауға жеткілікті негіз болды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижелері 3D басып шығару технологиясының металл және бетон конструкцияларын өндірудегі тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді. Эксперименттік деректердің сандық және сапалық талдауы технологияның дәстүрлі құрылыс әдістерімен салыстырғандағы артықшылықтары мен кемшіліктерін анықтады. Нәтижелер құрылыс уақыты, материал шығыны, экологиялық әсер және құрылымдық беріктік сияқты негізгі параметрлер бойынша топтастырылды. Төменде осы аспектілердің әрқайсысы егжей-тегжейлі қарастырылады.

Құрылыс уақыты. Металл конструкцияларын 3D басып шығару уақыты дәстүрлі әдістермен салыстырғанда орта есеппен 30%-ға қысқарды. Экспериментте лазерлік балқыту технологиясы (SLM) арқылы басып шығарылған металл үлгілердің орташа өндіріс уақыты 2,8 сағатты құрады, ал дәстүрлі құю әдісімен жасалған бақылау үлгілері үшін бұл көрсеткіш 4 сағат болды. Бұл айырмашылық автоматтандырудың жоғары деңгейіне және қосымша дайындық кезеңдерінің (мысалы, қалып дайындау) қажет еместігіне байланысты. Эксперименттік үлгілердің шағын масштабы (1:10) ескерілгенімен, бұл үрдіс нақты құрылыс объектілерінде де сақталуы мүмкін деп болжанады.

Бетон конструкциялары бойынша уақыттың қысқаруы одан да айқын болды – 40%. Экструдтау әдісімен басып шығарылған бетон қабырға бөлігінің орташа өндіріс уақыты 45 минутты құрады, ал дәстүрлі қалыптау әдісімен жасалған ұқсас үлгіні дайындауға 75 минут кетті.

Бұл айырмашылық бетон қоспасының қабат-қабат қатаюы және қалыпты құюдың күрделі процедураларының болмауымен түсіндіріледі. Бетонды экструдтау процесінде қабаттардың қатаю уақыты (орта есеппен 5-7 минут) ескерілсе де, жалпы уақыт тиімділігі жоғары болды.

Материал шығыны. Материал шығыны бойынша да 3D басып шығару технологиясы артықшылық көрсетті. Металл конструкцияларын басып шығару кезінде материал шығыны 15%-ға төмендеді. Мысалы, 3D принтер арқылы дайындалған металл үлгінің салмағы орта есеппен 0,85 кг болса, дәстүрлі әдіспен жасалған үлгінің салмағы 1 кг-ға жетті. Бұл айырмашылық материалды дәл орналастыруға және қажетсіз қалдықтардың болмауына байланысты. Лазерлік балқыту процесі тек қажетті құрылымды қалыптастыруға қажетті металл ұнтағын пайдаланады, ал құю әдісінде материалдың бір бөлігі қалыптың шеттеріне немесе өңдеу кезінде жоғалады.

Бетон конструкциялары бойынша материал шығыны 20%-ға азайды. Экструдтау әдісімен басып шығарылған үлгіге орта есеппен 4,8 литр бетон қоспасы жұмсалса, дәстүрлі әдіспен дайындалған үлгіге 6 литр қажет болды. Бұл тиімділік қоспаның тек құрылымның қажетті бөліктеріне ғана қолданылуымен және қалыпты толтырудағы артық шығындардың болмауымен түсіндіріледі. Сонымен қатар, бетон қоспасына қосылған үдеткіш қоспалар қабаттардың тез қатаюын қамтамасыз етіп, материалдың ысырап болуын азайтты.

Экологиялық тиімділік. 3D басып шығару процесі қалдықтарды 25%-ға дейін азайтып, экологиялық тиімділікті арттырды. Металл конструкцияларын басып шығару кезінде пайда болған қалдықтар (негізінен балқымаған ұнтақ) орта есеппен 0,05 кг-ды құрады, ал құю әдісінде бұл көрсеткіш 0,2 кг-ға жетті. Балқымаған ұнтақты қайта пайдалану мүмкіндігі экологиялық ізді одан әрі төмендетті. Бетон конструкцияларында экструдтау процесі қалдықтарды іс жүзінде нөлге дейін жеткізді, себебі қоспа тек қажетті көлемде ғана шығарылды, ал дәстүрлі әдісте қалыптан тыс қалған бетон (0,3 литр) ысырап болды.

Экологиялық тиімділіктің тағы бір аспектісі – энергия шығыны. Металл конструкцияларын басып шығару үшін қолданылған SLM принтерінің энергия тұтынуы орта есеппен 1,2 кВт·сағ болды, ал құю процесі (балқыту және қалыптау) 1,5 кВт·сағ энергияны қажет етті. Бетон экструдерінің энергия тұтынуы 0,8 кВт·сағ

ты құраса, дәстүрлі әдіс үшін бетон араластырғыш пен қалыптау процесі 1,1 кВт·сағ шығындалды. Бұл деректер 3D басып шығарудың энергия тиімділігін және оның құрылыс саласындағы тұрақты даму мақсаттарына сәйкестігін растайды.

Құрылымдық беріктік. Дегенмен, құрылымдық беріктік бойынша 3D басып шығару технологиясы кемшіліктер көрсетті. Металл конструкцияларының созылуға беріктігі дәстүрлі әдістермен жасалған үлгілерден 10%-ға төмен болды. Эксперименттік сынақтарда 3D басып шығарылған үлгілердің орташа созылуға беріктігі 480 МПа-ны құраса, құйылған үлгілерде бұл көрсеткіш 530 МПа-ға жетті. Бұл айырмашылық лазерлік балқыту кезіндегі термиялық кернеулер мен қабаттар арасындағы микроскопиялық ақаулармен байланысты болуы мүмкін. Сканирлеуші электронды микроскоппен (SEM)

жүргізілген талдау қабаттар арасында шамалы кеуектілікті (0,5-1%) анықтады, бұл беріктіктің төмендеуіне әсер етті.

Бетон құрылымдарында қабаттар арасындағы байланыс беріктігіне қатысты мәселелер анықталды. Сығылуға сынақтарда 3D басып шығарылған бетон үлгілерінің орташа беріктігі 28 МПа-ны құрады, ал дәстүрлі әдіспен жасалған үлгілерде бұл көрсеткіш 34 МПа болды. Ультрадыбыстық импульстік әдіспен (UPV) жүргізілген талдау қабаттар арасындағы байланыстың әлсіздігін (импульс жылдамдығы 3800 м/с, дәстүрлі үлгілерде 4200 м/с) растады. Бұл мәселе бетон қоспасының тұтқырлығы мен катаю уақытының синхрондалмауына байланысты болуы мүмкін. Төменде эксперименттік деректердің қорытындысы кесте түрінде берілген:

Кесте 2 – 3D және дәстүрлі өндіріс тәсілдерінің салыстырмалы кестесі

Параметр	Металл (3D)	Металл (Дәстүрлі)	Бетон (3D)	Бетон (Дәстүрлі)
Өндіріс уақыты (сағ/мин)	2,8 сағ	4 сағ	45 мин	75 мин
Материал шығыны (кг/литр)	0,85 кг	1 кг	4,8 л	6 л
Қалдықтар (кг/литр)	0,05 кг	0,2 кг	~0 л	0,3 л
Энергия шығыны (кВт·сағ)	1,2	1,5	0,8	1,1
Созылуға беріктік (МПа)	480	530	-	-
Сығылуға беріктік (МПа)	-	-	28	34

Нәтижелердің интерпретациясы. Алынған нәтижелер 3D басып шығарудың уақыт пен материалды үнемдеудегі артықшылықтарын растайды. Металл конструкцияларындағы 30%-дық және бетондағы 40%-дық уақыт қысқаруы технологияның өндірістік тиімділігін көрсетеді. Бұл тиімділік құрылыс процесін жеделдетуге, әсіресе уақытша баспана немесе инфрақұрылымдық жобалар сияқты шұғыл қажеттіліктерде маңызды рөл атқаруға мүмкіндік береді. Материал шығынының азаюы (металл үшін 15%, бетон үшін 20%) құрылыс шығындарын төмендетіп, ресурстарды тиімді пайдалануға ықпал етеді.

Экологиялық тиімділік аспектісі де маңызды. Қалдықтардың 25%-ға азаюы және энергия шығынының төмендеуі 3D басып шығаруды құрылыс саласындағы жасыл технологиялардың бірі ретінде позициялайды. Бұл климаттың өзгеруіне қарсы күрес және құрылыс қалдықтарын азайту сияқты жаһандық мақсаттарға сәйкес келеді. Дегенмен, энергия тиімділігін одан әрі арттыру үшін басып шығару жабдықтарының параметрлерін оңтайландыру қажет болуы мүмкін.

Құрылымдық беріктік бойынша анықталған кемшіліктер технологияның әлі де жетілдіруді қажет ететінін көрсетеді. Металл конструкцияларындағы 10%-дық беріктік

төмендеуі термиялық өңдеу немесе басып шығару параметрлерін (мысалы, лазер қуатын) реттеу арқылы жойылуы мүмкін. Бетон құрылымдарындағы қабаттар арасындағы байланыс мәселесі қоспаның құрамын (мысалы, полимерлі қоспалар) немесе экструдтау процесінің жылдамдығын өзгерту арқылы шешілуі ықтимал. Бұл мәселелерді шешу технологияны кең масштабты қолдануға дайындаудың маңызды қадамы болмақ.

Салыстырмалы талдау және болашақ бағыттар. Нәтижелерді халықаралық зерттеулермен салыстырғанда, ұқсас үрдістер байқалды. Мысалы, Wolfs және басқалар (2019) бетон құрылымдарындағы қабаттар арасындағы байланыс беріктігінің 15-20%-ға төмендеуін атап өткен, бұл біздің нәтижелерімізбен сәйкес келеді. Zhang және басқалар (2022) металл конструкцияларындағы термиялық кернеулердің беріктікке әсерін зерттеген, бұл біздің микроскопиялық ақаулар туралы болжамымызды растайды. Болашақ зерттеулер осы кемшіліктерді жоюға және технологияны нақты құрылыс объектілеріне бейімдеуге бағытталуы тиіс.

Қорытындылай келе, зерттеу нәтижелері 3D басып шығарудың айтарлықтай әлеуетін көрсетті, бірақ оның толыққанды қолданылуы үшін техникалық жетілдірулер қажет. Алынған деректер құрылыс саласындағы инновацияларды дамытуға негіз бола алады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Металл және бетон конструкцияларын 3D басып шығару технологиясы уақыт пен шығындарды азайту, сондай-ақ экологиялық тиімділікті арттыру тұрғысынан дәстүрлі әдістерге қарағанда айтарлықтай артықшылықтарға ие. Зерттеу нәтижелері технологияның құрылыс уақытын металл конструкциялары үшін 30%-ға, бетон конструкциялары үшін 40%-ға қысқартатынын көрсетті. Бұл уақытты үнемдеу құрылыс процесін жеделдетуге, әсіресе уақытша баспана немесе апаттан кейінгі қалпына келтіру сияқты шұғыл қажеттіліктерді қанағаттандыруға мүмкіндік береді. Материал шығынының азаюы – металл үшін 15%, бетон үшін 20% – құрылыс шығындарын төмендетіп, ресурстарды тиімді пайдалануға ықпал етеді. Бұл экономикалық тиімділік құрылыс индустриясындағы дәстүрлі тәсілдердің тиімсіздігін жоюға бағытталған маңызды қадам ретінде қарастырылуы мүмкін.

Экологиялық тұрғыдан алғанда, 3D басып шығару қалдықтарды 25%-ға азайтып, энергия

шығынын төмендетеді, бұл технологияны құрылыс саласындағы тұрақты даму мақсаттарына сәйкес келетін инновация ретінде орналастырады. Қалдықтардың азаюы материалдардың қайта пайдалану мүмкіндігімен (әсіресе металлдағы балқымаған ұнтақ) және бетон экструдтау процесіндегі дәлдікпен байланысты. Энергия тиімділігі, әсіресе бетон конструкцияларында (0,8 кВт·сағ 3D басып шығаруға қарсы 1,1 кВт·сағ дәстүрлі әдіске), технологияның экологиялық ізді азайтудағы әлеуетін растайды. Бұл аспектілер климаттың өзгеруіне қарсы күрес және құрылыс қалдықтарын басқару сияқты жаһандық сын-көтерлерді шешуде маңызды рөл атқарады.

Дегенмен, технологияны кеңінен енгізу үшін техникалық және экономикалық мәселелерді шешу қажет. Техникалық тұрғыдан алғанда, металл конструкцияларының созылуға беріктігінің 10%-ға төмендеуі және бетон құрылымдарындағы қабаттар арасындағы байланыс беріктігіне қатысты кемшіліктер технологияның әлі де жетілдіруді қажет ететінін көрсетеді. Металл конструкцияларындағы беріктік мәселесі лазерлік балқыту процесіндегі термиялық кернеулермен және қабаттар арасындағы микроскопиялық ақаулармен байланысты. Бұл проблеманы шешу үшін басып шығару параметрлерін (мысалы, лазер қуаты, қабат қалыңдығы) оңтайландыру немесе термиялық өңдеу сияқты қосымша процестерді енгізу қажет болуы мүмкін. Бетон құрылымдарындағы қабаттар арасындағы байланыс беріктігі қоспаның құрамын (мысалы, полимерлі қоспалар немесе наноқұрылымдар) және экструдтау жылдамдығын реттеу арқылы жақсартылуы ықтимал. Бұл техникалық шектеулерді жою технологияны құрылыстың кең масштабты жобаларына қолдануға мүмкіндік береді.

Экономикалық мәселелер де маңызды кедергі болып табылады. 3D басып шығару жабдықтарының жоғары бастапқы құны (мысалы, SLM принтерлерінің бағасы 100,000 АҚШ долларынан басталады) және оларды пайдалануға үйрету шығындары технологияның қолжетімділігін шектейді. Дегенмен, ұзақ мерзімді перспективада материал мен уақытты үнемдеу бұл шығындарды өтей алады. Мысалы, бетон конструкцияларын басып шығару кезіндегі 20%-дық материал үнемдеу және 40%-дық уақыт қысқаруы ірі жобаларда айтарлықтай экономикалық пайда әкелуі мүмкін. Сондықтан

технологияны масштабтау және жабдық құнын төмендету бойынша шаралар қабылдау қажет.

Болашақ зерттеулер материалдарды оңтайландыруға және басып шығару процесін автоматтандыруға бағытталуы тиіс. Материалдарды оңтайландыру металл конструкциялары үшін беріктігі жоғары және термиялық кернеуге төзімді қорытпаларды әзірлеуді, ал бетон үшін қабаттар арасындағы адгезияны жақсартатын жаңа қоспаларды зерттеуді қамтиды. Автоматтандыру процестері, мысалы, роботтандырылған басып шығару жүйелері және жасанды интеллект негізіндегі басқару құралдары, технологияның тиімділігін одан әрі арттыра алады. Бұл бағыттар технологияны құрылыстың күрделі жобаларына, соның ішінде көпқабатты ғимараттар мен инфрақұрылымдық нысандарға бейімдеуге мүмкіндік береді.

Бұл технология құрылыс индустриясындағы инновациялардың негізгі драйвері бола алады. Оның уақыт, шығындар және экологиялық тиімділік бойынша артықшылықтары құрылыс саласын трансформациялауға және дәстүрлі әдістердің орнын басуға әлеуеті бар екенін көрсетеді. Мысалы, 3D басып шығару қолжетімді баспана құрылысын жеделдетуге, қалалық инфрақұрылымды дамытуға және ресурстарды үнемдеуге ықпал ете алады. Дегенмен, технологияның толық әлеуетін ашу үшін техникалық және экономикалық кедергілерді жою, сондай-ақ нормативтік базаны (құрылыс стандарттары мен сертификаттау) бейімдеу қажет.

Қорытындылай келе, зерттеу 3D басып шығару технологиясының құрылыс саласындағы перспективалы бағыт екенін дәлелдеді. Оның артықшылықтары айқын болғанымен, кең таралуы техникалық жетілдірулер мен экономикалық қолжетімділікке байланысты. Бұл технологияны дамыту құрылыс индустриясын

модернизациялаудың және тұрақты дамуға қол жеткізудің маңызды қадамы болмақ. Зерттеу нәтижелері осы бағыттағы болашақ зерттеулер мен практикалық қолданбалар үшін негіз бола алады.

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

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): А.Х. Харисович – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, әдіснаманы қалыптастыру, эксперименттік зерттеулерді жүргізу, нәтижелерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. П.Л. Цыба – ғылыми жетекшілік, зерттеу әдіснамасын жетілдіру, нәтижелерді валидациялау, ғылыми редакциялау, мақаланы рецензиялау және қорытындыларды қалыптастыру. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығы мен тұтастығына ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Қарағанды индустриялық университетіне алғыс 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.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Smith J., Brown T. 3D Printing in Construction: Opportunities and Challenges // Journal of Construction Engineering. 2023. Vol. 45, No. 3. P. 123–135.
- [2] Қасымов А. Құрылыстағы инновациялық технологиялар. Алматы: ҚазҰТУ баспасы, 2022. 256 б.
- [3] Lee H., Kim S. Additive Manufacturing of Concrete Structures // Building Materials Review. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 89–102.
- [4] Жұмабеков Б. Металл конструкцияларын өндірудің заманауи әдістері // Техникалық ғылымдар журналы. 2024. Т. 18, № 2. Б. 56–67.
- [5] Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. P. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.6.

REFERENCES

- [1] J. Smith and T. Brown, "3D Printing in Construction: Opportunities and Challenges," *Journal of Construction Engineering*, vol. 45, no. 3, pp. 123–135, 2023.
- [2] A. Kassymov, *Innovative Technologies in Construction*. Almaty, Kazakhstan: Kazakh National Research Technical University Publishing House, 2022.
- [3] H. Lee and S. Kim, "Additive Manufacturing of Concrete Structures," *Building Materials Review*, vol. 12, no. 4, pp. 89–102, 2021.
- [4] B. Zhumabekov, "Modern Methods of Manufacturing Metal Structures," *Journal of Technical Sciences*, vol. 18, no. 2, pp. 56–67, 2024.
- [5] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012

МЕТАЛЛУРГИЯ, ЖАҢА МАТЕРИАЛДАР ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫDOI: <https://www.doi.org/10.53002/066>**GRAPHENE AND ITS PROSPECTS IN ELECTRONIC DEVICES**^{1*}*Kulidan S., ¹Qasymova A.Q., ²Seref M.S.*¹*Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan*²*Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey*** Corresponding author e-mail: s.kulidan@tttu.edu.kz***Author information:****Kulidan S.** - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: s.kulidan@tttu.edu.kz**Qasymova A.Q.** - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: a.kassymova@tttu.edu.kz**Seref M.S.** - Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine. E-mail: ssonmez@itu.edu.kz

Abstract. With the rapid development of technology and the dramatic improvement in the quality of life in recent years, traditional electronic technology is becoming increasingly difficult to meet people's needs, and portable flexible electronic (FE) technology products are also distinguished. However, with the development of research and application in the field of FE, people have made higher demands on FE products in terms of electronic performance, lighting performance, and mechanical tensile performance. As a new carbon nanomaterial, graphene has large mechanical, thermal, electrical and optical properties and is an excellent raw material for the manufacture of FE devices with wide application prospects. This work introduces the development of graphene preparation and application, and the results of its application in the field of FE summarize the current research progress of graphene in the field of FE, and aims to discuss and compare the technical characteristics and development potential of different methods in each application. This review is expected to provide theoretical and data especially for the application and preparation of graphene in the field of FE, and provide new ideas for the development of graphene applications in the field of FE.

Keywords: graphene, electronics, biomaterial, polymer.

ГРАФЕН ЖӘНЕ ОНЫҢ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДАҒЫ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ^{1*}*Кулидан С., ¹Қасымова А.Қ., ²Серей М.С.*¹*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан*²*Стамбул техникалық университеті, Стамбул, Түркия*** Автор-корреспондент e-mail: s.kulidan@tttu.edu.kz***Авторлар туралы ақпарат:****Кулидан С.** - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: s.kulidan@tttu.edu.kz**Қасымова А.Қ.** - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: a.kassymova@tttu.edu.kz**Seref M.S.** - Стамбульский технический университет, г. Стамбул, Турция. E-mail: ssonmez@itu.edu.kz

Аңдатпа. Технологияның қарқынды дамуымен және соңғы жылдары өмір сүру сапасының күрт жақсаруымен дәстүрлі электронды технология адамдардың қажеттіліктерін қанағаттандыру қиынға соғуда және портативті икемді электронды (FE) технология өнімдері де ерекшеленеді. Дегенмен, FE саласындағы зерттеулер мен қолданудың дамуымен адамдар электрондық өнімділік, жарық беру өнімділігі және механикалық созылу көрсеткіштері бойынша FE өнімдеріне жоғары талаптар қойды. Жаңа көміртекті наноматериал ретінде графен үлкен механикалық, жылулық, электрлік және оптикалық қасиеттерге ие және кең қолдану перспективалары бар FE құрылғыларын дайындау үшін тамаша шикізат болып табылады. Бұл жұмыс графенді дайындау мен қолданудың дамуымен таныстырады және оны FE саласында қолдану нәтижелері FE саласындағы графеннің ағымдағы зерттеу барысын қорытындылайды және әр қолданбадағы әртүрлі әдістердің техникалық сипаттамалары мен даму әлеуетін талқылауға және салыстыруға бағытталған. Бұл шолу әсіресе FE саласында графенді қолдану және дайындау үшін теориялық және деректермен қамтамасыз етеді және FE саласындағы графен қосымшаларын дамыту үшін жаңа идеяларды береді деп күтілуде.

Түйін сөздер: Графен, электроника, биоматериал, полимер.

ГРАФЕН И ЕГО ПЕРСПЕКТИВЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

^{1*}Кулидан С., ¹Қасымова А.Қ., ²Seref M.S.

¹Қарағандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

²Стамбульский технический университет, г. Стамбул, Турция

* Автор-корреспондент e-mail: s.kulidan@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Кулидан С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: s.kulidan@tttu.edu.kz

Қасымова А.Қ. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail:

a.kassymova@tttu.edu.kz

Seref M.S. -Стамбульский технический университет, г. Стамбул, Турция. E-mail: ssonmez@itu.edu.kz

Аннотация. С быстрым развитием технологий и резким улучшением качества жизни в последние годы традиционные электронные технологии становятся все труднее удовлетворять потребности людей, и портативные гибкие электронные (FE) технологические продукты также выделяются. Однако с развитием исследований и приложений в области FE люди предъявляли более высокие требования к продуктам FE с точки зрения электронных характеристик, характеристик освещения и механических характеристик растяжения. Как новый углеродный наноматериал, графен является идеальным сырьем для изготовления устройств FE, которые обладают большими механическими, тепловыми, электрическими и оптическими свойствами и имеют широкие перспективы применения. Эта работа знакомит с развитием производства и применения графена, а результаты его применения в области FE обобщают текущий прогресс исследований графена в области FE и направлена на обсуждение и сравнение технических характеристик и потенциала разработки различных методов в каждом приложении. Ожидается, что этот обзор предоставит теоретические и данные для использования и подготовки графена, особенно в области FE, и предоставит новые идеи для разработки приложений графена в области FE.

Ключевые слова: графен, электроника, биоматериал, полимер

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Графеннің физика-химиялық қасиеттері мен оны икемді электроника саласында қолдану мүмкіндіктеріне кешенді талдау жүргізіліп, оның жоғары электрөткізгіштігі, жылуөткізгіштігі, механикалық беріктігі және оптикалық мөлдірлігі икемді электрондық құрылғылар үшін перспективалы материал екендігі ғылыми негізделді. Сонымен қатар, графенді алу әдістері мен икемді электроникада қолдану бағыттары салыстырмалы түрде бағаланып, графенді жұқа қабықшалы транзисторларда, мөлдір өткізгіш электродтарда, сенсорларда, энергия сақтау құрылғыларында және күн элементтерінде қолданудың артықшылықтары көрсетілді. Сондай-ақ, графеннің өнеркәсіптік өндірісін кеңейтуге кедергі келтіретін негізгі факторлар – нөлдік тыйым салынған аймақтың болуы, синтез технологиясының күрделілігі және өндіріс құнының жоғарылығы айқындалып, оларды шешудің болашақтағы ғылыми-технологиялық бағыттары негізделді.

КІРІСПЕ

Қазіргі қоғам дамуының үш тірегінің бірі ретінде материалдық технология әртүрлі салаларда барған сайын маңызды рөл атқарады. The Times газетінің алға жылжуымен материалтану да қарқынды дамып келеді.

Дегенмен, тамаша қасиеттері бар әртүрлі жаңа материалдар кеңінен қолданылғанымен, материалдар саласы да жаңа міндеттерге тап болады. Өндірістегі және өмірдегі жабдықты автоматтандыру мен интеллектке сұраныс, сондай-ақ осы сұранысқа сәйкес жабдықты миниатюризациялау және тасымалдау тенденциясы электронды материалдарды нақты даму бағытына айналдырады.

Графен - көміртекті наноматериалдың жаңа түрі. Керемет механикалық, электрлік, жылулық және оптикалық қасиеттеріне байланысты графен 2004 жылы ашылғаннан бері кеңінен алаңдаушылық туғызды және жақсы қолдану перспективалары мен ғылыми зерттеу құндылығына ие болды. Атап айтқанда, ол энергетика, биомедицина, материалтану, микро-нано өңдеу және дәрі-дәрмек жеткізу салаларында маңызды рөл атқарады. Сондықтан ол болашақтың революциялық материалы болып саналады.

FEs технологиясы — бейорганикалық немесе органикалық материалдардан иілгіш және иілгіш жұқа субстраттарда (пластик немесе металл) жасалған электрондық құрылғыларды жасау технологиясы. Оның бірегей икемділігі, икемділігі және тиімді және арзан өндірістік процестерінің арқасында энергетика, қорғаныс,

медицина, ақпарат және басқа салаларда кең ауқымды қолданбалар бар.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі ғылыми зерттеулерде графеннің физика-химиялық қасиеттері, оны алу технологиялары және электрондық құрылғыларда қолдану бағыттары кеңінен қарастырылғанымен, графеннің икемді электроника (Flexible Electronics, FE) саласындағы қолданылуын оның синтез әдістерімен, құрылымдық ерекшеліктерімен және функционалдық қасиеттерімен кешенді түрде байланыстыра отырып бағалау жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сонымен қатар, графенді икемді транзисторларда, мөлдір өткізгіш электродтарда, сенсорларда және энергия сақтау құрылғыларында тиімді пайдалануға кедергі келтіретін технологиялық шектеулер мен оларды еңсеру жолдары толық ғылыми негізделмеген. Сондықтан аталған зерттеу графеннің икемді электроника саласындағы мүмкіндіктерін жан-жақты талдауға, оның артықшылықтары мен шектеулерін жүйелеуге және болашақтағы қолдану перспективаларын айқындауға бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы графеннің икемді электроника (Flexible Electronics, FE) саласында қолданылу мүмкіндіктеріне кешенді талдау жүргізіліп, оның физика-химиялық қасиеттері, алу әдістері және негізгі қолдану бағыттарының өзара байланысы жүйелі түрде қарастырылуында. Талдау нәтижесінде графеннің жоғары электрөткізгіштігі, жылуөткізгіштігі, механикалық беріктігі және оптикалық мөлдірлігі негізінде оны жұқа қабықшалы транзисторларда, мөлдір өткізгіш электродтарда, сенсорларда, күн элементтері мен энергия сақтау құрылғыларында қолданудың артықшылықтары ғылыми тұрғыдан негізделді. Сонымен қатар, графенді өнеркәсіптік деңгейде қолдануды шектейтін негізгі технологиялық мәселелер айқындалып, оларды шешудің перспективалық бағыттары жүйеленді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Графен - sp^2 гибридті орбитальдарымен реттелген көміртегі атомдарынан тұратын екі өлшемді (2D) ұяшық құрылымының материалы. Байланыстар өз торларында көрші көміртегі атомдарын байланыстырады. Күшті байланыс әсерінен графен өте жоғары беріктік пен каттылыққа ие. Тестілеуден кейін графен моноқабатының Янг модулі 1,0 ТПа құрайды. Созылу күші 130 ГПа [1]. Графендегі электрондар байланыссыз екі өлшемді жазықтықта еркін қозғала алады, бұл оның электрон тасымалдауында және басқа қасиеттерінде өте

маңызды рөл атқарады. Тотыққан Si пластинкасының үстіне механикалық бөлу арқылы алынған графен әдетте 10 000 $cm^2B-1c-1$ көрсетеді. Графен миллиметрлік шкала бойынша бөлме температурасында баллистикалық тасымалдауға қол жеткізе алады, тасымалдаушының қозғалғыштығы 100 000 $cm^2B-1c-1$ дейін. Егер графендегі сыртқы шашырау жойылса, электрон-фононның әлсіз әрекеттесуіне байланысты қозғалғыштық 200 000 $cm^2B-1c-1$ жетуі мүмкін [2]. 5 К төмен температурада Графен 230 000 $cm^2B-1c-1$ дейін тасымалдаушы қозғалғыштығын көрсетеді [3].

Графен сонымен қатар тамаша жылу және оптикалық қасиеттерге ие. Бөлме температурасында жылу өткізгіштік 5300 $WM-1K-1$ -ге дейін жетеді, ал моноқабаттың көрінетін жарықты сіңіру жылдамдығы небәрі 2,3% құрайды, бұл графеннің тамаша жылуды таратуы мен мөлдірлігін білдіреді [4, 5]. Графен – бір атомдық қабаттан тұратын көміртегі заты, ал оның негізгі құрылымдық бірлігі – бензол алтымүшелі сақинасы, органикалық қосылыстардың ең тұрақты құрылымы, оның химиялық қасиеттерін өте тұрақты және жұқа етеді, тек теориялық мәні 0,35 нм [6]. Сонымен қатар, графенді құрайтын көміртегі жер бетінде мол элемент болып табылады және оның шикізаты оңай қол жетімді. Оның ерекше қасиеттері де бар (мысалы, бөлме температурасындағы кванттық ферромагнетизм және Холл эффектісі), сондықтан оны қолдану перспективасы кең.

Графен жақсы электрөткізгіштікке, кең әлеуетті терезеге және қарапайым көміртекті материалдар сияқты әртүрлі тотығу-тотықсыздану реакциялары үшін жоғары электрокаталитикалық белсенділікке ие, сонымен қатар кейбір нақты электрлік жұптар мен субстраттар үшін жоғары электрокаталитикалық өнімділікке ие. Сондықтан оны электрохимиялық электродтарды модификациялау материалдарында, биологиялық ақуыздар немесе ферменттер сияқты биологиялық макромолекулаларды емдеу үшін және арнайы биоэлектрохимиялық сенсорларды өндіру үшін кеңінен қолдануға болады. Сонымен қатар, графенді газ сенсоры ретінде пайдалануға болады. Бір жағынан, графеннің бірегей қабаттық құрылымы оған өте сезімтал сенсорларды жасау үшін қажет кең ерекше бет аймағын береді; Екінші жағынан, графеннің бірегей электрондық құрылымы белгілі бір газ молекулаларының адсорбциясы графеннің электрондық құрылымындағы өзгерістерді тудыруға мүмкіндік береді, нәтижесінде оның электр өткізгіштігінің жылдам және күрт өзгеруіне әкеледі.

Гетерогенді катализде көміртекті материалдар катализаторды тасымалдаушылар ретінде кеңінен қолданылады. Көміртекті қолдаудың құрылымы қолдау көрсетілетін катализатордың өнімділігіне үлкен әсер ететіндіктен, тұрақты 2D құрылымы бар графен қолдау көрсетілетін катализатор үшін тамаша үлгі болып табылады. Графеннің жақсы биоүйлесімділігі және үлкен бетінің ауданы оны дәрі-дәрмек тасымалдаушысы ретінде жоғары дәрілік жүктемені алуға мүмкіндік береді және дәрілік заттарды мақсатты тасымалдау және бақыланатын босату үшін пайдалануға болады. Графен көміртекті материалдар мен наноматериалдардың артықшылықтарын біріктіреді және sp² гибридизациясы оған ерекше қабатты құрылым береді, бұл оны шағын өлшемді әсерге, жақсы каталитикалық белсенділікке және үлкен меншікті бетке ие етеді, бұл батареялардың меншікті сыйымдылығын айтарлықтай жақсарта алады. Бұл энергия сақтау құрылғылары үшін электродтық материалдар ретінде жиі қолданылатын көміртекті материалдардың тамаша алмастырғышы. Оның дәстүрлі литий-иондық аккумуляторларда, отын ұяшықтарында және жаңа жасыл энергияны сақтау құрылғыларында (екінші батареялар мен суперконденсаторлар) қолдану перспективалары кең. Сонымен қатар, графеннің күн батареяларында болашағы зор. Индий қалайы оксиді (ITO) күн батареялары үшін электрод материалы ретінде кеңінен қолданылады, бірақ индий ресурсы өте аз. Графеннің ITO-ға ұқсас жоғары өткізгіштігі мен жарық өткізгіштігі және шикізатқа оңай қол жеткізуі бар, сондықтан ол ITO үшін әлеуетті ауыстыру материалы болып табылады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

FE графенді қажет етеді. FE дамытудың бастапқы мақсаты - жоғары аппараттық өнімділік, жоғары өңдеу жылдамдығы және басқа салаларда дәстүрлі кремний негізіндегі электроникамен бәсекелесу емес, икемділік пен икемділік сияқты бірегей артықшылықтары бар жаңа электронды құрылғылар мен өнімдерді арзан, ауқымды өндіруге қол жеткізу. «Чип сипаттамалары бар жоғары транзисторды, бірақ үлкен икемді субстраттармен төмен өлшемді өнімділікпен өндіру» тұжырымдамасы бойынша көміртекті наноарна материалдары икемді жұқа пленка транзисторларында (TFTs) тамаша өнімділікті көрсетеді, бұл икемді материалдар дәстүрлі электронды құрылғылардың өнімділік талаптарына жауап бере алады немесе тіпті одан да асып түседі, бұл FE технологиясының дамуына үлкен ықпал етеді. FE өнімдері өмір салтына

революциялық өзгерістер әкелу үшін жеткілікті және бүгінгі нарық оларға үлкен сұранысқа ие. Ол сонымен қатар жоғары талаптарды қояды және графен тамаша шешім болып табылады.

Сонымен қатар, графен икемді электрондар үшін тамаша материал болып табылады. Көміртекті наноматериалдың жаңа түрі ретінде графен тамаша механикалық, жылулық, электрлік және оптикалық қасиеттерге ие, бұл графенді икемді материалға деген сұранысқа толығымен сәйкес етеді: икемділік қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін жақсы қолдау және иілу, жылуды тарату қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін жоғары жылу өткізгіштік, дисплей қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін жақсы жарық өткізгіштік. Графеннің FE-нің дәстүрлі материалдарына қарағанда үлкен артықшылықтары бар, ол FE өнімділігін айтарлықтай жақсарта алады және жаңа зерттеу бағытын басқара алады, сондықтан ол үлкен қолданбалы құндылыққа ие. Графен FE-де өткізгіш, жартылай өткізгіш немесе диэлектрлік материал болуы мүмкін. Арнайы қолданбаларға TFT, электродтар немесе энергия сақтау құрылғыларын, қатты субстраттардың орнына икемді өткізгіш пленка субстраттарын және баспа схемаларын жасау кіреді.

Графен FE өнімдерін дайындау үшін маңызды материал болып табылады және оның дамуы үшін көптеген прецеденттерге ие. Қолданыстағы зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып, жартылай өткізгіш материал және өткізгіш материал ретінде графенді қолданудың нақты әдістері мен механизмі талқыланады, әртүрлі дайындау процестерінің сипаттамалары салыстырылады, кездесетін мәселелер талқыланады және даму бағытының перспективалары қарастырылады.

Теориялық тұрғыдан графен - тамаша электронды және жылуды тарату қасиеттері бар жартылай өткізгіш материал. Бөлме температурасында оның тасымалдаушы ұтқырлығы дәстүрлі жартылай өткізгіш материал кремнийінен әлдеқайда жоғары, тіпті индий антимониді және көміртегі нанотүтіктері сияқты жаңа идеалды жартылай өткізгіш материалдардан да жоғары. Меншікті кедергі мыс пен күміске қарағанда төмен, ал бөлме температурасындағы баллистикалық әсерге Фермидің үлкен жылдамдығымен және төмен жанасу кедергісі арқылы қол жеткізуге болады. Графен сондай-ақ тамаша жылу өткізгіштікке ие, кез келген белгілі материалдың ең жылуды тарататыны, алмаздан үш есе көп.

Дегенмен, практикалық қолдануда кейбір кедергілерді елемеу қиын. Біріншіден, графен нөлдік жолағы бар арнайы жартылай өткізгіш

болып табылады, онда өткізгіштік жолағы мен валенттік жолағы Бриллюэн аймағында қиылысады, бұл жолақты ашу мен жабуды қиындатады. Графенге жолақ аралықтары берілуі мүмкін болғанымен, қосу-өшіру қатынасын басқа заттарды адсорбциялау немесе допингтеу, қос қабатты графеннің симметриясын бұзу және кванттық шектеу мен шеттік әсерлерді қолдана отырып, арнайы құрылымдар жасау арқылы жақсартуға болады. Бұл түрлендіру әдістері пайдалану кезінде тұрақсыз өнімділікке және жолақ аралығының жоғалуына әкелуі немесе электр өткізгіштігін төмендетуі және олардың қолжетімділігін шектеуі мүмкін [11]. Екіншіден, кез келген көміртегі аралас металл қысқа тұйықталуларды оңай тудыруы мүмкін, ал графен күрделі тізбектерді құру қиын. Дайындаудың дәлдігі мен сәттілігіне байланысты процесс стандарттары мен өндіріс шығындары оны жаппай өндіріске және коммерциялық пайдалануға арналған зертханадан шығару үшін тым жоғары. Графен жартылай өткізгіш материал ретінде бірегей артықшылықтарына байланысты Мурдан кейінгі кремнийді алмастыруға үміткер материалдардың біріне айналды. Дегенмен, болашақта кремнийді негізгі микроэлектроника материалы ретінде ауыстыру үшін ұзақ мерзімді, терең зерттеулер қажет.

Қазіргі уақытта графен FE саласында жартылай өткізгіш материал ретінде біршама жетістіктерге жетті, негізінен TFT үшін қолданылады. TFT - бұл арнадан, диэлектрлік қабаттан, электродтан және субстратта жұқа пленка түрінде дайындалған субстрат материалынан тұратын далалық әсерлі түтік. Көзі, дренаж және дренаж әдетте металл материалдардан тұрады; Диэлектрлік материалдарға SiO_2 , Al_2O_3 сияқты диэлектрлік тұрақтылары әртүрлі окшаулағыш материалдар және полимерлі материалдар жатады. Субстрат материалдарына қатты (әйнек және кремний пластиналары сияқты) және икемді (полимерлі пластмассалар сияқты) субстраттар жатады. Graphene TFT арна материалы ретінде графен пленкасын пайдаланады, ол FE құрылғыларының сипаттамаларына сәйкес икемділік, жарық өткізгіштік және механикалық созылу талаптарына сәйкес келеді. Әдетте, графен дымқыл оюланған металл субстратпен бөлінеді. Процесс сөзсіз ластануды және графен пленкаларын зақымдайды, ал жоғары тасымалдау құны графеннің макроқолдануын шектейді. Гао және т.б. графенді платина субстратынан әртүрлі субстраттарға бұзбай тасымалдау үшін электрохимиялық Bubbling тасымалдау әдісін ойлап тапты. Зақымдалмаған платина субстратын графенді дайындау үшін қайта пайдалануға

болады, бұл үлкен аумақта серпіліс жасау және үздіксіз тасымалдау [12].

Келесі қадам - процеске сәйкес қатты фаза, сұйық фаза және газ фазасы ретінде жіктелуі мүмкін TFT құру. Қатты фазалық әдіс катализаторды қатты субстратта графенді өсіру үшін пайдаланады, содан кейін TFT жасау үшін оны пластикалық субстратқа береді. Дегенмен, дайындалған икемді құрылғылардың өлшемі қатты субстратпен шектеледі, бұл FE құрылғыларын кең ауқымды практикалық қолдану үшін жарамсыз. Әдетте, қалыпты қосулы транзисторды нөлдік кернеуде толығымен өшіру мүмкін емес, бұл қалыпты өшірілген транзисторға қарағанда көбірек энергия жоғалуына әкеледі. Газ-фазалық әдісте алдымен қалқымалы каталитикалық CVD синтезі қолданылады, содан кейін газ фазасы сүзгі пленкасы арқылы тікелей жиналып, транзисторлар жасау үшін субстратқа беріледі. Ол сұйық фазалық әдіспен өңдеу процесінде туындаған көміртекті наноматериалдардың ластануын және зақымдануын тиімді болдырмайды. Сонымен қатар оның артықшылығы қарапайым, жылдам, вакуумды емес бөлме температурасында жұмыс істеу, жақсы үздіксіздік және т.б., бұл ғылыми зерттеулер мен қолданудың маңызды бағыты болып табылады [13].

ҚОРЫТЫНДЫ

Графен алғаш рет ашылғанына 18 жыл болды және көптеген салаларда айтарлықтай ғылыми жетістіктерге қол жеткізілді. Ірі өндірістің енгізілуімен байланысты салалар бірте-бірте жетілді. Графеннің тамаша сипаттамаларының арқасында ол ұзақ уақыт бойы ғылыми зерттеулердің ыстық нүктесі болады. Кілт графеннің арзан, ауқымды және бақыланатын синтезін қалай қанағаттандыруға болатынында жатыр. Механикалық қабыршақтану болашақ индустрияландыру қажеттіліктерін қанағаттандыра алмайтыны анық; Тотығу-тотықсыздану әдісінің кристалдық тұтастығы мен электрондық құрылымына күшті тотықтырғыштар айтарлықтай зиян келтіреді, бұл оның микроэлектрондық құрылғыларда қолданылуын шектейді. Эпитаксиалды өсу және CVD үшін өндіріс ортасы, жабдықтың дәлдігі және басқа факторлар олардың ауқымды өндірісі мен қолдану әсерін айтарлықтай шектейді. Кез келген өндіріс әдісі адамдарды қанағаттандыру қиын, ал технологиялық инновациялар шұғыл қажет деп айтуға болады. Олардың бірі графеннің қасиеттерін зерттеп, оны дайындаудың мүлде жаңа тәсілдерін әзірлеу болып табылады. Екіншісі – әлеуеті бар дәстүрлі әдістерді ары

қарай зерттеп, жетілдіру. Қолданыстағы нәтижелер бойынша қосымша зерттеулердің өзі графеннің дамуын ілгерілетуі мүмкін. Мысалы, тотығу-тотықсыздану әдісі қанағаттанарлықсыз деп танылды, бірақ аралық өнім болып табылатын графен оксиді қазір аккумуляторлық мембраналар мен тұзсыздандыру сүзгілері сияқты қолданбалар үшін тамаша материал болып саналады. Графеннің тамаша қасиеттеріне толық мүмкіндік беру және оның қолдану өрістерін одан әрі кеңейту үшін функционалдық топтардың, сайттардың және функционалдық топтардың санын бақылау әдістері және құрылғылардан қажет емес функционалдық топтарды жою және графеннің қасиеттері мен құрылымын қалпына келтіру әдістері сияқты жаңа функционалдық әдістерді әзірлеу және жетілдіру қажет. Қазіргі уақытта графен күшті теориялық өнімділігі бар ыңғайсыз жағдайда, бірақ күтілетін практикалық қолдануға қол жеткізе алмайды және қысқа мерзімде кейбір салаларда техникалық серпіліс жасау оңай емес. Сонымен қатар, негізгі жетістіктердің көпшілігі зертханадан келеді; өндірістік шығындарға, дайындықтың сәтті жылдамдығына және басқа факторларға байланысты коммерциялық жаппай өндіріс алыс. Дегенмен, осы негізгі мәселелер шешілгеннен кейін, графенді қолдану перспективасы, сөзсіз, өте кең.

FEs технологиясы адамның өндірісі мен өміріне көптеген өзгерістер әкелетін электронды технологиядағы жаңа революцияға әкелетін әлеуетке ие. Графен өзінің тамаша қасиеттерінің арқасында FE саласында идеалды материалға айналды және жартылай өткізгіш және өткізгіш материалдар бағытында шексіз мүмкіндіктерге ие болды. Дегенмен, графен материалы органикалық жартылай өткізгіштерге және басқа материалдарға қарағанда жоғары тасымалдаушы қозғалғыштығы мен жақсы химиялық тұрақтылыққа ие болғанымен, оның нөлдік жолақ материалы ретіндегі табиғаты цифрлық интегралды схемаларда практикалық қолдануды табу қиын. Қарапайым, тиімді, бақыланатын процестердің және салыстырмалы түрде арзан дайындау әдістерінің болмауына байланысты тек өнеркәсіптік өндіріс тұрғысынан графен мен дәстүрлі электронды өнімдер арасында үлкен алшақтық бар. Дегенмен, графен басып шығару электроникасымен және басқа технологиялармен, The Times және технологиялық прогреспен біріктіріліп, оның теориялық артықшылықтарын ойнайды және әлеуметтік ақпарат пен интеллекттің дамуына ықпал етеді деп болжауға болады. Графенді FE-де өткізгіш материал ретінде қолдану практикалық.

Соңғы жылдары OLED және күн қабылдағыш материалдары сияқты дәстүрлі электронды құрылғыларды алмастыратыны байқалды, ал икемді мөлдір өткізгіш материалдар осы салада ыстық қолданбаға айналады. FE өнімдерімен үйлесімді икемді литий батареялары дами береді. Икемді графен электродтарының жақсартылған механикалық қасиеттеріне сүйене отырып, олардың жоғары деформацияланғыштығы әртүрлі күрделі күш қолданбаларына бейімделу, негізгі электродтар мен диафрагма материалдары болу және ақырында жылдам зарядтауға қол жеткізу үшін одан әрі дамытылады.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар осы зерттеуді жүргізу, мақаланы дайындау және жариялау барысында қаржылық, ғылыми немесе жеке мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): С. Кулидан – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, ғылыми әдебиеттерді талдау, зерттеу жүргізу, нәтижелерді жүйелеу, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. А.Қ. Қасымова – зерттеу әдіснамасын жетілдіру, нәтижелерді талдау және интерпретациялау, мақаланы ғылыми редакциялау, қорытындыларды қалыптастыру. M.S. Seref – ғылыми кеңес беру, зерттеу нәтижелерін тексеру (validation), материалдың ғылыми мазмұнын сараптау, мақаланы рецензиялау және соңғы редакциялауға қатысу. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығы мен сенімділігі үшін ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді жүргізуге қолдау көрсеткені үшінкой официальной поддержки не было, этот раздел можно вообще не включать, так как в большинстве журналов Қарағанды индустриялық университетіне және Стамбульский техникалық университетіне алғыс 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.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Lee, X., Wei, X., Kisar, J. W., Hon, J. Graphene and its electronic properties // *Science*. — 2008. — Vol. 321. — P. 385–388.
- [2] Mayorov, A. S., et al. Micrometer-scale ballistic transport in encapsulated graphene at room temperature // *Nano Letters*. — 2011. — Vol. 11. — P. 2396–2399.
- [3] Bolotin, K. I., Sykes, K. J., Kim, P., Stormer, H. L. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene // *Solid State Communications*. — 2008. — Vol. 146, No. 9–10. — P. 351–355.
- [4] Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, V., Calizo, I., Teveldebran, D., Miao, F., Lau, S. N. Superior thermal conductivity of single-layer graphene // *Nano Letters*. — 2008. — Vol. 8. — P. 902–907.
- [5] Nair, R. R., Blake, P., Grigorenko, A. N., Novoselov, K. S., Booth, T. J., Stauber, T., Perez, N. M., Geim, A. K. Fine structure constant defines visual transparency of graphene // *Science*. — 2008. — Vol. 320. — P. 1308.
- [6] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Firsov, A. A. Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science*. — 2004. — Vol. 306. — P. 666–669.
- [7] Tromp, R. M., Hannon, J. B. Thermodynamics and kinetics of graphene growth on metal surfaces // *Physical Review Letters*. — 2009. — Vol. 102. — P. 106104.
- [8] Obratzsov, A. N. Chemical vapour deposition: making graphene on a large scale // *Nature Nanotechnology*. — 2009. — Vol. 4. — P. 212–213.
- [9] Hu, Y., Jin, X., Zhang, R., Wu, P., Cai, C. Graphene-based electrochemical sensors and biosensors // *Physical Chemistry Chemical Physics*. — 2010. — Vol. 26. — P. 2073–2086.
- [10] Huang, W. Application of graphene in printed electronics // *Screen Printing Industry*. — 2016. — No. 1. — P. 60–61.
- [11] Luo, X., Yu, G. Graphene-based materials for electronic and optoelectronic applications // *Chemistry of Materials*. — 2022. — Vol. 34. — P. 3588–3615.
- [12] Gao, L., et al. Repeated growth and bubbling transfer of graphene with millimetre-size single-crystal grains // *Nature Communications*. — 2012. — Vol. 3. — P. 699.
- [13] Wang, B., Sun, D. Preparation technologies and applications of graphene materials in printed circuit boards // *Printed Circuit Board Information*. — 2013. — Vol. 12. — P. 41–53. Using AI Methods," *Power Electronics and Drives*, vol. 11, no. 1, pp. 111–127, 2026, doi: 10.2478/pead-2026-0006.
- [14] Wen, L., Chen, J., Luo, H., Li, F. Progress in graphene-based flexible electronic devices // *Chinese Science Bulletin*. — 2015. — Vol. 7. — P. 630–644.

REFERENCES

- [1] Lee, X., Wei, X., Kisar, J. W., Hon, J. Graphene and its electronic properties // *Science*. — 2008. — Vol. 321. — P. 385–388.
- [2] Mayorov, A. S., et al. Micrometer-scale ballistic transport in encapsulated graphene at room temperature // *Nano Letters*. — 2011. — Vol. 11. — P. 2396–2399.
- [3] Bolotin, K. I., Sykes, K. J., Kim, P., Stormer, H. L. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene // *Solid State Communications*. — 2008. — Vol. 146, No. 9–10. — P. 351–355.
- [4] Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, V., Calizo, I., Teveldebran, D., Miao, F., Lau, S. N. Superior thermal conductivity of single-layer graphene // *Nano Letters*. — 2008. — Vol. 8. — P. 902–907.
- [5] Nair, R. R., Blake, P., Grigorenko, A. N., Novoselov, K. S., Booth, T. J., Stauber, T., Perez, N. M., Geim, A. K. Fine structure constant defines visual transparency of graphene // *Science*. — 2008. — Vol. 320. — P. 1308.
- [6] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Firsov, A. A. Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science*. — 2004. — Vol. 306. — P. 666–669.
- [7] Tromp, R. M., Hannon, J. B. Thermodynamics and kinetics of graphene growth on metal surfaces // *Physical Review Letters*. — 2009. — Vol. 102. — P. 106104.
- [8] Obratzsov, A. N. Chemical vapour deposition: making graphene on a large scale // *Nature Nanotechnology*. — 2009. — Vol. 4. — P. 212–213.
- [9] Hu, Y., Jin, X., Zhang, R., Wu, P., Cai, C. Graphene-based electrochemical sensors and biosensors // *Physical Chemistry Chemical Physics*. — 2010. — Vol. 26. — P. 2073–2086.
- [10] Huang, W. Application of graphene in printed electronics // *Screen Printing Industry*. — 2016. — No. 1. — P. 60–61.
- [11] Luo, X., Yu, G. Graphene-based materials for electronic and optoelectronic applications // *Chemistry of Materials*. — 2022. — Vol. 34. — P. 3588–3615.
- [12] Gao, L., et al. Repeated growth and bubbling transfer of graphene with millimetre-size single-crystal grains // *Nature Communications*. — 2012. — Vol. 3. — P. 699.
- [13] Wang, B., Sun, D. Preparation technologies and applications of graphene materials in printed circuit boards // *Printed Circuit Board Information*. — 2013. — Vol. 12. — P. 41–53. Using AI Methods," *Power Electronics and Drives*, vol. 11, no. 1, pp. 111–127, 2026, doi: 10.2478/pead-2026-0006.
- [14] Wen, L., Chen, J., Luo, H., Li, F. Progress in graphene-based flexible electronic devices // *Chinese Science Bulletin*. — 2015. — Vol. 7. — P. 630–644.

МАШИНОСТРОЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТ, СТРОИТЕЛЬСТВО

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/067>

STUDY OF DYNAMIC PROCESSES IN A SINGLE-ROLL GEAR CRUSHER WITH IMPACT ACTION

* *Kydyrbayeva S.Zh., Nogayev K.A., Avilkin A.S.*

¹*Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan*

* *Corresponding author e-mail: s.kydyrbayeva@tttu.edu.kz*

Author information:

Nogayev K.A. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail:

Kydyrbayeva S.Zh. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: s.kydyrbayeva@tttu.edu.kz

Avilkin A.S. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail:

Abstract. This paper addresses the improvement of the design of a single-roll gear crusher used for crushing agglomerate sinter in metallurgical production. The study aims to enhance the crushing efficiency by implementing an impact mechanism that enables more intense material fragmentation while reducing energy consumption.

A novel crusher design is proposed, incorporating a mechanism for accumulating and releasing kinetic energy through elastic elements. This approach allows for dynamic variation in the applied impact force, ensuring a more uniform energy distribution and improving the granulometric composition of the final product.

To analyze the dynamic crushing processes, computer modeling was performed in the Autodesk Inventor environment. The study included the development of a digital geometric model, the definition of kinematic constraints, the determination of force interactions between structural elements, and a dynamic system analysis. The investigation identified patterns in the variation of angular velocity and acceleration of the crusher's star wheels and evaluated the influence of elastic element parameters on impact intensity.

The simulation results demonstrate that the proposed design improves crushing efficiency by utilizing impulse energy transmission, reduces energy consumption compared to conventional crushing schemes, and allows for the adjustment of crusher operation parameters based on agglomerate properties. The obtained data can be applied in the design of new and modernization of existing crushing equipment for the metallurgical and mining industries.

Keywords: agglomerate crushing, single-roll gear crusher, impact action, elastic elements, computer modeling, Autodesk Inventor, dynamic analysis

БІР БІЛІКТІ СОҚҚЫЛЫ ҰСАТҚЫШТАҒЫ ДИНАМИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ ЗЕРТТЕУ

* *Кыдырбаева С.Ж., Ногаев К.А., Авилкин А.С.*

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

* *Автор-корреспондент e-mail: s.kydyrbayeva@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Кыдырбаева С.Ж. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail:

Ногаев К.А. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: s.kydyrbayeva@tttu.edu.kz

Авилкин А.С. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail:

Аңдатпа. Бұл мақалада металлургиялық өндірісте агломерациялық агломерацияны ұсақтау үшін қолданылатын бір білікті тісті ұсатқыштың конструкциясын жетілдіру мәселелері қарастырылды. Зерттеу энергия шығынын азайта отырып, материалды неғұрлым қарқынды жоюды қамтамасыз ететін әсер ету механизмін енгізу арқылы ұсақтау тиімділігін арттыруға бағытталған. Серпімді элементтерді пайдалана отырып кинетикалық энергияны жинақтау және босату механизмін жүзеге асыратын жаңа ұсатқыш конструкциясы ұсынылады. Бұл тәсіл ұнтақталған материалға әсер ету күшінің динамикалық өзгеруіне мүмкіндік береді, бұл соққы энергиясын біркелкі бөлуге және соңғы өнімнің гранулометриялық құрамын жақсартуға ықпал етеді. Ұсақтау процестерін динамикалық талдау үшін Autodesk Inventor ортасында компьютерлік модельдеу орындалды, оның ішінде

электронды геометриялық модельді жасау, кинематикалық байланыстарды тағайындау, құрылымдық элементтердің күш әсерлесуін анықтау және жүйенің динамикалық талдау жүзеге асырылды. Зерттеу барысында бұрыштық жылдамдықтың өзгеру заңдылықтары және жұлдызшалардың айналуының үдеулері анықталды, серпімді элементтердің параметрлерінің әсер ету қарқындылығына әсері бағаланды. Модельдеу нәтижелері ұсынылған жобаның импульстік энергияны беру есебінен ұсату тиімділігін арттыруды қамтамасыз ететінін, дәстүрлі ұсақтау схемаларымен салыстырғанда энергия шығындарын азайтатынын және агломераттың қасиеттеріне байланысты ұсатқыштың жұмыс параметрлерін реттеуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Алынған мәліметтерді металлургия және тау-кен өнеркәсібі үшін жаңа ұсақтау қондырғыларын жобалау және жұмыс істеп тұрғандарын жаңғырту кезінде пайдалануға болады..

Түйін сөздер: дробление агломерата, одновалковая зубчатая дробилка, ударное воздействие, упругие элементы, компьютерное моделирование, Autodesk Inventor, динамический анализ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ С УДАРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

*Ногаев К.А., * Кыдырбаева С.Ж., Авилкин А.С.*

Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

** Автор-корреспондент e-mail: s.kydyrbayeva@tttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Ногаев К.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail:

Кыдырбаева С.Ж. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail:

s.kydyrbayeva@tttu.edu.kz

Авилкин А.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail:

Аннотация. В данной статье рассмотрены вопросы совершенствования конструкции одновалковой зубчатой дробилки, используемой для дробления агломерационного спека в металлургическом производстве. Исследование направлено на повышение эффективности дробления путем внедрения механизма ударного воздействия, обеспечивающего более интенсивное разрушение материала при сниженных энергозатратах.

Предложена новая конструкция дробилки, в которой реализован механизм накопления и высвобождения кинетической энергии посредством упругих элементов. Данный подход позволяет обеспечить динамическое изменение силы воздействия на дробимый материал, что способствует более равномерному распределению энергии удара и улучшению гранулометрического состава конечного продукта. Для анализа динамических процессов дробления проведено компьютерное моделирование в среде Autodesk Inventor, включающее разработку электронной геометрической модели, задание кинематических связей, определение силового взаимодействия элементов конструкции и проведение динамического анализа системы. В ходе исследования выявлены закономерности изменения угловой скорости и ускорения вращения звездочек, а также оценено влияние параметров упругих элементов на интенсивность ударного воздействия. Результаты моделирования показали, что предложенная конструкция обеспечивает повышение эффективности дробления за счет импульсной передачи энергии, сокращает энергозатраты по сравнению с традиционными схемами дробления и позволяет регулировать параметры работы дробилки в зависимости от свойств агломерата. Полученные данные могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих дробильных установок для металлургической и горнодобывающей промышленности

Ключевые слова: дробление агломерата, одновалковая зубчатая дробилка, ударное воздействие, упругие элементы, компьютерное моделирование, Autodesk Inventor, динамический анализ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Предложена усовершенствованная конструкция одновалковой зубчатой дробилки ударного действия, в которой разрушение агломерационного спека осуществляется за счёт периодического накопления и высвобождения энергии упругими элементами, соединяющими звездочки с валом ротора. Показано, что использование упругих связей обеспечивает формирование импульсных ударных нагрузок

при сохранении постоянной частоты вращения ротора, что способствует повышению эффективности процесса дробления.

Разработана электронная геометрическая модель дробилки и выполнено динамическое моделирование рабочих процессов в программном комплексе Autodesk Inventor. Установлено, что применение методов инженерного анализа позволяет исследовать кинематические и силовые характеристики

механизма, определить закономерности изменения скоростей, ускорений, деформации пружин и реактивных сил в процессе взаимодействия зубьев звездочек с агломерационным пирогом.

Результаты моделирования подтверждают, что предложенная конструкция обеспечивает циклическое накопление потенциальной энергии в упругих элементах с последующим её преобразованием в ударный импульс, увеличивающий интенсивность разрушения материала. Реализация ударного режима способствует снижению энергоёмкости процесса дробления, улучшению гранулометрического состава готового продукта и повышению эксплуатационной надёжности одновалковой зубчатой дробилки за счёт возможности оптимизации параметров упругих элементов и рабочих органов.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс дробления агломерационного спека играет ключевую роль в металлургическом производстве, обеспечивая получение фракций оптимального размера для последующих технологических операций. Одновалковые зубчатые дробилки широко применяются в промышленности благодаря своей компактности, высокой производительности и простоте эксплуатации. Однако существующие конструкции обладают рядом недостатков, таких как неравномерное распределение нагрузки на зубья, повышенный износ рабочих органов и высокие энергетические затраты [1, 2].

Совершенствование конструкции одновалковой зубчатой дробилки направлено на увеличение эффективности дробления за счет оптимизации геометрии зубьев, изменения кинематики взаимодействия рабочих органов с материалом и применения современных методов компьютерного моделирования. В последние годы активно используются системы инженерного анализа среднего уровня, такие как Autodesk Inventor, позволяющие проводить детальные исследования силового взаимодействия дробимого материала с рабочими поверхностями дробилки [3]. Данный метод моделирования обеспечивает достаточно точные характеристики нагрузки, что подтверждено результатами компьютерных и аналитических расчетов [4].

Одним из перспективных подходов к анализу рабочих процессов является метод дискретных элементов (МДЭ), который позволяет моделировать разрушение материала и определять оптимальные параметры дробящих элементов [5, 6]. Однако высокая вычислительная

сложность МДЭ ограничивает его широкое применение, что делает актуальным использование альтернативных методов моделирования, сочетающих достаточную точность с доступностью реализации на инженерных рабочих станциях [7].

Таким образом, целью данной работы является совершенствование конструкции и рабочих процессов одновалковой зубчатой дробилки с использованием современных методов инженерного анализа для повышения эффективности дробления агломерационного спека. В ходе исследования будут рассмотрены новые конструктивные решения, выполнено компьютерное моделирование силового взаимодействия и предложены рекомендации по повышению эксплуатационной надежности дробилки:

Пробел в исследованиях. Несмотря на развитие методов повышения эффективности процессов дробления и широкое применение современных средств инженерного моделирования в металлургической промышленности, существующие исследования преимущественно направлены на совершенствование традиционных конструкций дробильного оборудования, оптимизацию геометрии рабочих органов и повышение износостойкости элементов конструкции. При этом вопросы применения упругих механизмов для формирования управляемых ударных нагрузок в одновалковых зубчатых дробилках остаются недостаточно изученными.

Большинство известных подходов рассматривает процесс разрушения агломерационного спека с позиции статического или квазистатического нагружения, в то время как динамические особенности взаимодействия зубьев дробилки с материалом, процессы накопления и высвобождения энергии упругими элементами, а также влияние импульсных нагрузок на эффективность дробления исследованы ограниченно. Кроме того, отсутствуют комплексные методики, позволяющие оценивать кинематические и силовые параметры усовершенствованных конструкций дробилок с учётом реальных условий эксплуатации.

Таким образом, актуальной задачей является разработка и исследование конструкции одновалковой зубчатой дробилки ударного действия с использованием современных методов компьютерного моделирования, позволяющих определить закономерности формирования динамических нагрузок, оптимизировать параметры упругих элементов и повысить эффективность процесса дробления

агломерационного спека без существенного усложнения конструкции оборудования.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в разработке конструкции одновалковой зубчатой дробилки ударного действия с использованием упругих элементов в соединении звездочек с валом ротора, обеспечивающих накопление и последующее импульсное высвобождение энергии для формирования дополнительных ударных нагрузок при дроблении агломерационного спека. Предложенный подход позволяет реализовать управляемый динамический режим разрушения материала при сохранении стандартной частоты вращения ротора, повысить интенсивность дробления, снизить энергоёмкость процесса и обеспечить возможность регулирования параметров воздействия за счёт изменения характеристик упругих элементов.

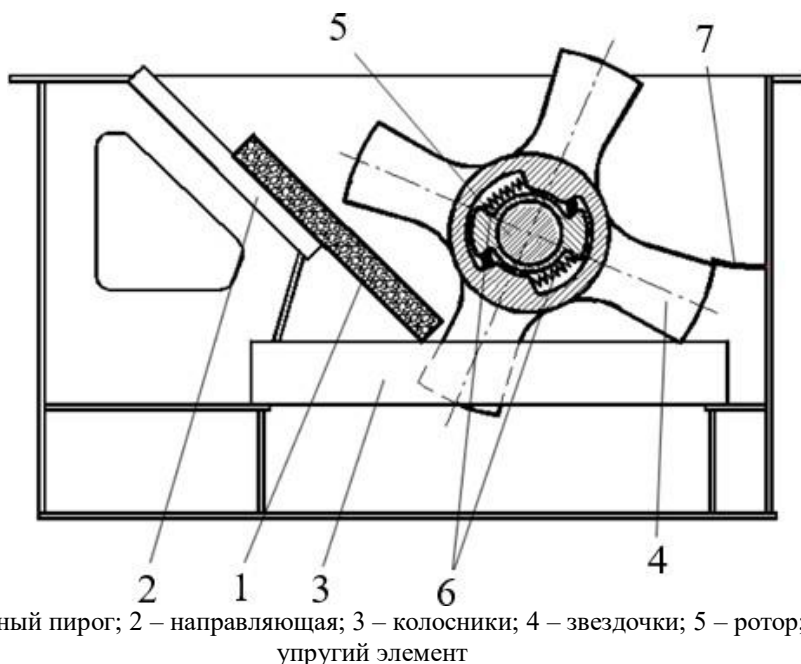
Разработана методика компьютерного исследования динамических процессов дробилки на основе трёхмерного моделирования и анализа силового взаимодействия рабочих органов в программном комплексе Autodesk Inventor, позволяющая определить закономерности изменения скоростей, ускорений, деформаций упругих элементов и возникающих нагрузок в процессе работы оборудования. Полученные результаты создают основу для дальнейшей оптимизации конструкции и повышения эксплуатационной надёжности одновалковых зубчатых дробилок.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

На базе кинематической схемы распространенной на сегодняшний день одновалковой зубчатой дробилки, можно предложить ее новую конструкцию, разрушающую агломерационный пирог, преимущественно ударным импульсом, при достаточно небольшой постоянной частоте вращения вала ротора, равной частоте вращения при обычной работе дробилки. Например, одна из таких схем показана на рисунке 1.

Агломерат, подвергающийся дроблению по направляющей поверхности подается на колосниковую решетку. Отдельные звездочки ротора имеют упругие связи с валом ротора с помощью пружин. При медленном вращении ротора, зубья звездочек захватываются упругими пластинами и накапливают кинетическую энергию, например, за счет сжатия пружин.

Когда деформация пружин достигает величины соответствующей жесткости упругих пластин, происходит скоростное освобождение энергии отдельных звездочек, и они получают дополнительное вращение вокруг оси ротора с повышенной переменной частотой, при этом происходит удар зуба о поверхность агломерационного пирога. Некоторые конструктивные проработки упругих элементов звездочек показаны на рисунке 2



1 – агломерационный пирог; 2 – направляющая; 3 – колосники; 4 – звездочки; 5 – ротор; 6 – пружины; 7 – упругий элемент

Рисунок 1 – Схема одновалковой зубчатой дробилки ударного действия

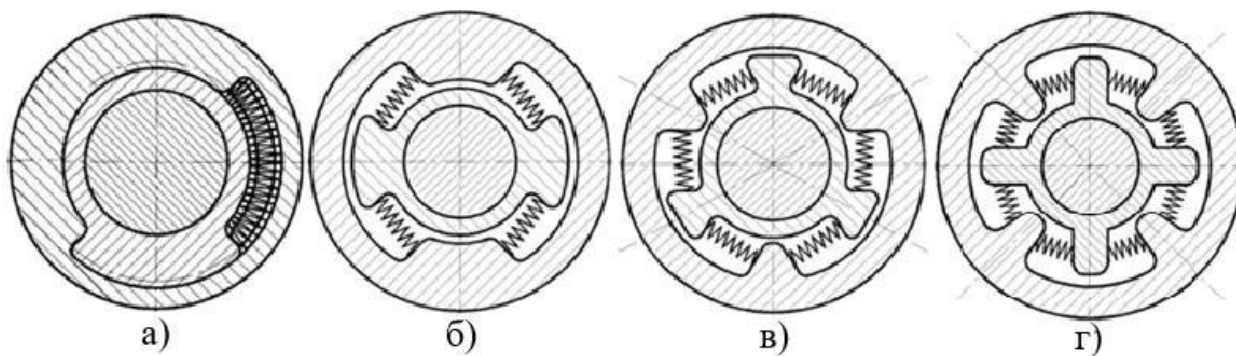


Рисунок 2 – Некоторые варианты конструктивных проработок упругих элементов в ступице звездочек

Наложение ударного действия на агломерат значительно увеличивает концентрацию нагружения

материала, что приводит к более интенсивному разрушению и снижению величины кусков продуктов дробления. Менее энергоемкий процесс удара требует меньших энергозатрат на дробление, при этом улучшается гранулометрический состав готового продукта. Сила удара может регулироваться как жесткостью пружин, так и длиной упругих пластин.

При конструктивной простоте технических решений по реализации ударных нагрузок в одновалковых зубчатых дробилках их динамика и динамика ударных процессов в них оказываются весьма сложными. Для успешной работы такого оборудования необходимо изучение с единой точки зрения определенного комплекса теоретических методов анализа, практических сведений и рекомендаций. Современное развитие информационных технологий и систем инженерного анализа позволяет эффективно проводить исследование ударных процессов в дробилках путем имитационного моделирования их работ.

В качестве основного инструмента моделирования в данной работе выбран программный комплекс Autodesk Inventor,

который предоставляет широкие возможности для анализа динамических процессов и силового взаимодействия рабочих элементов дробилки [3].

Процесс моделирования включает несколько этапов: создание электронной геометрической модели дробилки, задание кинематических связей между деталями, определение силового взаимодействия, а также проведение динамического анализа системы. В Autodesk Inventor реализована методика, позволяющая проводить исследование рабочих характеристик дробилки с учетом воздействия ударных нагрузок и параметров упругих элементов. Данная методика включает операции построения 3D-моделей, назначение кинематических пар, задание внешних сил и выполнение динамического анализа системы [3].

Для исследования динамических процессов в одновалковой зубчатой дробилке была создана электронная геометрическая модель в программном комплексе Autodesk Inventor. Основной этап включал моделирование 3D-объектов путем построения эскизов и их последующего преобразования с использованием булевых операций. Были разработаны 3D-модели ключевых деталей, включая ротор, звездочку (рисунок 3) и неподвижные элементы дробилки.

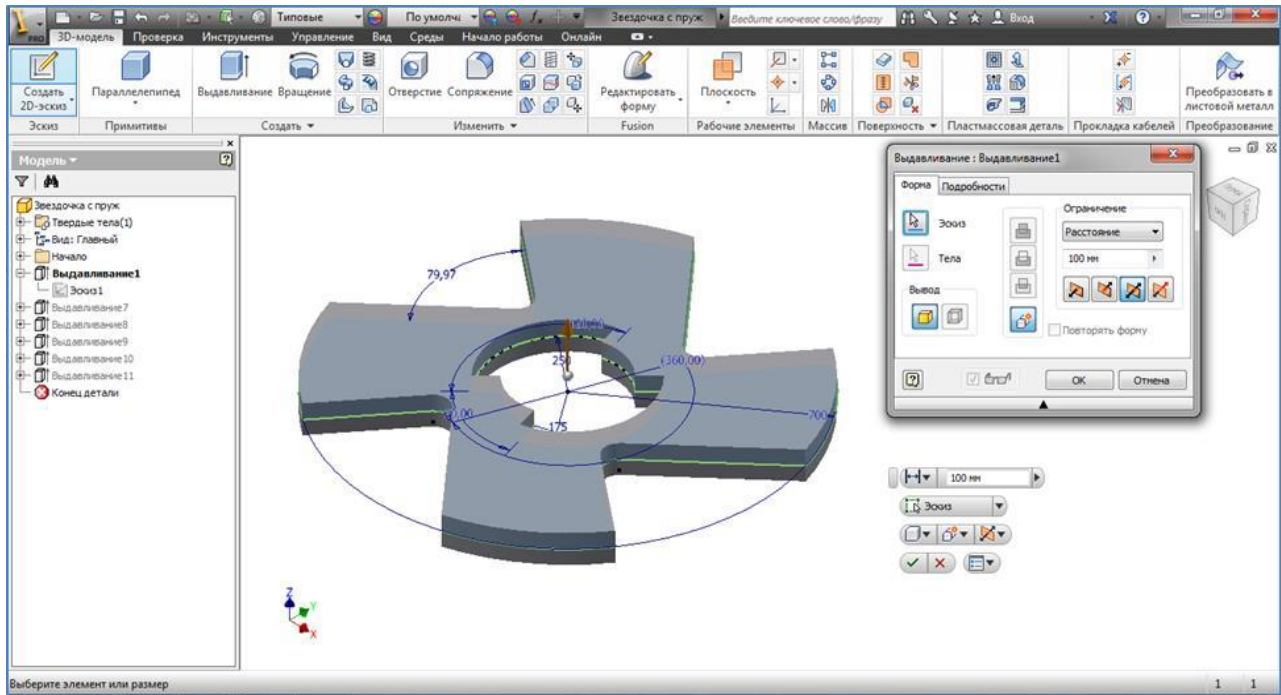


Рисунок 3 – Создание 3D модели звездочки

На следующем этапе осуществлено параметрическое моделирование с назначением кинематических связей, определением параметров соединений и наложением внешних нагрузок (рисунок 4).

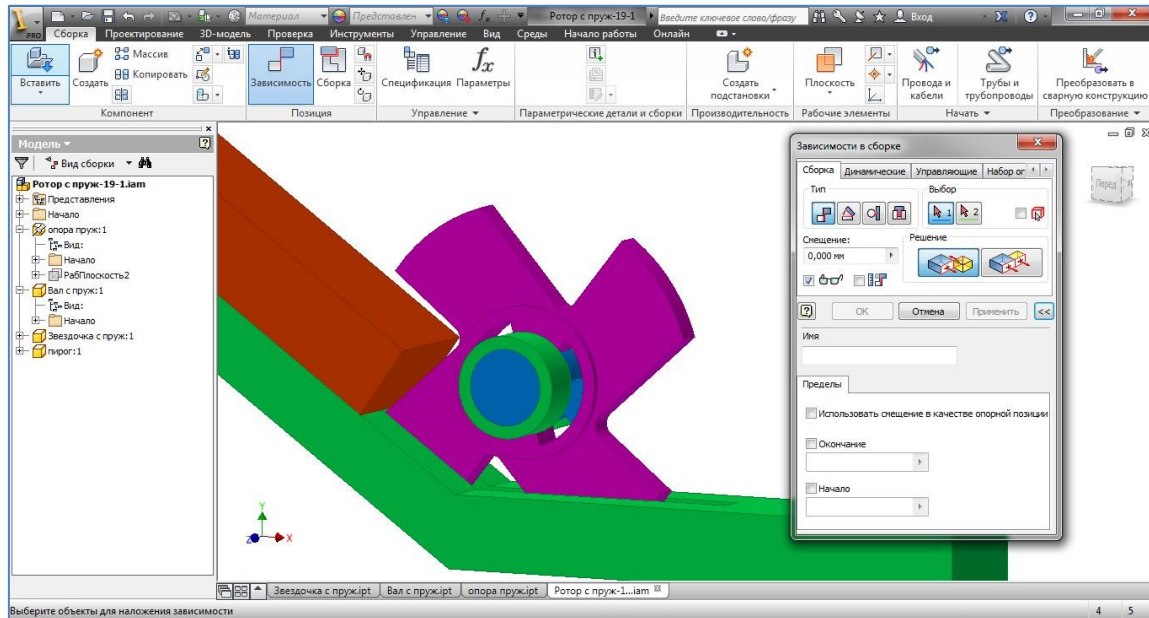


Рисунок 4 – Создание электронной геометрической модели одновальковой зубчатой дробилки

В динамическом анализе использовались кинематические пары («Вращение», «Скольжение»), а также силовые соединения для имитации упругих элементов. Для оценки рабочих нагрузок задавалось вынужденное движение ротора и внешнее воздействие на зубья звездочки, моделируемое переменной силой по заданному закону изменения (рисунок 5)

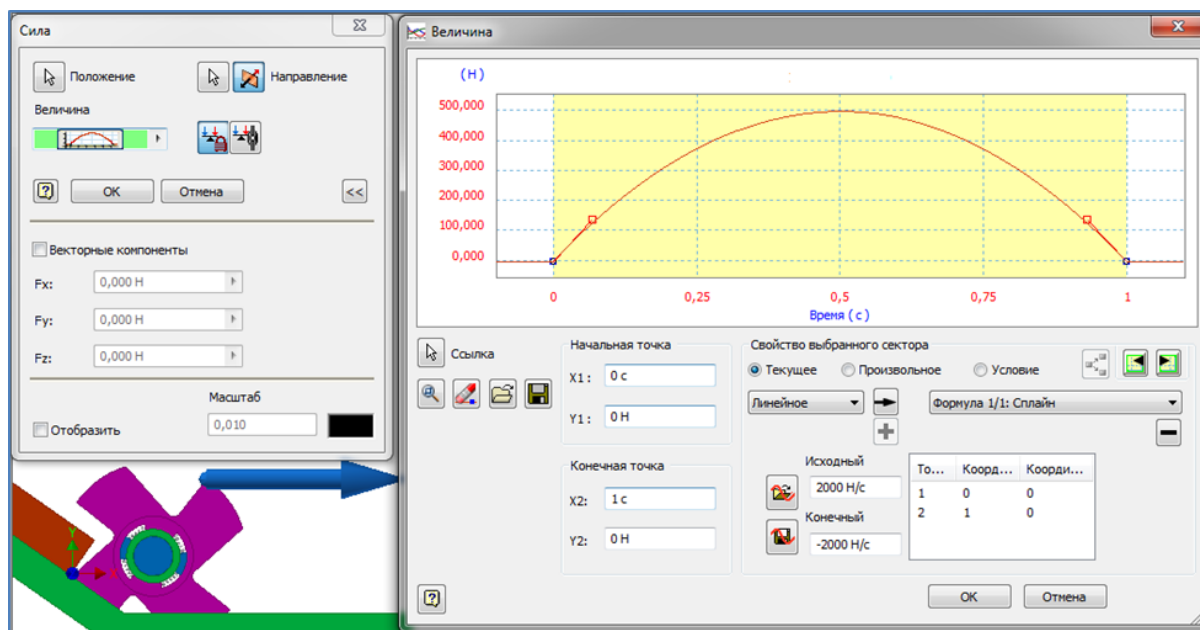


Рисунок 5 – Моделирование захвата зубьев звездочки упругими пластинами внешней силой

Продолжительность симуляции работы одновалковой зубчатой дробилки задали 30 секунд, что

соответствует 1 обороту ротора при скорости его вращения 2 об/мин. На звездочке и вале ротора назначили точки трассировки, по

значениям скоростей которых устанавливали моменты сжатия пружин и последующее реализация ими ударных нагрузок. После запуска расчета результаты моделирования отображается в устройстве графического вывода (рисунок 6).

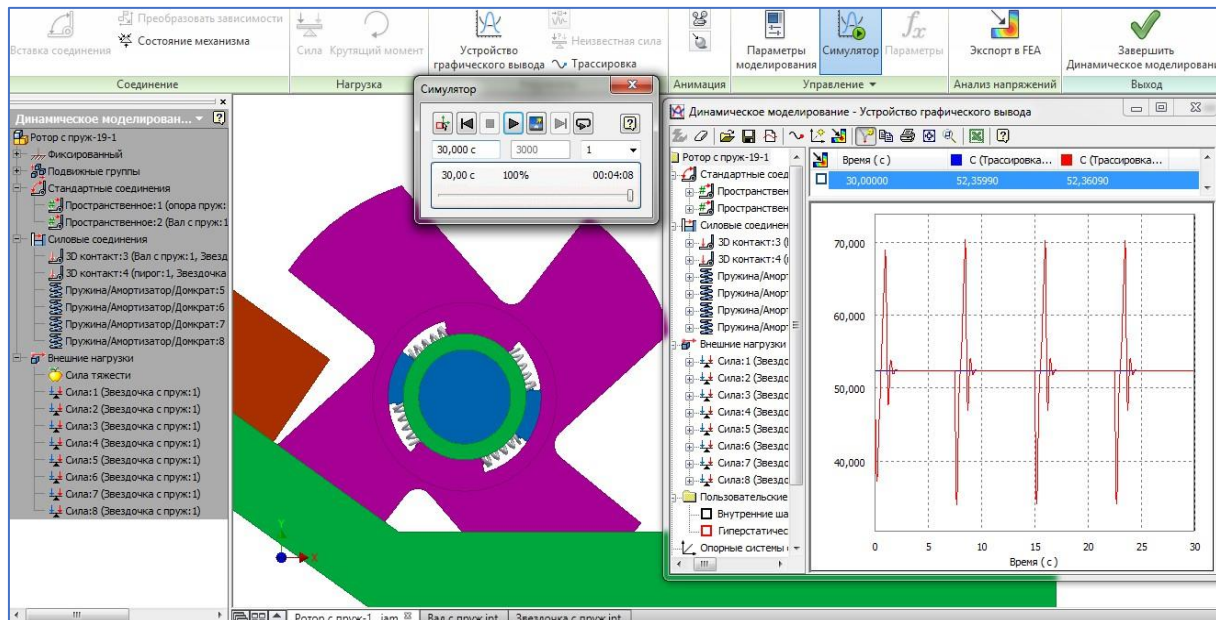


Рисунок 6 – Моделирование работы одновалковой зубчатой дробилки в модуле «Динамическое моделирование» программы Autodesk Inventor

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе моделирования вычислены значения скорости и ускорения подвижных компонентов, длины пружин и реактивных сил в пружинах, внешней силы в каждом зубе звездочки.

В процессе вращения ротора зубья звездочек входят в контакт с упругими пластинами,

установленными в конструкции дробилки (рисунок 1). В результате захвата каждого из зубьев звездочки упругой пластиной, реализованной в модели внешней силой (рисунок 7), происходит постепенное сжатие пружин, соединяющих звездочки с валом ротора. В этот момент наблюдается снижение скорости

вращения звездочек (рисунок 8), так как часть потенциальную энергию упругих элементов кинетической энергии системы преобразуется в (рисунок 9).

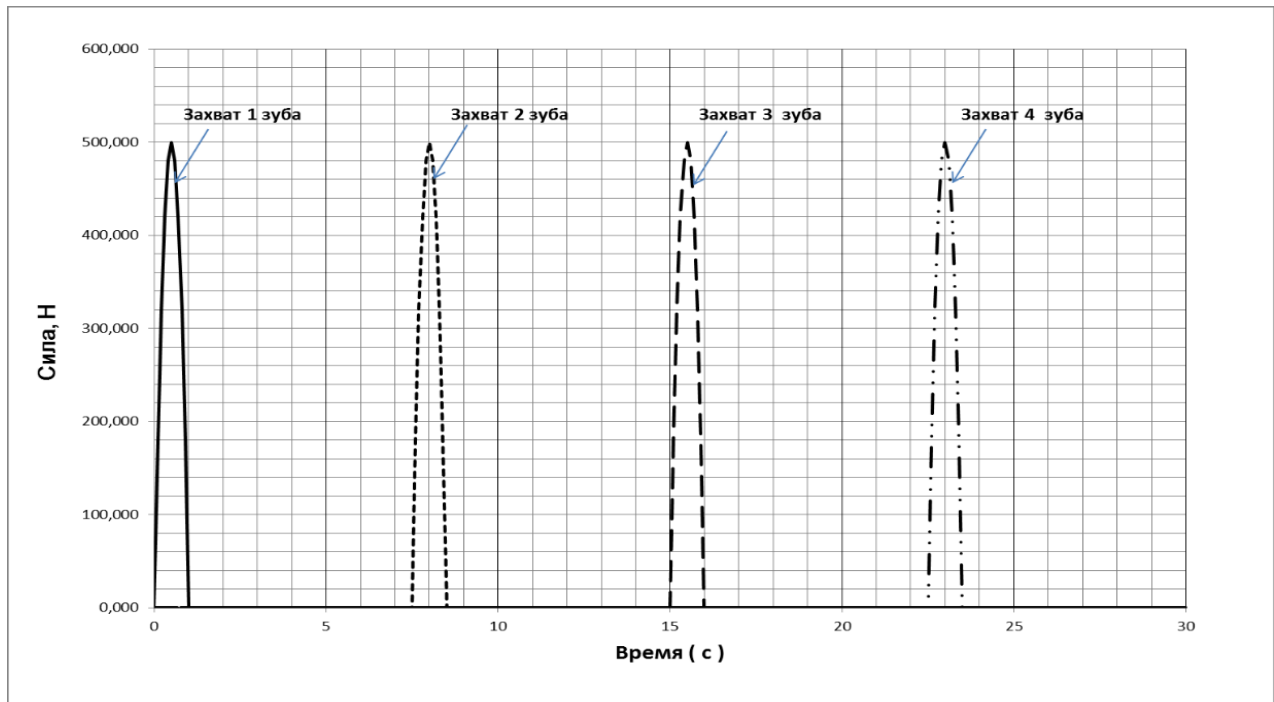


Рисунок 7 – Действие внешней силы, моделирующая действие упругой пластины на зубья звездочки

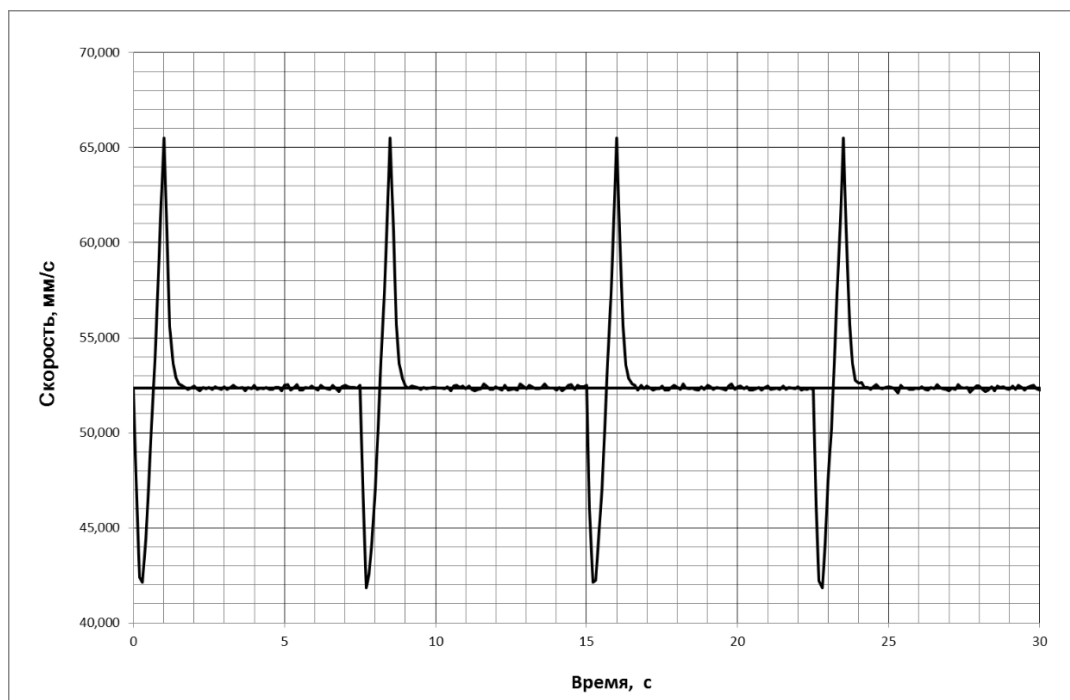


Рисунок 8 – Изменение скорости в точках трассировки звездочки и вала ротора

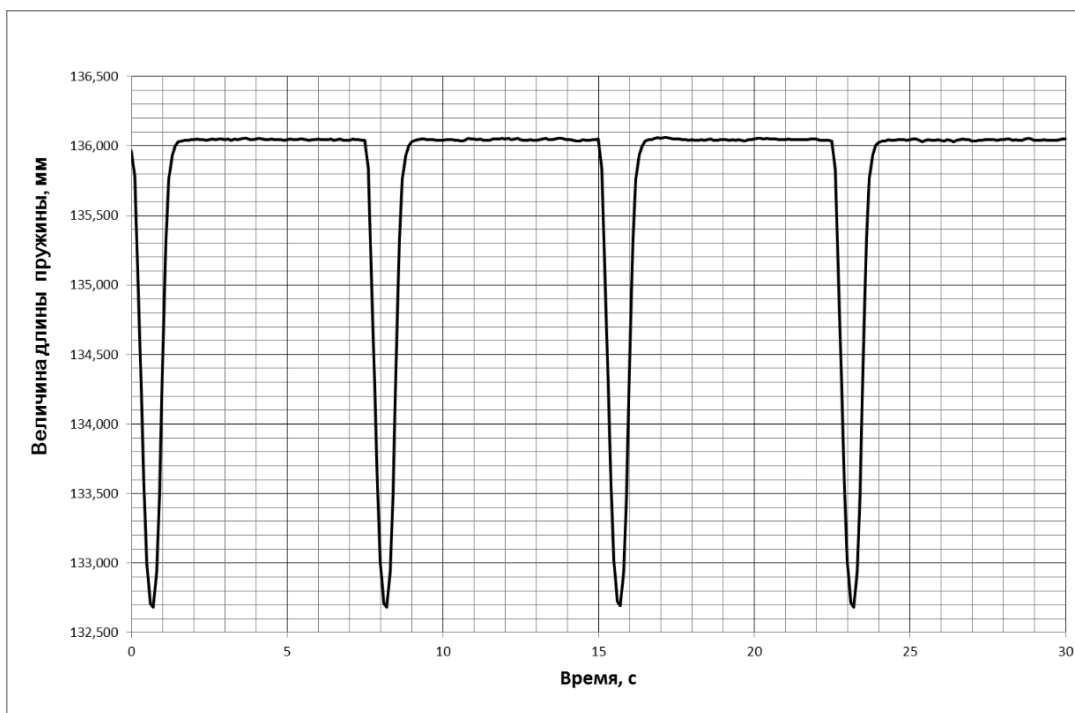


Рисунок 9 – Изменение величины длины пружины в результате действия внешней силы, моделирующее действие упругой пластины на зубья звездочки

По мере увеличения деформации пружин их упругие силы нарастают, пока не достигается предельное значение, соответствующее жесткости пластин. В этот момент пружины начинают разжиматься, высвобождая накопленную энергию. Это приводит к резкому увеличению угловой скорости звездочек, что

сопровождается скачкообразным ускорением их вращения (Рисунок 10). Таким образом, в механизме дробилки реализуется периодическая цикличность замедления и резкого ускорения звездочек, что создает условия для формирования ударных нагрузок на агломерат.

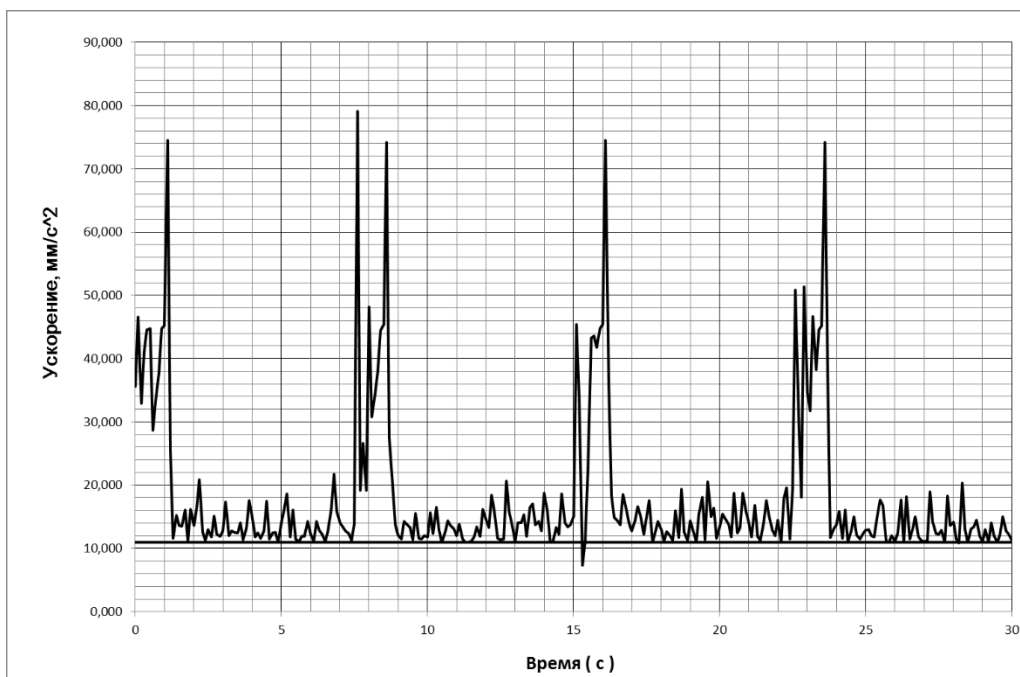


Рисунок 10 – Изменение ускорения в точках трассировки звездочки и вала ротора

Возникающая в результате разжатия пружин импульсная передача энергии приводит к интенсивному

механическому воздействию на агломерат. При достижении критического уровня накопленной энергии происходит резкое вращение звездочек, сопровождающееся ударом их зубьев о поверхность агломерационного пирога.

В отличие от традиционных способов дробления, использующих постоянное механическое давление, предложенная методика позволяет добиться динамического изменения силы воздействия. Ударные нагрузки способствуют не только разрушению крупных фрагментов агломерата, но и обеспечивают более равномерное распределение энергии по всей зоне контакта. Это позволяет уменьшить вероятность образования крупных недроблённых частиц и улучшить фракционный состав конечного продукта.

Дополнительно анализ результатов моделирования показывает, что распределение энергий в системе влияет на амплитуду и частоту возникающих ударных нагрузок. За счет варьирования параметров упругих элементов можно регулировать интенсивность дробления, адаптируя конструкцию для различных типов агломератов.

Динамическое моделирование позволило детально проанализировать закономерности движения звездочек в процессе дробления. При взаимодействии зубьев с упругими пластинами скорость вращения звездочек изменяется нелинейно (Рисунок 8). В момент сжатия пружин наблюдается замедление, а в момент их разжатия – резкое ускорение (Рисунок 10).

Кинематические характеристики звездочек показывают, что процесс сопровождается значительными изменениями углового ускорения, что подтверждает импульсный характер движения. Данное поведение обусловлено особенностями конструкции, в которой используется комбинация упругих элементов и внешнего силового воздействия.

Также анализ динамических параметров системы позволяет прогнозировать величины нагрузок, действующих на конструктивные элементы дробилки. Это важно с точки зрения оценки ресурса деталей и выбора оптимальных материалов.

ВЫВОДЫ

1. Предложена новая конструкция одновалковой зубчатой дробилки с механизмом накопления и высвобождения кинетической энергии посредством упругих элементов. В

отличие от традиционных дробильных установок, данное техническое решение позволяет реализовать ударное воздействие на агломерат, что способствует более эффективному разрушению материала при сниженных энергозатратах.

2. Выполнено компьютерное моделирование динамических процессов дробления в программном комплексе Autodesk Inventor. В ходе исследования проанализированы кинематические и динамические характеристики подвижных элементов дробилки, определены закономерности изменения угловых скоростей и ускорений звездочек, а также выявлено влияние параметров упругих элементов на интенсивность ударных нагрузок.

3. Показано, что применение ударного механизма способствует более равномерному распределению энергии разрушения, снижению вероятности образования крупных недроблённых частиц и улучшению гранулометрического состава конечного продукта. Кроме того, регулирование жесткости пружин и длины упругих пластин позволяет адаптировать работу дробилки к различным свойствам агломерата, повышая универсальность установки.

4. Выявлены закономерности взаимодействия зубьев звездочек с упругими пластинами, определены критические параметры сжатия пружин и их влияние на импульсную передачу энергии. Доказано, что циклическое изменение угловой скорости звездочек приводит к формированию периодических ударных нагрузок, повышающих эффективность разрушения агломерационного спека.

5. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации дробильных установок для металлургической и горнодобывающей промышленности. Применение современных методов инженерного анализа позволяет повысить надежность оборудования, уменьшить износ рабочих элементов и сократить эксплуатационные затраты.

Авторский вклад (таксономия CRediT):

Ногаев К.А. концептуализация исследования, разработка конструкции дробилки, разработка методологии, проведение компьютерного моделирования, анализ и интерпретация результатов, написание первоначального варианта рукописи. Кыдырбаева С.Ж.: постановка научной задачи, руководство исследованием, валидация результатов моделирования, формальный анализ, научное редактирование, доработка и подготовка окончательной версии статьи. Авилкин А.С.

анализ литературы, методологическое сопровождение исследования, интерпретация результатов, визуализация материалов, рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы ознакомились с окончательной версией статьи, одобрили её к публикации и несут ответственность за достоверность представленных результатов.

Финансирование. Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам Карагандинского индустриального университета за научные консультации и поддержку при выполнении исследования. Особая признательность выражается коллегам, принимавшим участие в обсуждении конструктивных решений, вопросов

компьютерного моделирования и анализа динамических процессов одновалковой зубчатой дробилки. Авторы также благодарят рецензентов за ценные замечания и рекомендации, способствовавшие повышению качества рукописи.

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

- [1] Johansson, M., Bengtsson, M., Evertsson, M., & Hulthén, E. A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. // *Minerals Engineering*, 2017, 105, pp. 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.012>.
- [2] Legendre, D., & Zevenhoven, R. Assessing the energy efficiency of a jaw crusher. // *Energy*, 2014, 74, pp. 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.036>.
- [3] Younis, W. The Dynamic Simulation Environment. Up and Running with Autodesk Inventor Simulation 2011, 2010, pp. 1–96. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382102-7.10001-7>.
- [4] Beloglazov, I. I., & Ikonnikov, D. A. Computer Simulation Methods for Crushing Process in a Jaw Crusher. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 142, 012074. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012074>.
- [5] Refahi, A., Aghazadeh Mohandesi, J., & Rezai, B. Discrete element modeling for predicting breakage behavior and fracture energy of a single particle in a jaw crusher. // *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 94(1-2), pp. 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.12.002>.
- [6] Белоглазов И. И., Иконников Д. А. Применение метода дискретных элементов для моделирования процесса измельчения горных пород в щековой дробилке. // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2016. – №9 – С.780-786.
- [7] Dowding, C. H., & Lytwynyshyn, G. Point load—deformation relationships and design of jaw crusher plates. *Powder Technology*, 1982, 31(2), 277–286.
- [8] Younis, W. The Dynamic Simulation Environment. Up and Running with Autodesk Inventor Simulation 2011, 2010, pp. 1–96. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382102-7.10001-7>

REFERENCES

- [1] M. Johansson, M. Bengtsson, M. Evertsson, and E. Hulthén, "A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher," *Minerals Engineering*, vol. 105, pp. 69–78, 2017.
- [2] D. Legendre and R. Zevenhoven, "Assessing the energy efficiency of a jaw crusher," *Energy*, vol. 74, pp. 119–130, 2014.
- [3] W. Younis, "The Dynamic Simulation Environment," in *Up and Running with Autodesk Inventor Simulation 2011*, pp. 1–96, 2010.
- [4] I. I. Beloglazov and D. A. Ikonnikov, "Computer Simulation Methods for Crushing Process in a Jaw Crusher," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 142, Art. no. 012074, 2016.
- [5] A. Refahi, J. Aghazadeh Mohandesi, and B. Rezai, "Discrete element modeling for predicting breakage behavior and fracture energy of a single particle in a jaw crush," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 94, no. 1–2, pp. 83–91, 2010.
- [6] I. I. Beloglazov and D. A. Ikonnikov, "Primenenie metoda diskretnykh elementov dlya modelirovaniya protsesssa izmel'cheniya gornykh porod v shchekovoi drobilke [Application of the Discrete Element Method for Simulation of the Rock Crushing Process in a Jaw Crusher]," *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Priborostroenie*, no. 9, pp. 780–786, 2016. (In Russian).
- [7] C. H. Dowding and G. Lytwynyshyn, "Point load—deformation relationships and design of jaw crusher plates," *Powder Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 277–286, 1982.

MECHANICAL ENGINEERING, TECHNOLOGICAL MACHINES AND TRANSPORT, CONSTRUCTION

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/068>

THE IMPORTANCE OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN TEACHING SPECIALIZED DISCIPLINES

* ¹Azimbaev K.A., ²Kamarova A.R.

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

²Temirtau Higher Polytechnic College, Temirtau, Kazakhstan

* Corresponding author e-mail: k.azimbayev@tttu.edu.kz

Author information:

Азимбаев К.А. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: k.azimbayev@tttu.edu.kz

Камарова А.Р. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: 23080225@mail.ru

Abstract. The paper considers the need to develop intellectual, personal and spiritual qualities of a person in new socio-economic conditions. The importance of innovative technologies in teaching specialized disciplines lies in improving the quality of specialist training. Innovative technologies ensure that the knowledge, skills and abilities of a specialist correspond not only to functional professional tasks, but also to the needs of the labor market.

Development of cognitive skills and creative thinking. The introduction of innovative technologies contributes to the development of students' ability to understand the practical significance of the topic being studied, draw conclusions, and analyze.

Involvement of each student in active cognitive activity. This contributes to the development of critical thinking, dialogical speech, and the ability to argue. Students acquire skills of cooperation, collective search for solutions, actively participate in learning and transfer their knowledge to others.

Innovative methods and forms make it possible to develop students' independence in cognitive activity and apply existing knowledge in the educational process

Keywords: student, specialist, professionalism, transport, quality, dignity, innovation, information and communication technologies, science, technology, cooperation.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУЧНОМ ОБРАЗОВАНИИ

* ¹Азимбаев К.А., ²Камарова А.Р.

¹Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

²Теміртау жоғары политехникалық колледжі, Теміртау, Қазақстан

* Автор-корреспондент e-mail: k.azimbayev@tttu.edu.kz

Авторлар туралы ақпарат:

Азимбаев К.А. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: k.azimbayev@tttu.edu.kz

Камарова А.Р. - Теміртау жоғары политехникалық колледжі, Теміртау қ., Қазақстан. E-mail: 23080225@mail.ru

Аңдатпа. Жұмыста жаңа әлеуметтік-экономикалық жағдайда адамның интеллектуалды, жеке және рухани қасиеттерін дамыту қажеттілігі қарастырылады. Бейіндік пәндерді оқытудағы инновациялық технологиялардың маңыздылығы мамандарды даярлау сапасын арттыру болып табылады. Инновациялық технологиялар маманның білімі, дағдылары мен дағдыларының функционалдық кәсіби міндеттерге ғана емес, еңбек нарығының қажеттіліктеріне де сәйкестігін қамтамасыз етеді.

Танымдық дағдылар мен шығармашылық ойлауды дамыту. Инновациялық технологияларды енгізу білім алушылардың зерттелетін тақырыптың практикалық маңыздылығын түсіну, қорытынды жасау, талдау қабілетін дамытуға ықпал етеді.

Әр студентті белсенді танымдық қызметке тарту. Бұл сыни ойлауды, диалогтық сөйлеуді, дәлелдеу қабілетін дамытуға ықпал етеді. Студенттер ынтымақтастық, шешімдерді ұжымдық іздеу дағдыларын игереді, оқуға белсенді қатысады және өз білімдерін басқаларға береді.

Инновациялық әдістер мен формалар білім алушылардың танымдық іс-әрекетте дербестігін дамытуға және қолда бар білімді оқу процесінде қолдануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: студент, маман, кәсіпқойлық, көлік, сапа, қасиет, инновация, ақпараттық-коммуникациялық технологиялар, ғылым, технология, ынтымақтастық.

ЗНАЧЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРЕПОДАВАНИИ ПРОФИЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН

^{*1}К.А. Азимбаев, ²Камарова А.Р.

¹Қарағандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

²Темиртауский высший политехнический колледж, г. Темиртау, Казахстан

* Автор-корреспондент e-mail: k.azimbayev@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Азимбаев К.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: k.azimbayev@tttu.edu.kz

Камарова А.Р. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: 23080225@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается необходимость развития интеллектуальных, личностных и духовных качеств человека в новых социально-экономических условиях. Важность инновационных технологий в преподавании профильных дисциплин заключается в повышении качества подготовки специалистов. Инновационные технологии обеспечивают соответствие знаний, умений и навыков специалиста не только функциональным профессиональным задачам, но и потребностям рынка труда.

Развитие познавательных навыков и творческого мышления. Внедрение инновационных технологий способствует развитию у обучающихся умения понимать практическую значимость изучаемой темы, делать выводы, анализировать.

Вовлечение каждого студента в активную познавательную деятельность. Это способствует развитию критического мышления, диалогической речи, способности аргументировать. Студенты приобретают навыки сотрудничества, коллективного поиска решений, активно участвуют в обучении и передают свои знания другим. Инновационные методы и формы позволяют развивать самостоятельность обучающихся в познавательной деятельности и применять имеющиеся знания в учебном процессе.

Ключевые слова: студент, специалист, профессионализм, транспорт, качество, достоинство, инновации, информационно-коммуникационные технологии, наука, технологии, сотрудничество.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Бейіндік пәндерді оқытуда инновациялық технологияларды қолданудың теориялық және практикалық аспектілеріне салыстырмалы талдау жүргізіліп, олардың білім алушылардың кәсіби құзыреттіліктерін, танымдық белсенділігін, шығармашылық ойлауын және өзіндік жұмыс дағдыларын дамытудағы артықшылықтары ғылыми негізделді. Инновациялық оқыту технологияларының білім беру үдерісінің тиімділігін арттыруға, оқытуды дараландыруға, білім алушылардың зерттеушілік және практикалық қызметін ұйымдастыруға, сондай-ақ теориялық білімді кәсіби қызметпен ұштастыруға мүмкіндік беретіні дәлелденді. Сонымен қатар, ақпараттық-коммуникациялық технологияларды, жобалық оқыту әдісін, ынтымақтастықта

оқытуды, көпдеңгейлі және тұлғаға бағытталған технологияларды қолдану болашақ мамандардың кәсіби даярлығының сапасын арттырып, еңбек нарығы талаптарына сәйкес келетін құзыретті маман қалыптастырудың маңызды факторы екені көрсетілді.

КІРІСПЕ

Білім беру үдерісіндегі инновациялық технологиялардың маңыздылығы білім алушылардың зерттелетін тақырыптың практикалық маңыздылығын талдау, қорытынды жасау және түсіну қабілетін дамытуға ықпал етеді, өйткені мұндай технологиялар белсенді, шығармашылық тұлғаны қалыптастыруға бағытталған [1].

Оқытушының жетекшілігімен сабақтарда білім алушылардың оқу мәселелерін шешу бойынша дербес іздестіру қызметі ұйымдастырылады. Сабақ барысында студенттер проблеманы көріп қана қоймай, оны шешу жолдарын біртіндеп, бұрыннан белгілі нәрсені ескере отырып анықтауға үйренеді. Нәтижесінде білім алушылар ақпаратпен сауатты жұмыс істеуді үйренеді: белгілі бір мәселені шешу үшін қажетті фактілерді жинау, оларды талдау, проблемаларды шешу гипотезаларын ұсыну, қажетті жалпылау, ұқсас немесе балама шешімдермен салыстыру

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі таңда білім беру жүйесінде инновациялық технологияларды қолдану мәселелері кеңінен зерттелгенімен, олардың бейіндік пәндерді оқытудағы тиімділігін кешенді түрде бағалау және кәсіби құзыреттілікті қалыптастыруға ықпалын жан-жақты талдау жеткілікті деңгейде қарастырылмаған. Әсіресе, инновациялық оқыту технологияларының білім алушылардың танымдық белсенділігін, шығармашылық ойлауын, дербес ізденіс дағдыларын және практикалық кәсіби даярлығын дамытудағы рөлін жүйелі негізде зерттеу қажеттілігі сақталуда. Сонымен қатар, дәстүрлі және инновациялық оқыту әдістерінің тиімділігін салыстыра отырып, нақты білім беру ортасы мен бейіндік пәндердің ерекшеліктеріне сәйкес келетін оңтайлы педагогикалық технологияларды ғылыми тұрғыдан негіздеу мәселесі толық шешімін таппаған. Сондықтан аталған зерттеу осы ғылыми-педагогикалық олқылықтың орнын толтыруға және бейіндік пәндерді оқытуда инновациялық технологияларды қолданудың тиімді жолдарын айқындауға бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы бейіндік пәндерді оқытуда қолданылатын инновациялық технологиялардың білім беру үдерісіне ықпалын кешенді түрде талдау мен бағалауда жатыр. Зерттеу барысында тұлғаға бағытталған оқыту, ынтымақтастықта оқыту, жобалау әдісі, ақпараттық-коммуникациялық технологиялар, компьютерлік тестілеу және оқу-зерттеу қызметі сияқты инновациялық технологиялардың студенттердің танымдық белсенділігін, шығармашылық ойлауын, кәсіби құзыреттілігін және өзіндік ізденіс дағдыларын қалыптастырудағы тиімділігі жүйелі түрде негізделді. Сонымен қатар, дәстүрлі және инновациялық оқыту әдістерінің артықшылықтарын салыстырмалы талдау негізінде бейіндік пәндерді оқыту сапасын

арттыруға, студенттердің кәсіби даярлығын жетілдіруге және олардың еңбек нарығы талаптарына сәйкес құзыреттіліктерін қалыптастыруға мүмкіндік беретін тиімді педагогикалық тәсілдер айқындалды.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Бүгінгі таңда көптеген бейіндік пәндердің оқытушылары студенттердің оларға берілетін ең көп нәрсені игеруі үшін заманауи сабақ қандай болуы керек деген сұрақтар қояды.

Қазір жаңа сапалы маман даярлау қажет, қоғамға тек сауатты қызметкер ғана емес, өзін-өзі тәрбиелеуге қабілетті, іске шығармашылық көзқарасқа бағдарланған, ойлау мәдениеті жоғары, көпжақты дамыған адам қажет.

Біз студентке өмір бойы білім алу қабілетін үйретуіміз керек, ол үшін оқытушы әдістемелерді үнемі жаңартып отыруға, жаңа буынмен ынтымақтасуға, үнемі өзгеріп отыратын ортаға сәйкес келуге, өз студенттерінде пәнге шығармашылық көзқарасты ынталандыруға, ол үшін оқытудың әртүрлі дәстүрлі емес формалары мен әдістерін, инновациялық технологияларды қолдануға қабілетті болуы қажет.

Инновация – бұл теориялық негізделген, мақсатты және тәжірибеге бағытталған инновация. Инновациялық білім берудің мақсаттары:

- студенттің зияткерлік-тұлғалық және рухани дамуының жоғары деңгейін болашақтың білім беру ортасына қамтамасыз ету;
- ғылыми ойлау стилінің дағдыларын игеру үшін жағдай жасау;
- әлеуметтік-экономикалық және кәсіптік салалардағы инновациялар әдіснамасын оқыту [1].

Жоғары оқу орындарындағы дәстүрлі білім беру процесі студенттерге білім береді, бірақ бұл білімді белгілі бір кәсіби қызметке байланыстыру эпизодтық түрде орын алады, мысалы, курстық жұмыс орындауда, диплом алдындағы немесе өндірістік тәжірибе өту кезінде. Бұл жағдайда студентті нақты кәсіби біліммен және сапамен қамтамасыз ету өте күрделі екені анық. Инновациялық білім инновациялық динамиканы игеру процесінде кәсіби білім мен сапаны қалыптастыруға бағытталған, мысалы, электронды оқулық арқылы типтік инновацияларды игеру процесінде, онда осы кәсіби қызмет саласының даму барысын көрсететін типтік инновациялар ұсынылған, интегралды түрде кәсіби міндеттер жинақталған. Осылайша, кәсіпқойлық ұғымы түлектің интегралды сапасына айналады, ол оны оқу процесінде өзі синтездеді. Студенттің өзін кәсіби маман ретінде тануы білім беру процесінің

нәтижесіне әсер етеді, өйткені ол өзін-өзі дамыту мотивациясын белсендіреді, бұл өз кезегінде оқу процесін дамып келе жатқан тұлғаның қажеттіліктерін қанағаттандыру көзіне айналдырады. Нәтижесінде студент формальдық-құқықтық (студент білім беру субъектісі ретінде) нақты антропоцентризм жағдайына (студент □ өз өмірінің субъектісі) нақты ауысуды жүзеге асырады.

Тұлғаға бағытталған технологияларға ерекше назар аударылады □ ынтымақтастықта оқыту, жоба әдісі, даралау және саралау технологиялары, көп деңгейлі оқыту.

Даралау технологиясы курстық жобамен, дипломдық жобалаумен пәндер сабақтарын өткізуде кеңінен қолданылады. Курстық немесе дипломдық жобаларды қорғаудағы студенттердің жетістіктері жұмыстың нәтижелілігін айғақтайды.

Ұжымдық оқыту технологиясы сабақтарды өткізуде семинарлар, әңгімелер, пікірталастар, диалог түрінде қолданылады, нәтижесінде студенттің алдына қойылған проблемалық жағдайдың шешімі, мысалы, көлік техникасында шешіледі.

Ынтымақтастықта оқыту бейіндік цикл пәндері бойынша зертханалық және тәжірибелік жұмыстар жүргізу кезінде жүзеге асырылады.

Оқытылатын пәнге қызығушылықты ояту, оқушылардың шығармашылық белсенділігін белсендіру, олардың өзіндік танымдық іс □ әрекетін қалыптастыру дәстүрлі емес түрде □ ТТК сабағы, конкурс сабағы, екілік сабақ өткізу кезінде қол жеткізіледі [2].

Құрылым мен мінезді оқытудың екілік формасы оқытудың басқа түрлерінен, дәстүрлі теориялық және өндірістік сабақтардан айтарлықтай ерекшеленеді. Бұл теорияның практикамен біртұтас байланысын ғана емес, сонымен қатар технологиялық сипаттағы бірнеше арнайы пәндердің тірек білімінің тақырыптарын біріктіреді.

Екілік оқытудың негізі студенттердің танымдық және тәжірибелік қызметін кезең-кезеңімен ұйымдастыру болып табылады. Мұндай сабақтар студенттердің жоғары белсенділігі жағдайында жанды, эмоционалды түрде өтеді және бірнеше пәннің материалын қамтиды.

Жүйе студенттердің өндірістік практикадан (технологиялық және диплом алдындағы) өту қорытындысы бойынша мамандық апталары кезеңінде конференциялар өткізу болды, оған мамандықтың үшінші және төртінші курс студенттері қатысады. Конференцияда студенттер тәжірибеде алған әсерлерімен бөлісіп қана қоймай, тәжірибе мамандық бойынша кәсіби

қызметті игеруге бағытталғанын растайды; арнайы цикл пәндерін оқу кезінде алған білімдерін бекіту, кеңейту, тереңдету және жүйелеу, бастапқы практикалық тәжірибе алу, кәсіби ойлауды дамыту, өз бетінше еңбек қызметіне кәсіби дайындығын тексеру, көлік кәсіпорындарында қозғалыс қауіпсіздігі мен еңбекті қорғауды қамтамасыз ету жөніндегі жұмысты зерделеу. Олар өздерінің теориялық білімдерін ұйымдар мен мекемелер мамандарының нақты тапсырмаларын орындау кезінде жиі қолдануға мәжбүр болды, олар кіші курс студенттеріне қоштасу сөздерін айтады.

Инновациялық технологиялар призмасының астында студенттердің арнайы пәндерді білуін тексеру жүйесі өзгеруде. Компьютерлік технологияларды (компьютерлік тестілеу) қолдануға бағытталған және қазіргі заманның шындығына толық жауап беретін студенттердің дайындық деңгейін өлшеудің заманауи әдістері түбегейлі жаңа мүмкіндіктер береді, оқытушы қызметінің тиімділігін арттырады. Бұл технологиялардың маңызды артықшылығы, олар студентке де жаңа мүмкіндіктер береді. Оқу объектісінен шыққан студент оқу процесіне саналы түрде қатысатын және онымен байланысты шешімдерді өз бетінше қабылдайтын оқу субъектісіне айналады. Сонымен қатар, егер дәстүрлі бақылау кезінде студенттердің дайындық деңгейі туралы ақпаратты тек оқытушы ғана иеленсе және оған толық иелік етсе, онда ақпаратты жинау мен талдаудың жаңа компьютерлік әдістерін қолданған кезде ол білім алушыларға да қол жетімді болады. Бұл оларға оқу процесінің барысына байланысты саналы түрде шешім қабылдауға, студенттер мен оқытушыларды нәтижелеріне бірдей қызығушылық танытатын маңызды істе серіктес етуге мүмкіндік береді. Компьютерлік тестілік білімді бақылаудың күшті жағы □ тестілеу процесінде материалдың үлкен көлемін қамту және сол арқылы тестіленіп жатқан студенттің білімі туралы шынымен кең түсінік алу мүмкіндігі, бұл оқу процесінің нәтижелерін бағалаудың объективтілігін, егжей-тегжейін және дәлдігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді [2, 3].

Арнайы пәндерді оқытудағы инновациялық технологиялардың объектісі ретінде оқу-зерттеу қызметі студенттер мен оқытушылардың бірлескен жұмыс процесі ретінде маңызды рөл атқарады, ол зерттеуге тән негізгі кезеңдерден тұрады:

- проблеманы қою;
- осы мәселе бойынша теорияны зерттеу;
- зерттеу әдістерін таңдау және оларды практикалық игеру;

-материал жинау, оны талдау және жалпылау;

-қорытындылар. Осылайша, біз оқу-зерттеу қызметі ғылыми сипатта екенін көреміз. Ғылыми-зерттеу қызметі □ бұл ғылыми жұмысты жүргізудің нақты нысаны, яғни объектіні, процесті, құбылысты, олардың құрылымын, байланыстары мен қатынастарын олар туралы әлі белгісіз білім алу және осы білімді практикалық қызметте одан әрі пайдалы пайдалану мақсатында ғылымда жасалған таным принциптері мен әдістеріне негізделген жан-жақты, сенімді зерттеу.

Зерттеу жобалары мен тапсырмаларын орындау барысында студент белгілі бір зерттеу дағдыларын игереді:

-ғылыми әдебиеттермен жұмыс істеу, қажетті ақпаратты іріктеу және талдау, зерттеу мәселесін көру, гипотеза жасау, ұғымдарға анықтама беру, ойларды жазбаша және ауызша түрде дәлелді және қисынды түрде жеткізу, қызмет алгоритмдерін дербес құру, егжей-тегжейлі дәлелдер келтіру;

- олардың жетістіктерін объективті бағалау;

- жыл сайынғы ғылыми-практикалық конференцияларға қатыса отырып, күш-жігерді алынған қызмет нәтижелерімен байланыстыру, жеке дүниетанымдық көзқарастарды қорғау.

Бейнематериалдарды, компьютерлік презентацияларды пайдалана отырып, арнайы пәндер сабақтарын өткізу □ оқудағы қуатты ынталандыру. Осындай сабақтар арқылы студенттердің психикалық процестері белсендіріледі:

- қабылдау, зейін, есте сақтау, ойлау;

- танымдық қызығушылықтың қозуы әлдеқайда белсенді және тезірек жүреді.

Ақпараттық технологиялар ақпаратты әртүрлі нысандарда ұсынады және осылайша оқу процесін тиімдірек етеді. Белгілі бір материалды зерттеуге кететін уақытты үнемдеу орташа есеппен 30 % құрайды, ал алынған білім жадта едәуір ұзағырақ сақталады. Осылайша, ақпараттық-коммуникациялық технологияларды (АКТ) дұрыс таңдалған оқыту технологияларымен бірге қолдану оқыту сапасының, өзгергіштігінің, дифференциациясының және даралануының қажетті деңгейін жасайды [3, 4].

Осыған байланысты келесі тұжырымдар жасауға болады және мұндай сабақтың қарапайымға қарағанда бірқатар артықшылықтарын атап өтуге болады:

-жаңа материалды игеру жақсарады, өйткені көрнекі-бейнелі ойлаудың басым болуының

нәтижесінде студенттер осылайша берілген ақпаратты оңай қабылдайды;

-жұмыс барысында студенттерде кеңістіктік және логикалық ойлау қалыптасады;

-табиғи түрде білім алушылардың жұмыс қарқынын оңтайландыруға қол жеткізіледі;

-компьютерлік анимацияның көмегімен сабақта проблемалық жағдай туғызуға мүмкіндік бар, нәтижесінде сабақ оқу ойынының сипатына ие болады және студенттердің көпшілігі оқу іс-әрекетінің мотивациясын арттырады.

Кәдімгі сабақты компьютермен біріктіру оқытушыға өз жұмысының бір бөлігін компьютерге ауыстыруға мүмкіндік береді, сонымен бірге оқу процесін қызықты, әртүрлі, қарқынды етеді. Атап айтқанда, анықтамаларды, тапсырмаларды және материалдың басқа да маңызды бөліктерін жазу процесі жылдамырақ болады, өйткені мұғалім мәтінді бірнеше рет қайталамауы керек (ол оны экранға шығарды), студент өзіне қажет фрагменттің қайталануын күтудің қажеті жоқ. Мұның бәрі компьютерлік презентацияларды қолданатын сабақтың әдеттегі сабаққа қарағанда тиімділігі жоғары екенін көрсетеді [4].

Жоғары білім берудің негізгі міндеті студенттерді алдағы еңбек қызметіне, оның ішінде жоғары буын басшысына даярлау.

Жұмысқа дайындық, бір жағынан, білім негіздерімен қарулануды, екінші жағынан кәсіби дағдыларды қалыптастыруды қамтиды. Маман өз жұмысын жоспарлай білуі, қазіргі жағдайды талдау негізінде жедел шешімдер қабылдай білуі, есептеулер жүргізе білуі, өз жұмысының барысы мен нәтижелерін бақылай білуі керек.

Іскерліктер іс-әрекет процесінде қалыптасады. Осы немесе басқа шеберлікті дамыту үшін әрекеттерді, жаттығуды бірнеше рет қайталау қажет. Дағдыларды қалыптастыру студенттердің тиісті тапсырмаларды бірнеше рет орындау процесінде жүреді: тапсырмалар, жаттығу сынақтары, әртүрлі есептеулер, жағдайларды талдау.

Дағдыларды қалыптастыруға бағытталған инновациялық технологиялардың мәні студенттердің осындай міндеттерді орындауын қамтамасыз ету болып табылады, оларды шешу барысында олар қызмет тәсілдерін игереді.

Мұның бәрі инновациялық оқытудың жетекші функциялары деп санауға болады деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді:

-студент пен оқытушы тұлғасының қарқынды дамуы;

-олардың бірлескен қызметі мен қарым-қатынасын демократияландыру;

-оқу-тәрбие процесін ізгілендіру;

-шығармашылық оқытуға және белсенді оқытуға бағдарлану, студенттің өзін болашақ маман ретінде қалыптастырудағы бастамасы;

-болашақ маманның инновациялық ойлауын қалыптастыруға ықпал ететін оқыту құралдарын, әдістерін, технологиялары мен материалдық базасын жаңғырту [5].

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижелері бейіндік пәндерді оқытуда инновациялық технологияларды қолданудың білім беру үдерісінің тиімділігіне оң әсер ететінін көрсетті. Оқыту барысында ақпараттық-коммуникациялық технологияларды, жобалау әдісін, тұлғаға бағытталған және ынтымақтастықта оқыту технологияларын жүйелі қолдану студенттердің оқу мотивациясын арттырып, олардың танымдық белсенділігін күшейтеді. Сонымен қатар, білім алушылардың теориялық білімді тәжірибелік міндеттерді шешуде қолдану қабілеті, сыни ойлауы, шығармашылық ізденісі және кәсіби құзыреттілігі дамиды.

Инновациялық білім беру технологиялары күрделі педагогикалық жүйе болып табылады және жүйелілік, тұтастық, ғылымилық, икемділік сияқты негізгі қасиеттерімен ерекшеленеді. Бұл технологиялар білім беру мазмұнын жаңғыртуға, оқыту әдістерін жетілдіруге және студенттердің жеке білім алу траекториясын қалыптастыруға мүмкіндік береді. Олардың құрылымы өзара байланысты әдістерді, құралдарды және оқыту формаларын біріктіріп, оқу үдерісінің барлық кезеңдерінде тиімді нәтижеге қол жеткізуге бағытталған.

Зерттеу барысында инновациялық технологияларды қолдану студенттердің өздігінен білім алу дағдыларын қалыптастырып, ақпаратты іздеу, талдау, жүйелеу және оны кәсіби қызметте қолдану қабілеттерін жетілдіретіні анықталды. Әсіресе, компьютерлік тестілеу, мультимедиялық презентациялар және электрондық білім беру ресурстары оқу материалын меңгеру сапасын арттырып, білімді бақылаудың объективтілігін қамтамасыз етеді..

ҚОРЫТЫНДЫ

Осылайша, инновациялық технологияларды қолдану студенттерді белсенділікті арттыруға, олардың пәнді оқуға қызығушылығы мен қызығушылығын арттыруға ынталандыруға мүмкіндік береді, өзін-өзі тәрбиелеуге және шығармашылық әлеуетті ашуға ықпал етеді, нәтижесінде оқытудың тиімділігі артады, сонымен қатар практикалық іс-әрекет дағдыларын қалыптастыруға, коммуникативтік

дағдыларды дамытуға, кәсіби дайындық деңгейін арттыруға ықпал етеді.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар осы зерттеуді жүргізу, алынған нәтижелерді талдау және мақаланы жариялау барысында қандай да бір қаржылық, ғылыми, кәсіби немесе жеке мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді. Зерттеу нәтижелеріне әсер етуі мүмкін үшінші тараптардың ықпалы болған жоқ.

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Азимбаев К.А. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, ғылыми әдебиеттерді талдау, зерттеу әдіснамасын қалыптастыру, материалдарды жинақтау және талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. Камарова А.Р. – зерттеу нәтижелерін талдау және түсіндіру, мақаланы ғылыми редакциялау, қолжазбаны рецензиялау және оның соңғы нұсқасын жариялауға дайындау. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығы мен жарияланған материалдың ғылыми мазмұны үшін ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді орындауға көрсеткен ғылыми, әдістемелік және ұйымдастырушылық қолдауы үшін Қарағанды индустриялық университетіне (Теміртау қ., Қазақстан) алғыс білдіреді. Сонымен қатар, зерттеуді жүзеге асыру барысында қолайлы ғылыми орта қалыптастырып, кәсіби қолдау көрсеткен университет ұжымына ризашылықтарын 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.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Митина Л.М. Жаңа әлеуметтік-экономикалық жағдайларда адамның жеке және кәсіби дамуы. Психология: тұлға және бизнес. [Электрондық ресурс]. Қол жеткізу режимі: [https://hr-portal.ru / article / lichnostnoe-i-professionalnoe-razvitie-cheloveka-v-novyh-socialno-ekonomicheskikh-sloviyah](https://hr-portal.ru/article/lichnostnoe-i-professionalnoe-razvitie-cheloveka-v-novyh-socialno-ekonomicheskikh-sloviyah)
- [2] Педагогикалық шеберлік және педагогикалық технологиялар: Оқу құралы / Ред. Л.К. Гребенкиной, Л.А. Байковой. – 3-ші бас., түзет. және қос. – М.: Ресейдің педагогикалық қоғамы, 2000. – 187 с.
- [3] Исаев И.Ф. Оқытушының кәсіби-педагогикалық мәдениеті / И.Ф. Исаева. – Жоғары оқу орын. арнал. оқу құралы. – Академия, 2004. – 218 с.
- [4] Никулина Н.Ф. Оқытушының инновациялық қызметін қалыптастыру / Н.Ф. Никулина / Маман. – 2002. – 178 с.
- [5] Шумилова Н.Н. Мамандарды даярлау сапасын басқару / Н.Н. Шумилова / Маман. – 2007. – 189 с.

REFERENCES

- [1] Mitina L.M. Zhaña äleumettik-ekonomikalyq jaǵdailarda adamnyñ jeke jäne käsibi damuy. Psikhologiya: tulǵa jäne biznes. [Elektrondyq resurs]. Qol jetkizu rejimi: <https://hr-portal.ru/article/lichnostnoe-i-professionalnoe-razvitie-cheloveka-v-novyh-socialno-ekonomicheskikh-sloviyah>
- [2] Pedagogical skills and pedagogical technologies: A textbook / Edited by L.K. Grebenkina, L.A. Baykova. – 3rd ed., ispr. and add. – M.: Pedagogical Society of Russia, 2000. – 187 s.
- [3] Isaev I.F. Professional and pedagogical culture of a teacher / I.F. Isaeva. – Textbook for higher education. Head of the Academy, 2004. – 218 s.
- [4] Nikulina N.F. Formation of innovative activity of a teacher / N.F. Nikulina / Specialist. – 2002. – 178 s.
- Shumilova N.N. Quality management of specialist training / N.N. Shumilova / Specialist. – 2007. – 189 s

МАШИНА ЖАСАУ, ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ МАШИНАЛАР ЖӘНЕ КӨЛІК, ҚҰРЫЛЫС

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/069>

SMART TECHNOLOGIES IN OIL TANKS MANAGEMENT

* ¹Murtazaev K.N., ¹Maikenov A.E., ²Sladkovsky A.V.

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

²Silesian University of Technology, Польша

* Corresponding author e-mail: k.murtazayev@tttu.edu.kz

Author information:

Муртазаев К.Н. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: k.murtazayev@tttu.edu.kz

Майкенов А.Е. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: a.maykenov@tttu.edu.kz

Сладковский А.В. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: aleksander.sladkowski@polsl.pl

Abstract. Hydraulic cylinders are widely used in industrial equipment and working machines. Their undoubted advantages include the achievement of high strength or torque with a compact design of transmission mechanisms, the ability to work in various environmental conditions, durability and reliability, a high level of fire safety.

Keywords: software, development, hydraulic, cylinders, large dimensions, optimization.

МҰНАЙ БАЛЛОНДАРЫН БАСҚАРУДАҒЫ АҚЫЛДЫ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

* ¹Муртазаев К.Н., ¹Майкенов А.Е., ²Сладковский А.В.

¹Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

²Silesian University of Technology, Польша

* Автор-корреспондент e-mail: k.murtazayev@tttu.edu.kz

Авторлар туралы ақпарат:

Муртазаев К.Н. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: k.murtazayev@tttu.edu.kz

Майкенов А.Е. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: a.maykenov@tttu.edu.kz

Сладковский А.В. - Silesian University of Technology, Польша. E-mail: aleksander.sladkowski@polsl.pl

Аңдатпа. Гидравликалық цилиндрлер өнеркәсіптік жабдықтар мен жұмыс машиналарында кеңінен қолданылады. Олардың сөзсіз артықшылықтарына беріліс механизмдерінің ықшам конструкциясымен жоғары күшке немесе айналу моментіне қол жеткізу, әртүрлі экологиялық жағдайларда жұмыс істеу мүмкіндігі, ұзақ мерзімділік пен сенімділік, өрт қауіпсіздігінің жоғары деңгейі жатады.

Түйін сөздер: бағдарламалық қамтамасыз ету, әзірлеу, гидравликалық, цилиндрлер, үлкен өлшемдер, оптимизация.

УМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ НЕФТЯНЫМИ БАЛЛОНАМИ

¹Муртазаев К.Н., ¹Майкенов А.Е., ³Сладковский А.В.

¹Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

²Silesian University of Technology, Польша

* Автор-корреспондент e-mail: k.murtazayev@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Муртазаев К.Н. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: k.murtazayev@tttu.edu.kz

Майкенов А.Е. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: a.maykenov@tttu.edu.kz

Сладковский А.В. - Silesian University of Technology, Польша. E-mail: aleksander.sladkowski@polsl.pl

Аннотация. Гидроцилиндры широко используются в промышленном оборудовании и рабочих машинах. К их несомненным достоинствам можно отнести достижение высокой силы или крутящего момента при компактной конструкции зубчатых механизмов, возможность работы в различных экологических условиях, долговечность и надежность, высокий уровень пожарной безопасности.

Ключевые слова: программное обеспечение, разработка, гидравлические, цилиндры, большие размеры, оптимизация.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Гидравликалық цилиндрлердің құрылымдық ерекшеліктері мен оларды басқаруда қолданылатын заманауи интеллектуалды технологияларға кешенді талдау жүргізіліп, гидравликалық жүйелердің тиімділігіне әсер ететін негізгі факторлар ғылыми тұрғыдан негізделді. Дірілдің гидравликалық цилиндрлердің сенімділігіне, басқару дәлдігіне және пайдалану қауіпсіздігіне ықпалы анықталып, оны азайтуға бағытталған конструкциялық және басқару шешімдерінің тиімділігі көрсетілді. Сонымен қатар, интеллектуалды сенсорлар мен бейімделетін басқару алгоритмдерін қолдану гидравликалық жүйелердің жұмыс сенімділігін, энергия тиімділігін және пайдалану ұзақтылығын арттырудың перспективалы бағыты екені дәлелденді.

ВВЕДЕНИЕ

Гидравликалық цилиндрлер, гидравликалық жүйелердің негізгі құрамдас бөліктері гидравликалық энергияны механикалық қозғалысқа айналдырады. Бұл құрылғылар құрылыс, өндіріс және аэроғарыш өнеркәсібін қоса алғанда, көптеген салаларда маңызды рөл атқарады, мұнда олар әртүрлі машиналар мен құрылымдарға сызықтық күш пен қозғалысты қамтамасыз етеді [1-3]. Гидравликалық цилиндрлердің негізгі жұмысы цилиндрлік камерада поршеньді жылжытатын күшті жасау үшін қысымды гидравликалық сұйықтықты, әдетте майды пайдалану болып табылады. Бұл қарапайым, бірақ күшті механизм ауыр машина жасау мен автоматтандыруды дамытуда маңызды рөл атқарды және өнеркәсіптік прогреске елеулі үлес қосты.

Интеллектуалды сенсорлар мен басқару жүйелерін гидравликалық цилиндрлерге біріктіру соңғы жылдары айтарлықтай жетістік болды. Бұл интеллектуалды жүйелер қысым, температура және жүктеме сияқты жұмыс жағдайларын нақты уақытта бақылауға мүмкіндік береді. Бұл деректерді жинау және талдау арқылы зерттеушілер нақты уақытта цилиндр жұмысын оңтайландыратын адаптивті басқару

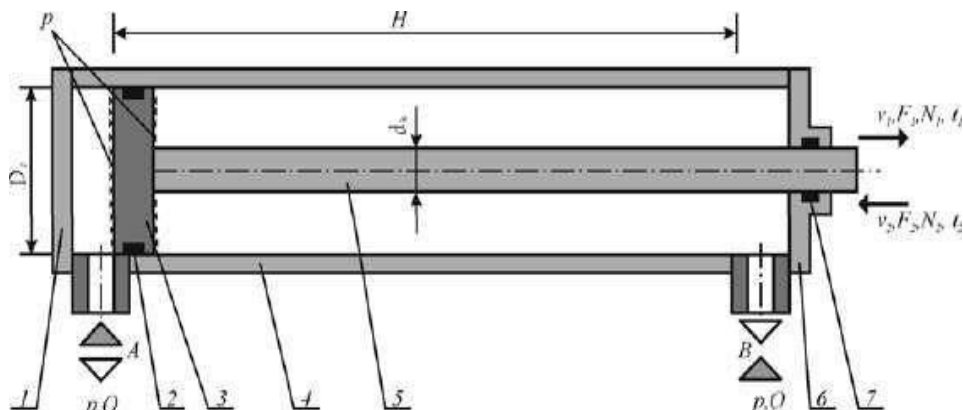
алгоритмдерін жасай алады. Бұл тек тиімділікті ғана емес, сонымен қатар қауіпсіздік пен сенімділікті арттырады, профилактикалық қызмет көрсетуге және ықтимал ақауларды ерте анықтауға мүмкіндік береді. Оңтайландырудың тағы бір бағыты - экологиялық таза гидравликалық сұйықтықтарға көшу. Зерттеушілер дәстүрлі минералды майлармен салыстырылатын өнімділік сипаттамаларын ұсынатын биологиялық ыдырайтын және улы емес гидравликалық сұйықтықтарды әзірлеуде. Бұл экологиялық таза сұйықтықтар қоршаған ортаға әсерді азайтады және гидравликалық жүйелердің ұзақ қызмет ету мерзімін арттырады. Сонымен қатар, сұйықтықтың тұтқырлығы мен жылу қасиеттерін оңтайландыру гидравликалық цилиндрдің тиімділігі мен жауап беру уақытын жақсартуға мүмкіндік береді.

Гидравликалық цилиндрлердің дизайнын оңтайландыру материалдардағы, өндірістегі, есептеу талдаулары мен интеллектуалды жүйелердегі инновациялар арқылы айтарлықтай жетістіктерге жетті. Бұл әзірлемелер тиімдірек, берік және экологиялық таза гидравликалық цилиндрлерге әкелді.

Зерттеулер жалғасуда, цифрлық технологиялар мен тұрақты тәжірибелерді біріктіру гидравликалық жүйелердің өнімділігі мен ұзақ мерзімділігін одан әрі жақсартады, олардың заманауи өнеркәсіптік қолданбалардағы рөлін арттырады. 1-суретте электр берілісінің негізгі схемасы көрсетілген. Гидростатикалық күш (P , Q) байланыстырушы саңылауларға (A , B) кезекпен беріледі. Механикалық қуаттың берілуі (F , N) қозғалыстың екі бағытында да, поршень

бетіндегі айырмашылыққа (айырмаға) байланысты, әртүрлі жылдамдықта (v_1, v_2) және бірдей жылдамдықта, гидравликалық жүйеде қосымша құрылғылар орнату арқылы жүзеге

асырылады. Соңғы позицияларда қозғалысты біркелкі тоқтату үшін, әсіресе үлкен күштерді беру кезінде амортизатор элементтерін орнату қажет.



1- сурет. (1) Артқы қаппен. (2) Поршеньді тығыздағыш. (3) Поршень. (4) Цилиндрлік түтік. (5) Поршеньдік штанга. (6) Алдыңғы қаппен. (7) Поршеньдік штанганың тығыздағышы.

2- суретте су электр станцияларындағы гидравликалық жүйелер үлкен вентильдер мен құрылымдарды дәл жылжыту үшін дәл бақылауды қажет етеді. Діріл гидравликалық цилиндрлердің бірқалыпты жұмысына кедергі

келтіріп, тайғақ немесе дәл емес қозғалыстарды тудыруы мүмкін. Бұл су ағынын бақылайтын клапандарды дәл орналастыру кезінде әсіресе қиын болуы мүмкін.



Сурет 2. Тұтқаны бар сегменттік құлыптау цилиндры.

Бөгет жайылымдарындағы 5 сегменттік қақпаларды және құрылымға кіре берістегі 4 жоғары жылдамдықты турбиналық қақпаларды басқарудың электрогидравликалық жүйелері.

Тұрақты діріл гидравликалық жетек жүйесінің құрылымдық бөліктерінің шаршауын тудыруы мүмкін. Уақыт өте келе бұл жүйенің құрылымдық тұтастығын әлсіретіп, оны жарықтар мен істен шығуға бейім етеді. Бұл әсіресе клапанның немесе құрылымның істен шығуы қауіпсіздік пен пайдаланудың елеулі салдары болуы мүмкін су электр станцияларында өте маңызды.

Діріл гидравликалық жүйелерде шудың пайда болуына ықпал етеді. Су электр станцияларындағы шамадан тыс шу жұмысшылардың қауіпсіздігі мен жайлылығы үшін ғана емес, сонымен қатар экологиялық себептерге байланысты, әсіресе шудың ластануы минималды болуы керек табиғи ортада орналасқан қондырғыларда қолайсыздық тудыруы мүмкін [4].

Сондықтан поршеньді сорғы дірілінің әсерін бақылау су электр станцияларындағы гидравликалық цилиндрлердің тиімді және сенімді жұмысы үшін өте маңызды. Дизайнды жетілдірудің, техникалық қызмет көрсету әдістерінің және жетілдірілген бақылаудың үйлесімі арқылы ауыр есіктер мен құрылымдардың қауіпсіз және тиімді қозғалысын қамтамасыз ете отырып, дірілдің теріс әсерін айтарлықтай азайтуға болады.

Діріл гидравликалық жүйедегі сұйықтық динамикасына әсер етуі мүмкін. Олар қысым мен ағынның ауытқуын тудыруы мүмкін, бұл кавитацияға әкелуі мүмкін - гидравликалық сұйықтықта ауа көпіршіктерінің пайда болуы. Кавитация ішкі компоненттерді зақымдауы және гидравликалық цилиндрлердің жұмысын нашарлатуы мүмкін.

Қазіргі заманғы гидравликалық жүйелер гидравликалық цилиндрлердің жұмысын басқару үшін жиі күрделі басқару жүйелерін пайдаланады. Діріл сенсорлардың жұмысына кедергі келтіруі және кері байланыс тудыруы мүмкін, бұл басқару жүйесіндегі тұрақсыздыққа әкеледі. Бұл қозғалатын есіктер мен құрылымдардың тұрақсыз жұмысына әкелуі мүмкін.

Гидравликалық сорғылар гидравликалық цилиндрлердің жұмысын қамтамасыз ететін маңызды компоненттер болып табылады, әсіресе үлкен және қуатты жүйелерде. Олар қажетті гидравликалық қуатты өндіреді, сұйықтықтың ағыны мен қысымын реттейді, әртүрлі

салалардағы гидравликалық жабдықтың тиімді және сенімді жұмысын қамтамасыз етеді.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі ғылыми зерттеулерде гидравликалық цилиндрлердің құрылымдық ерекшеліктері, жұмыс принциптері және басқару жүйелерінің жекелеген аспектілері кеңінен қарастырылғанымен, интеллектуалды басқару технологияларын гидравликалық цилиндрлердің пайдалану тиімділігі мен сенімділігін арттыру тұрғысынан кешенді бағалау жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сонымен қатар, дірілдің, жүктеме өзгерістерінің және пайдалану жағдайларының гидравликалық жетектің жұмысына әсерін ескере отырып, интеллектуалды басқару жүйелері мен конструкциялық шешімдердің оңтайлы үйлесімін ғылыми негіздеу мәселесі толық шешімін таппаған. Сондықтан аталған зерттеу гидравликалық цилиндрлерді басқарудағы интеллектуалды технологиялардың тиімділігін бағалауға және оларды өнеркәсіптік жүйелерде қолданудың ғылыми негіздерін жетілдіруге бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы гидравликалық цилиндрлерді басқаруда қолданылатын интеллектуалды технологияларды, олардың құрылымдық ерекшеліктері мен жұмыс тиімділігіне әсерін кешенді түрде талдауында. Зерттеу нәтижесінде интеллектуалды сенсорлар мен бейімделетін басқару алгоритмдерін қолданудың гидравликалық цилиндрлердің жұмыс дәлдігін, сенімділігін және энергия тиімділігін арттыратыны ғылыми негізделді. Сонымен қатар, дірілдің және динамикалық жүктемелердің әсерін азайтуға бағытталған заманауи басқару тәсілдерінің техникалық тиімділігі көрсетіліп, оларды өнеркәсіптік гидравликалық жүйелерде қолданудың перспективалылығы дәлелденді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Жұмыстың негізі ретінде гидравликалық цилиндрлердің құрылымдық ерекшеліктеріне, жұмыс істеу принциптеріне және оларды басқаруда қолданылатын интеллектуалды технологияларға аналитикалық талдау жүргізілді. Зерттеу барысында гидравликалық цилиндрлердің өнеркәсіптік жабдықтарда қолданылу ерекшеліктері, олардың сенімділігі мен пайдалану тиімділігіне әсер ететін факторлар, сондай-ақ дірілдің гидравликалық жүйелердің жұмысына ықпалы қарастырылды.

Талдау барысында гидравликалық цилиндрлердің негізгі конструкциялық элементтері, гидравликалық сұйықтықтың қозғалыс принципі, күш пен қозғалысты беру

ерекшеліктері зерттелді. Сонымен қатар, гидравликалық жетектердің жұмыс тиімділігін арттыру мақсатында интеллектуалды сенсорлар, бейімделетін басқару алгоритмдері және цифрлық бақылау жүйелерін қолдану мүмкіндіктері бағаланды.

Зерттеу әдістемесі ретінде ғылыми әдебиеттерге салыстырмалы талдау, гидравликалық жүйелердің жұмыс принциптерін теориялық зерттеу және қазіргі заманғы инженерлік шешімдерді жүйелі талдау әдістері пайдаланылды. Алынған нәтижелер гидравликалық цилиндрлердің жұмыс сенімділігін арттыруға, дірілдің теріс әсерін төмендетуге және интеллектуалды басқару технологияларын өнеркәсіптік гидравликалық жүйелерге енгізудің тиімділігін ғылыми тұрғыдан негіздеуге мүмкіндік береді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе, гидравликалық цилиндрлер заманауи техника мен өндірістің ажырамас бөлігі болып қала береді. Олардың сенімділігі, жоғары қуаттылығы және дәлдігі көптеген салалардағы күрделі инженерлік міндеттерді шешуге мүмкіндік береді. Соңғы жылдардағы интеллектуалды сенсорлар мен басқару жүйелерін енгізу, экологиялық таза сұйықтықтарға көшу және дірілге қарсы жаңа технологияларды пайдалану гидравликалық жүйелердің тиімділігі мен ұзақ мерзімділігін айтарлықтай арттыруда. Бұл бағыттағы зерттеулер мен инновациялар тек өндірістік өнімділікті жақсартып қана қоймай, сонымен бірге қауіпсіздік деңгейін көтеруге, экологиялық әсерді азайтуға және энергетикалық ресурстарды үнемдеуге ықпал етеді. Демек, гидравликалық цилиндрлерді жетілдіру бойынша ғылыми және инженерлік ізденістер өнеркәсіптің тұрақты

дамуы мен технологиялық прогресінің негізгі факторларының бірі болып табылады.

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

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): **К.Н. Муртазаев** – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, зерттеу әдіснамасын қалыптастыру, зерттеуді жүргізу, нәтижелерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. **А.Е. Майкенов** – бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеу, модельдеу, мәліметтерді жинақтау және өңдеу, нәтижелерді визуализациялау, мақаланы редакциялау. **А.В. Сладковский** – ғылыми жетекшілік, зерттеу әдіснамасын жетілдіру, нәтижелерді тексеру, ғылыми редакциялау және зерттеу нәтижелерін интерпретациялау. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығына ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Қарағанды индустриялық университетіне және Silesian University of Technology университетіне алғыс 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.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1].Криссолоурис, Г. Производственные системы: теория и практика, Springer Science and Business Media, Inc.: Нью-Йорк, США, 2006;
- [2].Банашек, А., Петрович, Р., Анжелкович, М., Радосавлевич, М. Концепция эффективности двухнасосного гидравлического силового агрегата с насосами, оснащенными регуляторами постоянного давления с различными линейными рабочими характеристиками. Энергии 2022, 15, 8100;
- [3].Лесневский, Т., Стосяк, М., Любецкий, М., Кравчик, Дж. Износостойкость некоторых противоутечных покрытий, используемых в многокомпонентных композитных гидроцилиндрах. Авиация 2022, 26, 3

REFERENCES

- [1] Krissolouris, G. Production Systems: Theory and Practice, Springer Science and Business Media, Inc.: New York, USA, 2006;
- [2] Banashek, A., Petrovich, R., Angelkovich, M., Radosavljevic, M. Efficiency concept of a two-pump hydraulic power unit with pumps equipped with constant pressure regulators with various linear operating characteristics. Energy 2022, 15, 8100;
- [3] Lesnevsky, T., Stosyak, M., Lyubetsky, M., Kravchik, J. Wear resistance of some anti-leakage coatings used in multicomponent composite hydraulic cylinders. Aviation 2022, 26, 3

МАШИНА ЖАСАУ, ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ МАШИНАЛАР ЖӘНЕ КӨЛІК, ҚҰРЫЛЫСDOI: <https://www.doi.org/10.53002/070>**APPLICATION OF THE FINITE DIFFERENCE METHOD FOR DETERMINING ENERGY AND POWER PARAMETERS IN METAL PRESSURE TREATMENT**** Ашкеев Ж.А., Аманжолов Н.Ж.**Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan
* Corresponding author e-mail: s.kydyrbayeva@tttu.edu.kz***Author information:****Ашкеев Ж.А.** - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: Jashkeev@mail.ru**Аманжолов Н.Ж.** - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: zh.amanzholov@tttu.edu.kz

Abstract. The article discusses the use of the limit Difference Method to determine the distribution of normal stresses on the joint surface of the deformable body and the selection of the required equipment in the development of processes for pressure processing of metals and the selection of the required equipment. In determining the distribution of normal stresses during the planting process, he used the method of marginal difference (SHP), including differential equilibrium equations and the method of solving the plastic condition in combination with an approximate solution. When solving differential equations using the limit difference method, it is enough to bring the equation to the limit difference type. Then the values of the voltages can be easily determined by calculating them in series, without using complex mathematical methods of integration and differentiation. The difference in the results obtained by these two methods or by solving approximations in combination with differential equilibrium equations and the plasticity condition and the ICA is very small and does not exceed 1-2%. Therefore, these two methods can be used equally in determining the strength and energy parameters of PPP processes.

Keywords: pressure processing of metals, limit difference method, workpiece, tool, stresses, deformation.

МЕТАЛДАРДЫ ҚЫСЫММЕН ӨНДЕУ ҮРДІСТЕРІНДЕ КҮШ-ЭНЕРГИЯ ПАРАМЕТРЛЕРІН АНЫҚТАУ ҮШІН ШЕКТІ АЙЫРМАШЫЛЫҚ ӘДІСІН ҚОЛДАНУ** Ашкеев Ж.А., Аманжолов Н.Ж.**Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан
* Автор-корреспондент e-mail: Jashkeev@mail.ru***Авторлар туралы ақпарат:****Ашкеев Ж.А.** - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: Jashkeev@mail.ru**Аманжолов Н.Ж.** - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: zh.amanzholov@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Мақалада металдарды қысыммен өңдеу (МҚӨ) үрдістерін әзірлеуде және талап етілетін жабдықтарды таңдауда деформацияланатын дененің түйіскен бетінде нормальді кернеулердің таралуын анықтау және талап етілетін жабдықтарды таңдау үшін шекті айырмашылық әдісі қолдануы қарастырылды. Отырғызу үрдісі кезінде нормальді кернеулердің таралуын анықтауда дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерімен және пластикалық шартың біріктіріп жуықтап шешу әдісімен қоса шекті айырмашылық әдісі (ШАӘ) қолданды. Шекті айырмашылық әдісі арқылы дифференциалдық теңдеулерінің шешімін алғанда теңдеуді шекті айырмашылық түріне келтірілген жеткілікті. Сонда кернеулердің мәндерін тізбектеп есептеп жеңіл анықтауға болады, күрделі математикалық интегралдау және дифференциялау тәсілдерін қолданбай. Осы екі әдіспен немесе дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерімен және пластикалық шарты біріктіріп жуықтап шешу және ШАӘ арқылы алынған нәтижелерінің айырмашылығы өте аз және 1-2 % аспайды. Сондықтан осы екі әдісті МҚӨ үрдістерінің күш-энергия параметрлерін анықтауда тең құқықты қолдануға болады.

Түйін сөздер: металдарды қысыммен өңдеу, шекті айырмашылық әдісі, дайындама, аспап, кернеулер, деформация.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГО-СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ В ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Ашкеев Ж.А., Аманжолов Н.Ж.

Қарағандық индустриальдық университет, Теміртау, Қазақстан

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

Информация об авторах:

Ашкеев Ж.А. - Қарағандық индустриальдық университет, Теміртау, Қазақстан. E-mail: Jashkeev@mail.ru

Аманжолов Н.Ж. - Қарағандық индустриальдық университет, Теміртау, Қазақстан. E-mail: zh.amanzholov@tttu.edu.kz

Аннотация. В статье приведены результаты, полученных методом конечных разностей (МКР) для определения распределения контактных напряжений на поверхности полосы и деформируемого инструмента при обработке металлов давлением (ОМД), в частности осадке заготовок и выборе необходимого оборудования. Помимо использования метода совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности для определения контактных напряжений при осадке полосы, использован МКР, как альтернативное решение. Для решения дифференциальных уравнений МКР достаточно привести уравнение в конечно-разностный ряд. Таким образом появляется возможность последовательно и легко определить распределение контактных напряжений не прибегая к сложным математическим действиям, как интегрирование и дифференцирование. Расчёты полученные двумя методами, т.е. совместным решением дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности и МКР не превышает 1-2%. Поэтому использование двух методов при определении энергосиловых параметров при ОМД можно считать равноправными.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, метод конечных разностей, заготовка, инструмент, напряжения, деформация.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Металдарды қысыммен өңдеу үрдістерінде күш-энергия параметрлерін анықтау үшін дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерін шешудің дәстүрлі әдісі мен шекті айырмашылық әдісіне салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде шекті айырмашылық әдісін қолдану күрделі интегралдау және дифференциалау амалдарынсыз-ақ деформацияланатын дененің түйісу бетіндегі нормальді кернеулердің таралуын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік беретіні дәлелденді. Есептеу нәтижелерінің айырмашылығы дәстүрлі аналитикалық әдіспен салыстырғанда 1–2 %-дан аспайтыны көрсетіліп, шекті айырмашылық әдісінің металдарды қысыммен өңдеу үрдістерінің күш-энергия параметрлерін есептеуде тиімді әрі инженерлік тәжірибеде қолдануға қолайлы екендігі ғылыми негізделді.

КІРІСПЕ

Металдарды қысыммен өңдеу (МҚӨ) үрдістерін әзірлеуде және талап етілетін қажет жабдықтарды таңдауда деформацияланатын дене аспаппен түйісетін бетінде күштерді немесе нормальді кернеулердің таралуын білу қажет. Осы кернеулердің қосындысын алып, толық күшін анықтап және келесі сипатамалары бойынша: претің номиналды күші, илемдеу станың қозғалтқыштарының қуаты және т.б.

көрсеткіштері бойынша қажет жабдықтарды таңдауға болады.

Деформациялайтын күшін анықтау үшін МҚӨ теориясында кеңінен аналитикалық және тәжірибелік әдістерін қолданады. Бірінші теоретикалық жағдайда әсер ететін күштер деформацияланатын металмен түйісетін аспап бетінде нормальді және жанама кернеулерін таралуын орнатып анықтайды.

Міне осы аналитикалық ең кең таралған әдістерінің бірі дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерімен және пластикалық шарты біріктіріп жуықтап шешу әдісі болып табылады.

Бұл әдіс келесілерге негізделген:

1. кернеулі-деформациялық күйі жазық немесе оске симметриялы етіп қабылданады. Сонда теңдеулер санымен оның белгісіз мәндері қысқарады. Ол үшін күрделі пішінді денені деформациялауда оны шартты түрде элементарлы көлемдеріне бөледі, аймағында кернеулі-деформациялық күйін жазық немесе оске симметриялы етіп қабылданды.

2. Жазықтық есептердің дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулері нормальді және жанама кернеулері екі координатасына тәуелді етіп қабылданады, нәтижесінде сәйкес екі дифференциалдық теңдеулері ғана қалады.

Бірақ осы қабылданған шарттар деформацияланатын дененің бойындағы кез келген нүктедегі кернеулерін анықтауға

мүмкіндік бермейді, мысалы сырғу сызықтары әдісімен салыстырғанда. Сондықтан берілген әдіспен деформациялайтын аспап пен дененің түйіскен бетіндегі кернеулерді және осы мәндердің қосындысын алып талап ететін күшін анықтауға болады [1-2]

Зерттеудің маңыздылығы. Металдарды қысыммен өңдеу (МҚӨ) үрдістерін жобалауда және қажетті жабдықтарды (престердің номиналды күші, илемдеу станы қозғалтқыштарының қуаты) таңдауда деформацияланатын дене мен аспаптың түйісу бетіндегі нормальді кернеулердің таралуын дәл анықтау стратегиялық маңызға ие

Қазіргі уақытта қолданылатын дәстүрлі аналитикалық әдістер мен дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулері интегралдау және дифференциалдау сияқты күрделі математикалық есептеулерді талап етеді, бұл инженерлік тәжірибеде айтарлықтай қиындықтар тудырады

Сонымен қатар, есептеулердің дәлдігін сақтай отырып, оларды оңтайландыру мен жеңілдетудің ғылыми негізделген тәсілдері жеткілікті деңгейде қарастырылмаған

Сондықтан аталған зерттеу МҚӨ үрдістеріндегі күш-энергия параметрлерін анықтаудың тиімді әрі қарапайым әдістемесін ұсыну арқылы осы олқылықтың орнын толтыруға бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы металдарды қысыммен өңдеу үрдістерінде, атап айтқанда дайындамаларды отырғызу кезінде контактілік кернеулердің таралуын анықтау үшін шекті айырмашылық әдісін (ШАӨ) қолдануды кешенді түрде негіздеуінде болып табылады

Талдау нәтижесінде дифференциалдық теңдеулерді шекті айырмашылық түріне келтіру арқылы кернеулер мәнін күрделі интегралдаусыз, тізбектей есептеудің техникалық мүмкіндігі дәлелденді

Зерттеу барысында ШАӨ арқылы алынған нәтижелердің дәстүрлі Е. Унков формуласымен салыстырғандағы айырмашылығы 1-2%-дан аспайтыны анықталып, бұл әдістің МҚӨ үрдістерінің күш-энергия параметрлерін анықтауда тең құқықты және жоғары дәлдікті балама екені алғаш рет ғылыми түрде дәлелденді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Енді алдымен дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерімен және пластикалық шарты біріктіріп жуықтап шешу әдісін ені 2b және биіктігі 2h тең, ал ұзындығы шексіз деп қабылдап алынған дайындаманың (жолақтың) екі кедір

бұдыр плита арасында отырғызылғанда мысал ретінде қарастырып кетейік [1-2].

Жоғары келтірілген екінші шартына сәйкес σ_x және σ_y кернеулері z координатасынан тәуелсіз, дайындаманың биіктігі бойынша тұрақты және x координатасына ғана тәуелді етіп қабылдаймыз. Сонда дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерінің үшінші теңдеуі нөлге айналады, нәтижесінде теңделуер саны ықшамдалынып және белгісіз шамалары азаяды.

Жанама τ_{xy} кернеулері дайындаманың ені мен биіктігі бойынша ауыспалы және дене мен аспаптың түйісу бетіндегі τ_k мәніне жетеді. Осы τ_{xy} мәні түйісу бетінен қашықтағанда азаяды және отырғызу үрдісі симметриялығынан дайындаманың биіктігінің ортасында нөлге айналады. Сонда, τ_{xy} мәні дайындаманың h биіктігіне орталығына салыстырмалы тәуелді етіп қабылдауға мүмкіндік береді немесе:

$$\tau_{xy} = \frac{\tau_k}{h} y.$$

Осы теңдеудің y бойынша туындысын алып бірінші дифференциалдық теңдеуіне қойсақ, нәтижесінде келесіні аламыз:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{\tau_k}{h} = 0.$$

Енді осы дифференциалдық теңдеуді σ_x бойынша шешу үшін τ_k мәнін σ_x немесе x координатасы бойынша өрнектеу керек, x және σ_x тәуелсіз етіп қабылдап.

Ол үшін келесі шарттарды қарастырып кетейік:

1. Түйіскен бетіндегі үйкеліс кернеуі Амонтон заңына бағынады деп қабылдайық, онда $\tau_k = f\sigma_y$, мұнда τ_k және σ_y мәндерінің таңбалары бірдей.

Жазықтық деформациялық күйде пластикалық шартының теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$\sigma_x - \sigma_y = \pm 2k \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_{xy}}{k}\right)^2}.$$

Сонда, нормальді кернеулерінің айырмашылығы жанама кернеуінен тәуелді екенін байқауға болады. Егер, τ_{xy} нормальді кернеулерінен тәуелсіз болса, онда нормальді кернеулерінің айырмашылығы тұрақты болады. Мысалы, τ_{xy} және τ_k нөлге тең болса, онда σ_x және σ_y кернеулері бас кернеулеріне айналады және пластикалық шарты келесі түрінде жазылады: $\sigma_x - \sigma_y = \pm 2k$. Егер, τ_{xy} мәні $\tau_k = k$ максималды мәнінен жетсе, онда $\sigma_x - \sigma_y = 0$ болады. Сонда соңғы теңдеуді дифференциалдық түрінде жазуға болады: $d\sigma_x = d\sigma_y$.

Осы қатынасты дифференциалдық теңдеуіне қойсақ, нәтижесінде келесіні аламыз:

$$\frac{d\sigma_y}{dx} + \frac{f\sigma_y}{h} = 0.$$

Ауыспалы мәндерін бөліп интегралын алған соң:

$$\ln\sigma_y = -\frac{f}{h}x + C, \text{ осыдан, } \sigma_y = C_1 e^{-\frac{fx}{h}}.$$

Мұндағы C_1 интегралдау тұрақтылығын келесі шекаралық шартынан анықтаймыз: $x=b$, $\sigma_y = -\beta\sigma_T = -\sigma_T^*$. осыдан,

$C_1 = -\sigma_T^* e^{\frac{fb}{h}}$ және $\sigma_y = -\sigma_T^* e^{\frac{f(b-x)}{h}}$, сәйкесінше жанама кернеуі:

$$\tau_k = f\sigma_y = -f\sigma_T^* e^{\frac{f(b-x)}{h}}.$$

Осы алынған теңдеулері бойынша σ_y және τ_k кернеулерінің таралу эпюрасын тұрғызуға болады және түйіскен бетіндегі нормальді кернеулерінің қосындысын алып, дайындаманың бірлік ұзындығына толық күшін анықтауға болады немесе:

$$P = 2 \int_0^b \sigma_y dx = 2\sigma_T^* \int_0^b e^{-\frac{f(b-x)}{h}} dx = \sigma_T^* \frac{2h}{f} (e^{\frac{fb}{h}} - 1)$$

Толық P күшін $2b$ түйісу ауданына бөліп меншікті p күшін анықтаймыз:

$$p = \frac{P}{2b} = \sigma_T^* \frac{h}{fb} (e^{\frac{fb}{h}} - 1).$$

Осы алынған теңдеуді талдасақ түйісу кернеулері дайындаманың шетінен бастап орталығына қарай көрсеткіштер қисығы бойынша өзгеруін және жанама кернеулері $0,5\sigma^*$ мәнінен асып кетпеуін байқауға болады.

Нормальді кернеулер, толық және меншікті күштер материалдың тегінен, физикалық күйінен немесе температура, деформация дәрежесі мен жылдамдығынан және fb параметрінен тәуелді. Соңғы параметр h кернеулі күйінің әсерін көрсетеді және дайындаманың өлшемдерінің қатынасымен, үйкеліс коэффициентінен байланысты. Дайындаманың үйкеліс коэффициенті мен өлшемдерінің қатынасы неғұрлым көп болса, соғұрлым меншікті және толық күші көп болады.

2. Дәл осылай Зибель шартын ($\tau_k = -f\sigma^*$) және түйіскен жанама кернеулері τ_k дайындаманың түйісу бетіндегі ортылығын сызықты заңы бойынша кесіп өтеді деп қабылдап сәйкес теңдеулерін алып нормальді және жанама кернеулерінің эпюрасын салып толық және меншікті күштерін анықтауға болады.

Сонымен, дайындаманың түйіскен бетіндегі нормальді кернеулерін таралуын орнатып дайындаманы отырғызу кезінде толық күшін анықтауға болады.

Осы әдістен басқадай әдістерін қолдануға болады, мысалы сырғу сызықтары, жұмыс әдісі және т.б. осылардың ішінде тағы бір өте тиімді ыңғайлы әдісіне тоқтап кетейік.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Енді жоғарғы келтірілген дифференциалдық тепе-теңдік әдісін шекті айырмашылық әдісі арқылы шешімін алайық.

Осы ШАӘ әдісі арқылы дифференциалдық теңдеулерін айырмашылық қатынастары арқылы келтіруге мүмкіндік береді. Мысалы, $f(x)$ функциясы берілген деп қабылдайық. Егер, тіркелген аргумент өсімшесінің мәнін Δx етіп қабылдасақ, онда $\Delta f(x)$ функциясының өсімшесі аргумент Δx мәніне өзгергенде келесі түрінде жазылады:

$$\Delta f(x) = f(x+\Delta x) - f(x).$$

Міне осы $\Delta f(x)$ мәні $f(x)$ функцияның бірінші бірінші шекті айырмашылығы болып табылады. Осыған сәйкес n тәртібі бойынша шекті айырмашылығын жазуға болады:

$$\Delta^n f(x) = \Delta(\Delta^{n-1} f(x)), \text{ мұнда } n \geq 2.$$

Егер, екінші шекті айырмашылығын жазсақ, онда:

$$\Delta^2 f(x) = \Delta[f(x+\Delta x) - f(x)] = [f(x+2\Delta x) - f(x+\Delta x)] - [f(x+\Delta x) - f(x)] = f(x+2\Delta x) - 2f(x+\Delta x) + f(x).$$

Сонда, n тәртібінің $\Delta^n f(x)/dx^n$ туындысын шекті айырмашылық арқылы жуықтап келесі түрінде өрнектеуге болады:

$$\frac{d^n}{dx^n} f(x) \approx \frac{\Delta^n f(x)}{(\Delta x)^n}.$$

Осыдан бірінші және екінші туындысын жаза аламыз:

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{\Delta f(x)}{\Delta x} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x};$$

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = \frac{f(x+2\Delta x) - 2f(x+\Delta x) + f(x)}{(\Delta x)^2}.$$

Енді осы әдісті жоғары мысал ретінде келтірілген отырғызу үрдісіне пайдаланып нормальді су кернеуінің таралуын анықтау үшін қолданып және Амонтон заңының негізі бойынша дифференциалдық теңдеуінің шешімін алып көрейік:

$$\frac{d\sigma_y}{dx} + \frac{\tau_k}{h} = 0, \text{ мұнда } \tau_k = f\sigma_y.$$

Ол үшін дайындаманың енін n тең бөліктеріне бөліп және әрбір аралықты (интервалды) s арқылы белгілейік, мұнда $s = \frac{b}{n}$ тең, ал дифференциалдық теңдеуді шекті айырмашылық түрінде келтіруге болады:

$$\left(\frac{d\sigma_y}{dx}\right)_i = \frac{\sigma_{yi} - \sigma_{y(i-1)}}{s} = -\frac{f}{h} \sigma_{yi},$$

мұнда σ_{yi} - қарастырылған i нүктесіндегі нормальді кернеуінің мәні. Нәтижесінде дифференциалдық теңдеуді алгебралық жүйесіне келтіріп жазуға болады:

Мысалы берілген отырғызу үрдісінде $n=3$, $s=\frac{b}{n}$ қабылдайық, мұнда b -дайындаманың ені сонда алгебралық теңдеу жүйесін келесі түрінде жазуға болады:

$$\begin{cases} \frac{3}{b}(\sigma_{y3}-\sigma_{y2})=-\frac{f}{h}\sigma_{y3}; \\ \frac{3}{b}(\sigma_{y2}-\sigma_{y1})=-\frac{f}{h}\sigma_{y2}; \\ \frac{3}{b}(\sigma_{y1}-\sigma_{y0})=-\frac{f}{h}\sigma_{y1}. \end{cases}$$

Міне осы жүйеден жоғары келтірілген дифференциалдық теңдеуінің ең қарапайым шешімін алуын байқауға болады. Шекаралық шартынан немесе дайындаманың шетінде $\sigma_{y3}=-\sigma_T^*$ қабылдап келтірілген жүйенің бірінші теңдеуінен σ_{y2} мәнін анықтай аламыз.

Мысалы, $b=h=30$ мм, $f=0,3$, $\sigma_T^*=-20$ МПа қабылдайық, сонда жоғары келтірілген алгебралық теңдеулер жүйесінің бірінші теңдеуінен $\sigma_{y2} = -22$ МПа тең болады. Жүйенің екінші теңдеуінен $\sigma_{y1} = -24,2$ МПа мәнін, ал соңғы үшінші теңдеуден $\sigma_{y0} = -26,6$ МПа шамасын анықтаймыз.

Енді осы алынған нәтижелерді жоғары келтірілген Е.Унксов формуласы арқылы есептеп салыстырып көрейік:

$$x=0, \text{ болғанда, } \sigma_y = -\sigma_T^* e^{\frac{f(b-0)}{h}} = -26,99 \approx -27 \text{ МПа};$$

$$x=10 \text{ мм, болғанда, } \sigma_y = -\sigma_T^* e^{\frac{f(b-10)}{h}} = -24,4 \text{ МПа};$$

$$x=20 \text{ мм, болғанда, } \sigma_y = -\sigma_T^* e^{\frac{f(b-20)}{h}} = -22,1 \approx -22 \text{ МПа};$$

$$x=30 \text{ мм, болғанда, } \sigma_y = -\sigma_T^* e^{\frac{f(b-30)}{h}} = -20 \text{ МПа}.$$

Дәл осылай тізбектеп Зибель заңы орын алғанда немесе $\tau_k = -f\sigma_T^*$ берілгенде және τ_k мәні орталықтан сызықты өткен жағдайында шекті айырмашылық жүйесін құрып нормальді кернеулерінің таралуын анықтауға болады. Егер узель арасындағы (i нүктелер арасындағы) аралықты азайтсақ, онда дәлдігі көбейеді және екі әдіспен алынған нәтижелерінің айырмашылығы мәнді азаяды.

Сонымен, шекті айырмашылық әдісімен және Е.Унксов формулаларымен алынған нормальді кернеулерінің айырмашылығы өте аз немесе 1-2 % аспайды, сондықтан отырғызу және т.б МҚӨ үрдістерінде күш-энергия параметрлерін анықтауда осы әдісті қолданған өте ықшамды және ыңғайлы болады деп есептеп және меншікті, толық күштерін анықтауда осы екі әдіс тең құқықты деуге болады және басқадай [3-4] МҚӨ үрдістерінде күш-энергия параметрлерін анықтауда қолдануға болады

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде металдарды қысыммен өңдеу үрдістеріндегі күш-энергия

64 параметрлерін анықтауда шекті айырмашылық әдісінің тиімділігі теориялық және есептік тұрғыдан дәлелденді. Ұсынылған әдіс дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерін қарапайым алгебралық теңдеулер жүйесіне түрлендіруге мүмкіндік беріп, күрделі интегралдау және дифференциалдау амалдарын қолданбай-ақ түйісу бетіндегі нормальді кернеулердің таралуын жоғары дәлдікпен анықтауды қамтамасыз етеді.

Е. Унксовтың аналитикалық формуласымен жүргізілген салыстырмалы талдау нәтижесінде есептеу айырмашылығының 1-2 %-дан аспайтыны анықталды, бұл шекті айырмашылық әдісінің жеткілікті дәлдікке ие екенін және оны дәстүрлі аналитикалық тәсілдермен тең дәрежеде қолдануға болатынын көрсетті. Сонымен қатар, әдіс есептеу алгоритмін жеңілдетіп, инженерлік есептеулердің еңбек сыйымдылығын төмендетуге мүмкіндік береді.

Осылайша, шекті айырмашылық әдісі дайындамаларды отырғызу үрдісінде ғана емес, сондай-ақ металдарды қысыммен өңдеудің басқа да технологиялық процестерінде күштік және энергетикалық параметрлерді анықтау үшін тиімді инженерлік құрал ретінде ұсынылады. Болашақ зерттеулерде аталған әдісті күрделі геометриялы дайындамаларға, үшөлшемді кернеулі-деформациялық күй есептеріне және сандық модельдеу бағдарламаларымен біріктіре отырып қолдану оның практикалық мүмкіндіктерін одан әрі кеңейтуге мүмкіндік береді. болады.

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

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Ашкеев Ж.А. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, әдіснаманы қалыптастыру, математикалық модельді әзірлеу, зерттеуді жүргізу, нәтижелерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. Аманжолов Н.Ж. – ғылыми жетекшілік, зерттеу әдіснамасын жетілдіру, нәтижелерді тексеру, ғылыми әдебиеттерді талдау, нәтижелерді түсіндіру, мақаланы ғылыми редакциялау және рецензиялау. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығына ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Қарағанды индустриялық

университетіне алғыс білдіреді, сондай-ақ зерттеудің орындалуына көрсеткен ғылыми кеңестері мен қолдауы үшін барлық әріптестеріне ризашылықтарын 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.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.: ил.
- [2] Теория пластичности. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия. 1987.352с.
- [3] Ашкеев Ж.А., Андреященко В.А., Абишкенов М.Ж., Буканов Ж.У. Определение напряженного состояния и усилия деформации шарообразных заготовок в закрытой матрице / Вестник ПНИПУ. Механика 4 (2021) 5–12
- [4] Ашкеев Ж.А., Андреященко В.А., Абдираманов С.Т. Исследование процесса закрытой штамповки, реализующей интенсивные пластические деформации // Обработка материалов давлением. – 2018. – № 1. – С. 88–92.

REFERENCES

- [1] Theory of metalworking by pressure: a textbook for universities / V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev, S.A. Golovin, S.S. Yakovlev, V.D. Kukhar; edited by V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev. – M.: Mashinostroenie, 2009. – 442 p.: ill.
- [2] Theory of plasticity. Arkulis G.E., Dorogobid V.G. A textbook for universities. Moscow: Metallurgiya. 1987.352p
- [3] Ashkeev Zh.A., Andreyashchenko V.A., Abishkenov M.Zh., Bukanov Zh.U. Determination of the stress state and strain force of spherical workpieces in a closed matrix / Bulletin of PNRPU. Mechanics 4 (2021) 5-12
- [4] Ashkeev Zh.A., Andreyashchenko V.A., Abdiramanov S.T. Investigation of the closed stamping process that implements intense plastic deformations // Pressure treatment of materials. – 2018. – No. 1. – pp. 88-92.

IT-ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/071>

SIMULATION STUDY OF A CONTROLLED REACTOR COMPENSATOR

^{1*}*Smail A.A., ¹Smagulova K.K., ²Romanets A.O., ³Baranovskyi V.D., ³Baranovska M.L.*

¹*Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan*

²*Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine*

³*Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine*

* *Corresponding author email: arailym1997s@gmail.com*

Author information:

Smail A.A. - Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: arailym1997s@gmail.com

Smagulova K.K. - Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

Romanets A.O. - Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine, E-mail: dareyomg@gmail.com

Baranovskyi V.D. - Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, E-mail: vladislav.baranovskiy4@gmail.com

Baranovska M.L. - Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, E-mail: mila.baranovskaya@gmail.com

Abstract. The article explores issues of improving power quality in the intra-shop networks of industrial enterprises through the use of controlled reactor-based compensators. The relevance is driven by the increasing energy intensity of technological processes, the growing number of power converters, and heightened requirements for power supply reliability. Existing methods of reactive power compensation are reviewed. The novelty of the work lies in the development of schematic diagrams and mathematical models for single-phase and three-phase reactor-based compensators using semiconductor switches, which enable smooth regulation of reactive power. A mathematical model in MATLAB/SimScope/Electrical is proposed, and the results of mathematical modeling with a high-power induction motor are presented. It is established that the compensator stabilizes the power factor, reduces voltage fluctuations, and enhances reliability. Future work involves the development of automatic control systems for controlled reactor-based compensators.

Keywords: reactive power compensation, mathematical modeling, reactive power, power system stability, PID controller, control system, transients.

БАСҚАРЫЛАТЫН РЕАКТОР КОМПЕНСАТОРЫН ИМИТАЦИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

^{1*}*Смайл А.А., ¹Смагулова К.К., ²Романец А.О., ³Барановский В.Д., ³Барановская М.Л.*

¹*Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан*

²*Запорожье ұлттық университеті, Запорожье, Украина*

³*Кривой Рог ұлттық университеті, Кривой Рог, Украина*

**Корреспондент автор e-mail: arailym1997s@gmail.com*

Авторлар туралы ақпарат:

Смайл А.А. - Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан, E-mail: arailym1997s@gmail.com

Смагулова К.К. - Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

Романец А.О. - Запорожье ұлттық университеті, Запорожье, Украина, E-mail: dareyomg@gmail.com

Барановский В.Д. - Кривой Рог ұлттық университеті, Кривой Рог, Украина, E-mail: vladislav.baranovskiy4@gmail.com

Барановская М.Л. - Кривой Рог ұлттық университеті, Кривой Рог, Украина, E-mail: mila.baranovskaya@gmail.com

Аңдатпа. Мақалада басқарылатын реакторлық компенсаторларды қолдану арқылы өнеркәсіптік кәсіпорындардың цехаралық желілеріндегі электр энергиясының сапасын арттыру мәселелері зерттеледі. Өзектілігі технологиялық процестердің энергия сыйымдылығының артуына, қуат түрлендіргіштерінің көбеюіне және электрмен жабдықтау сенімділігіне қойылатын талаптардың артуына байланысты. Реактивті қуатты өтеудің қолданыстағы әдістері қарастырылған. Жұмыстың жаңалығы реактивті қуаттың біркелкі реттелуін қамтамасыз ететін жартылай өткізгіш кілттерді қолдана отырып, реакторлық компенсаторлардың бір фазалы және үш фазалы схемалары мен математикалық модельдерін жасау болып табылады. MATLAB/SimScape/Electrical-да математикалық модель ұсынылды, жоғары қуатты асинхронды қозғалтқышы бар математикалық модельдеу нәтижелері келтірілген. Компенсатор қуат коэффициентін тұрақтандырады, кернеудің ауытқуын азайтады және сенімділікті арттырады. Алдағы уақытта басқарылатын реакторлық компенсаторларды автоматты басқару жүйесін әзірлеу жоспарлануда.

Түйін сөздер: реактивті қуатты өтеу, математикалық модельдеу, реактивті қуат, электр желісінің тұрақтылығы, ПИД реттегіші, басқару жүйесі, өтпелі кезеңдер.

ИМИТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО РЕАКТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА

¹Смайл А.А., ¹Смагулова К.К., ²Романец А.О., ³Барановский В.Д., ³Барановская М.Л.

¹Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

²Запорожский национальный университет, Запорожье, Украина

³Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина

*Корреспондент автор e-mail: arailym1997s@gmail.com

Информация об авторах:

Смайл А.А. - Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан, E-mail: arailym1997s@gmail.com

Смагулова К.К. - Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

Романец А.О. - Запорожский национальный университет, Запорожье, Украина, E-mail: dareyomg@gmail.com

Барановский В.Д. - Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, E-mail: vladislav.baranovskiy4@gmail.com

Барановская М.Л. - Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, E-mail: mila.baranovskaya@gmail.com

Аннотация. В статье исследуются вопросы повышения качества электроэнергии во внутрицеховых сетях промышленных предприятий посредством применения управляемых реакторных компенсаторов. Актуальность обусловлена ростом энергоёмкости технологических процессов, увеличением числа силовых преобразователей и возросшими требованиями к надёжности электроснабжения. Рассмотрены существующие методы компенсации реактивной мощности. Новизна работы заключается в разработке принципиальных схем и математических моделей однофазных и трёхфазных схем реакторных компенсаторов с использованием полупроводниковых ключей, обеспечивающих плавное регулирование реактивной мощности. Предложена математическая модель в MATLAB/SimScape/Electrical, приведены результаты математического моделирования с асинхронным двигателем большой мощности. Установлено, что компенсатор стабилизирует коэффициент мощности, снижает колебания напряжения и повышает надёжность. В дальнейшем планируется разработка систем автоматического управления управляемых реакторных компенсаторов.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, математическое моделирование, реактивная мощность, устойчивость энергосистемы, ПИД-регулятор, система управления, переходные процессы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Разработаны принципиальные схемы и математические модели однофазного и трёхфазного управляемого реакторного компенсатора на базе мостовых диодно-транзисторных ключей переменного тока, обеспечивающих плавное регулирование реактивной мощности. Модели реализованы в среде MATLAB/SimScape/Electrical и позволяют

исследовать регулировочную характеристику $Q = f(\gamma)$ при различных значениях установленной ёмкости фильтра. Установлено, что существует значение ёмкости, при котором регулировочная характеристика приобретает практически линейный характер. Моделирование узла нагрузки с асинхронным двигателем мощностью 3500 кВт подтвердило возможность плавного регулирования реактивной мощности в широком

диапазоне, стабилизации коэффициента мощности и снижения провалов напряжения. Применение двухоперационных тиристоров (GTO, IGCT) существенно снижает стоимость предложенного технического решения.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития промышленности характеризуется ростом уровня автоматизации, широким применением силовой электроники и увеличением доли электроприводов переменной и постоянной скорости. В таких условиях качество электроэнергии во внутрицеховых сетях электроснабжения становится критически важным фактором стабильности технологических процессов, энергоэффективности производства и надежности электрооборудования. Ухудшение параметров электроэнергии в цеховых сетях приводит к снижению производительности технологического оборудования, увеличению энергопотребления и росту затрат на ремонт и техническое обслуживание.

Одним из ключевых аспектов обеспечения надлежащего качества электроэнергии является компенсация реактивной мощности (КРМ). Наличие в сети значительных потоков реактивной энергии вызывает дополнительные потери в электрических сетях, уменьшение пропускной способности линий, увеличение падения напряжения и, как следствие, нарушение режимов работы электроприемников. В промышленных условиях, особенно на крупных предприятиях с энергоемкими технологиями, этот фактор приобретает решающее значение.

Качество электроэнергии определяется совокупностью параметров, характеризующих отклонения напряжения, частоты, симметрии фаз и гармонического состава от номинальных значений. В соответствии с международными и национальными стандартами (IEC 61000, EN 50160, ДСТУ EN 50160:2014), основными показателями являются:

- отклонения и колебания напряжения;
- коэффициент несинусоидальности (гармонические искажения);
- несимметрия напряжения и тока;
- быстрые изменения напряжения;
- провалы, перенапряжения, перерывы питания.

Для большинства промышленных технологий допустимые пределы отклонений напряжения составляют $\pm 5... \pm 10\%$ от номинала, а коэффициент несинусоидальности не должен превышать 5-8 %. В цеховых сетях электроснабжения ухудшение качества электроэнергии часто связано именно с высокой

долей индуктивной нагрузки - электродвигателей, сварочных аппаратов, трансформаторов, индукционных печей, потребляющих реактивную мощность.

Реактивная мощность (Q) не выполняет полезной работы, но необходима для создания электромагнитного поля в индуктивных элементах электрических цепей. Ее наличие обуславливает увеличение полной мощности (S) и токов в сети, что приводит к дополнительным потерям активной мощности (P) в линиях и трансформаторах.

Компенсация реактивной мощности позволяет уменьшить токовые нагрузки, стабилизировать напряжение, снизить потери энергии и повысить эффективность работы электроустановок. В зависимости от условий, применяют различные технические решения:

- стационарные батареи конденсаторов (БК) - для стабильной нагрузки;
- автоматические установки КРМ - для переменных графиков потребления;
- синхронные компенсаторы - для высокой гибкости и улучшения режимов;
- управляемые тиристорные компенсаторы (STATCOM, TCR) - для быстрой реакции в динамических режимах.

Экономическая эффективность КРУ подтверждается значительным снижением штрафов за низкий коэффициент мощности, уменьшением затрат на энергию и повышением ресурса оборудования.

В отличие от магистральных и распределительных сетей высокого напряжения, цеховые сети работают в непосредственной близости к электроприемникам. Это делает их более чувствительными к колебаниям нагрузки и локальным источникам искажений.

Недостаточный уровень компенсации реактивной мощности в цеховых сетях приводит к ощутимым экономическим потерям:

- прямые потери энергии: повышенный нагрев кабелей и трансформаторов увеличивает затраты активной энергии на 5-15 %;
- косвенные потери: уменьшение производительности оборудования, остановки технологических процессов, увеличение затрат на ремонт;
- штрафы и повышенные тарифы от энергоснабжающих компаний за низкий коэффициент мощности;
- ускоренное старение оборудования: изоляционные материалы и обмотки электродвигателей деградируют быстрее из-за перегрева и нестабильного напряжения.

По оценкам, на предприятиях тяжелой промышленности внедрение современных систем КРМ окупается в течение 1-3 лет за счет уменьшения потерь и штрафных санкций.

В соответствии с ДСТУ EN 50160:2014 и Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), в промышленных сетях напряжением до 1 кВ рекомендуется поддерживать $\cos \varphi$ не ниже 0,9, а для мощных потребителей - не ниже 0,95. Это делает внедрение КРМ не только технически целесообразным, но и нормативно необходимым.

Таким образом, проблема повышения качества электроэнергии в цеховых сетях электроснабжения является актуальной, учитывая растущие требования к энергоэффективности, надежности и стабильности промышленных технологий. Особое значение имеет внедрение эффективных средств компенсации реактивной мощности, обеспечивающих: стабильный уровень напряжения, уменьшение токовых нагрузок, снижение потерь энергии, увеличение ресурса оборудования, выполнение нормативных требований.

Углубленное исследование этой проблематики позволит создать комплексные технические решения, сочетающие современные методы КРМ с системами мониторинга и автоматического регулирования параметров качества электроэнергии, что особенно важно для высокотехнологичных и энергоемких производств.

В современных системах распределения электроэнергии промышленные нагрузки не только потребляют активную мощность, но и создают значительные потоки реактивной мощности, вносят гармонические искажения в напряжения и токи. Эта ситуация связана как с особенностями структуры промышленного оборудования, так и с широким использованием полупроводниковых преобразователей при модернизации существующих систем электроснабжения.

Кроме того, нарушения качества электроэнергии имеют целый ряд негативных последствий для энергосистемы, влияя на ее общую производительность и надежность.

Для решения этих проблем и повышения качества электроэнергии в течение многих лет разрабатывали и совершенствовали силовые активные фильтры электроэнергии (active power filter, APF).

В работе авторов Asit Mohanty et al. [1] проведен всесторонний анализ механизмов управления, предназначенных для улучшения качества электроэнергии в электроэнергетических системах. Также рассматриваются вопросы, связанные с выбором

компонентов фильтров с учетом как технических, так и экономических факторов. В статье обсуждаются факторы, влияющие на выбор фильтров, адаптированных для конкретных применений, с целью достижения наилучшей производительности и экономической эффективности.

Для решения проблем повышения качества электроэнергии Khairul Anuar Mohd Nor et al., [2], предлагают использовать активно-пассивный гибридный фильтр гармоник, разработанный для минимизации уровней гармоник в трехфазных электрических системах в соответствии со стандартами IEEE-519. Анализ результатов показал, что предложенный фильтр эффективно снижает гармоническое загрязнение до 58,63%, что значительно улучшает качество электроэнергии и способствует повышению надежности современных энергосистем. Однако это исследование не затрагивает проблем, связанных с другими показателями качества электроэнергии и реактивной мощностью.

Работа авторов Timothy Oluwaseun Araoye et al. [3] посвящена применению последовательного активного фильтра для снижения уровня высших гармоник в трехфазном асинхронном двигателе. Применение метода ANN-Grasshopper optimization Shunt Active filters (ANN-GOSAF) для управления последовательным активным фильтром обеспечивает значительное снижение гармоник тока и напряжения, что приводит к повышению производительности двигателя и энергоэффективности. Однако полученные результаты не могут быть использованы для мощных потребителей других типов. Авторами M. Karthikeyan et al. [4] описывается использование шунтирующего фильтра активной мощности (SAPF) для компенсации реактивной мощности (Q) и гармоник тока. В работе для оценки параметров трехфазной нагрузки применен нейросетевой алгоритм на основе ADALINE, который может управлять SAPF для поддержания синусоидальных токов источника и единичного коэффициента мощности (PF).

Авторы Abdallah El Ghaly et al. (2024), [5], подчеркивают роль активных фильтров мощности (APFs) в улучшении качества электроэнергии. Авторы добились существенного снижения гармонических искажений напряжения при использовании метода "карандаша матриц" (matrix pencil method, MPM) для более точного извлечения опорного напряжения.

В работе [6] Annu Govind et al описывают системный подход к улучшению качества электроэнергии с помощью активного шунтирующего фильтра мощности (SAPF), призванного снижать гармонические искажения

напряжения и тока, вызванные нелинейными нагрузками. Для улучшения управления переключением SAPF в условиях динамических и нелинейных нагрузок авторы применили нейросетевой подход, использующий теорию мгновенной реактивной мощности (IRP). Недостатком работы является ее узкая направленность на снижение гармонических искажений напряжения и тока.

Как показывает анализ рассмотренных литературных источников, практически отсутствуют работы, посвященные анализу влияния реальных производственных условий на работу распределительных сетей промышленных предприятий. Основное внимание исследователей привлекает проблема минимизации высших гармоник, действующих в распределительных сетях, тогда как в реальных производственных условиях задачи управления другими показателями качества электроэнергии могут стоять более остро. Для управления активными компенсирующими устройствами различного типа широко применяются как стандартные системы управления с ПИД-контроллерами, так и различные варианты нейросетевых и нечетких регуляторов.

Пробел в исследованиях. Анализ рассмотренных источников показывает, что исследования в области повышения качества электроэнергии сосредоточены преимущественно на активных силовых фильтрах (APF) и алгоритмах их управления. Вопросы применения управляемых реакторных компенсаторов с широтно-импульсным регулированием на высокой частоте во внутрицеховых сетях промышленных предприятий остаются практически неисследованными: отсутствуют математические модели, позволяющие оценить регулировочные характеристики таких компенсаторов при совместной работе с мощной активно-индуктивной нагрузкой.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в разработке принципиальных схем и математических моделей однофазного и трёхфазного управляемых реакторных компенсаторов на базе мостовых диодно-транзисторных ключей. Впервые установлена зависимость линейности регулировочной характеристики $Q = f(\gamma)$ от установленной ёмкости фильтра, что создаёт основу для синтеза замкнутых систем автоматического управления реактивной мощностью в узле нагрузки промышленного предприятия.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве основного средства обеспечения электромагнитной совместимости цеховых сетей электроснабжения с силовыми полупроводниковыми преобразователями широко распространены сравнительно несложные фильтрокомпенсирующие устройства на базе пассивных индуктивно-емкостных фильтров, которые обеспечивают как улучшение формы тока и напряжения сети, так и компенсацию реактивной мощности [7].

Основным недостатком наиболее распространенных пассивных фильтрокомпенсирующих устройств с фиксированными параметрами элементов является неуправляемость, что приводит при широком диапазоне регулирования нагрузок силовых полупроводниковых преобразователей к возникновению режимов как недокомпенсации реактивной мощности, так и ее перекомпенсации [7]. Такое обстоятельство обуславливает необходимость завышения установленной мощности генераторов и приводит к снижению эффективности и технико-экономических показателей цеховых сетей электроснабжения в целом. Указанные негативные факторы устраняются при использовании управляемых фильтрокомпенсирующих устройств, которые обеспечивают дополнительные преимущества: уменьшение потерь активной мощности и снижение колебаний напряжения сети.

Обобщенная схема цеховой сети электроснабжения с полупроводниковым преобразователем и управляемым фильтрокомпенсирующим устройством приведена на рис. 1. Генератор (сеть питания) представлен источником синусоидальной ЭДС e_S с амплитудой E_m и сопротивлением короткого замыкания X_S , трансформатор или входной реактор полупроводникового преобразователя - сопротивлением X_P . В состав управляемого фильтрокомпенсирующего устройства входит резонансный продольный LC-фильтр, состоящий из сопротивлений X_{L0} , X_{C0} и реакторный компенсатор, условно обозначенный регулируемым эквивалентным сопротивлением на основной гармонике X_{PKE} . Порядок частоты настройки резонансного фильтра соответствует нулю частотной характеристики системы и выбирается из условия:

$$\omega_{P\Phi 0} = \omega_{P\Phi 0} / \omega = \sqrt{X_{C0} / X_{L0}} = p - 1 \quad (1)$$

где $\omega_{P\Phi 0}$ – резонансная частота фильтра, ω – круговая частота сети, p – пульсность полупроводникового преобразователя. При снижении высших гармоник, резонансный фильтр одновременно является генератором реактивной мощности на основной гармонике.

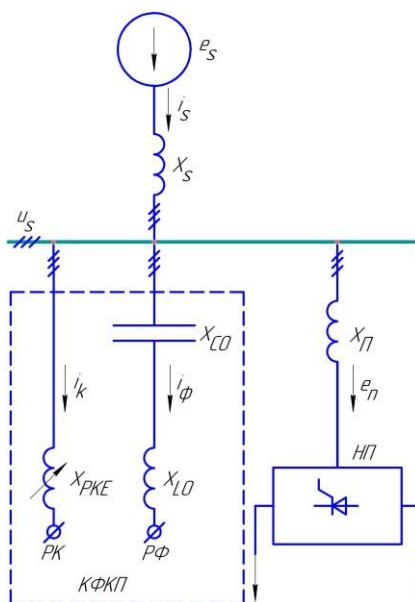


Рисунок 1 – Однолинейная структурная схема цеховой сети электроснабжения с полупроводниковым преобразователем и управляемым компенсирующим устройством

На практике наибольшее применение получила схема реактивного компенсатора, выполненная на основе реакторов с

индуктивностью L_K , включенных последовательно со встречно-параллельно соединенными однооперационными тиристорами с фазовым управлением (рис. 2) [8].

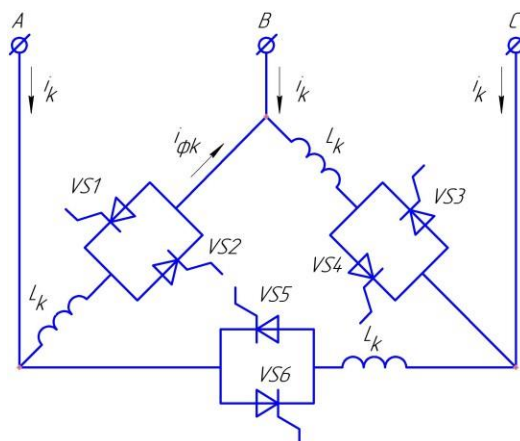


Рисунок 2 – Реакторный компенсатор с тиристорными ключами

Основными недостатками реакторного компенсатора (рис. 2) являются генерация НЧ гармоник тока в питающую сеть, а также существенное время задержки регулирования, составляющее половину периода.

Также могут быть использованы трехфазные реакторные компенсаторы с полупроводниковыми широтно-импульсными регуляторами на базе ключей переменного тока, схемы которых приведены на рис. 3, а, б [8, 10].

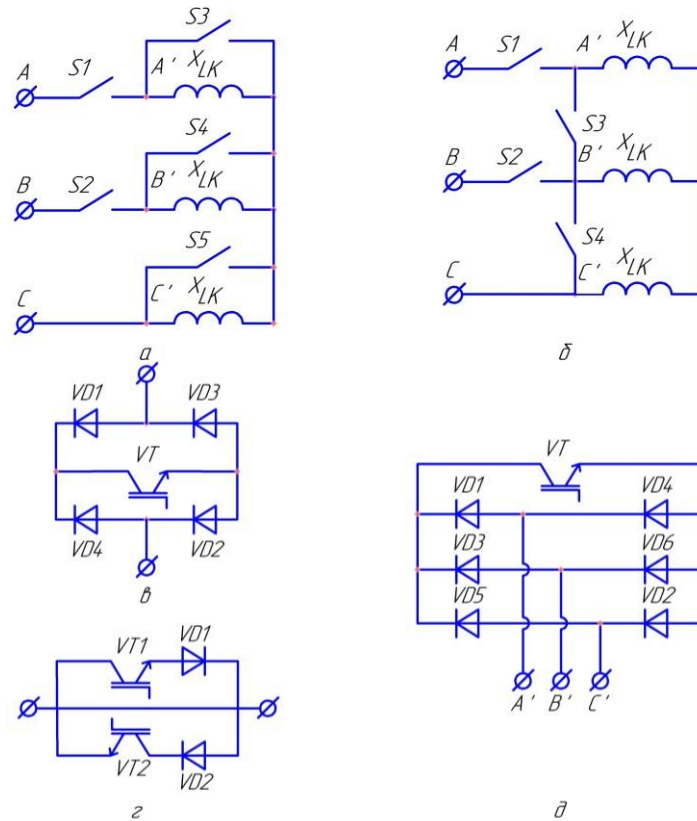


Рисунок 3 – Трехфазный реакторный компенсатор с полупроводниковым широтно-импульсным регулированием: а, б – основные структуры реакторного компенсатора, в, г – полупроводниковые ключи переменного тока, д – короткозамыкатель на одном полупроводниковом ключе постоянного тока

Полупроводниковые ключи переменного тока, выполненные на базе транзисторов и диодов, представлены на рис. 3, в, г. Вместо транзисторов могут быть использованы двухоперационные тиристоры. Вариант ключа на рис. 3, в, лучше, поскольку содержит меньшее количество управляемых элементов.

Наилучшими регулировочными характеристиками обладает быстродействующий

реакторный компенсатор с широтно-импульсным регулированием на высокой частоте (рис. 4) [8-10].

Основу схемы составляют три индуктивных элемента L_K и шесть полупроводниковых ключей переменного тока (1-6), условно представленных в виде контактов.

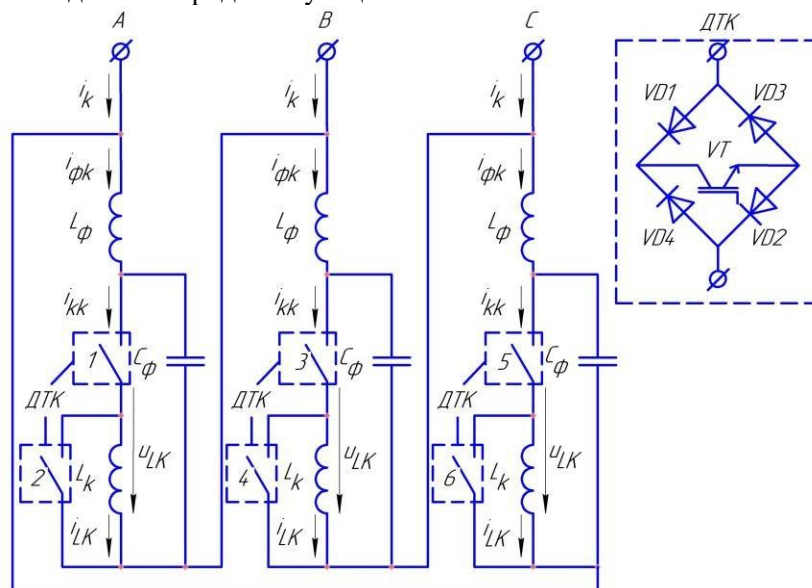


Рисунок 4 – Принципиальная схема трехфазного управляемого реакторного компенсатора

Ключевые элементы могут быть реализованы на базе мостовой диодно-транзисторной схемы (рис.

3, в). В диагональ моста вместо IGBT-транзисторов могут быть включены двухоперационные

тиристоры (GTO, IGCT). В каждой фазе такой схемы реакторного компенсатора имеются два ключа, которые работают в противофазе: один из них соединен последовательно, а другой - параллельно с LK.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования особенностей работы управляемого реакторного компенсатора и его регулировочных возможностей был использован метод математического моделирования. Математическая модель однофазного

управляемого реакторного компенсатора, разработанная с использованием MATLAB/Simscap/Electrical, представлена на рис.5.

Модель рис.5 содержит три однофазных компенсатора CRC, отличающихся значением установленной емкости фильтра СФ, рис.5, а. На рис.5, б, представлена модель внутренней структуры управляемого реакторного компенсатора, соответствующая принципиальной схеме, представленной на рис.4. Рисунок 5, в, представляет математическую модель мостового диодно-транзисторного ключа DTK.

Представленная на рис.5, а математическая модель управляемого реакторного компенсатора позволяет изучить регулировочные характеристики управляемого реакторного компенсатора

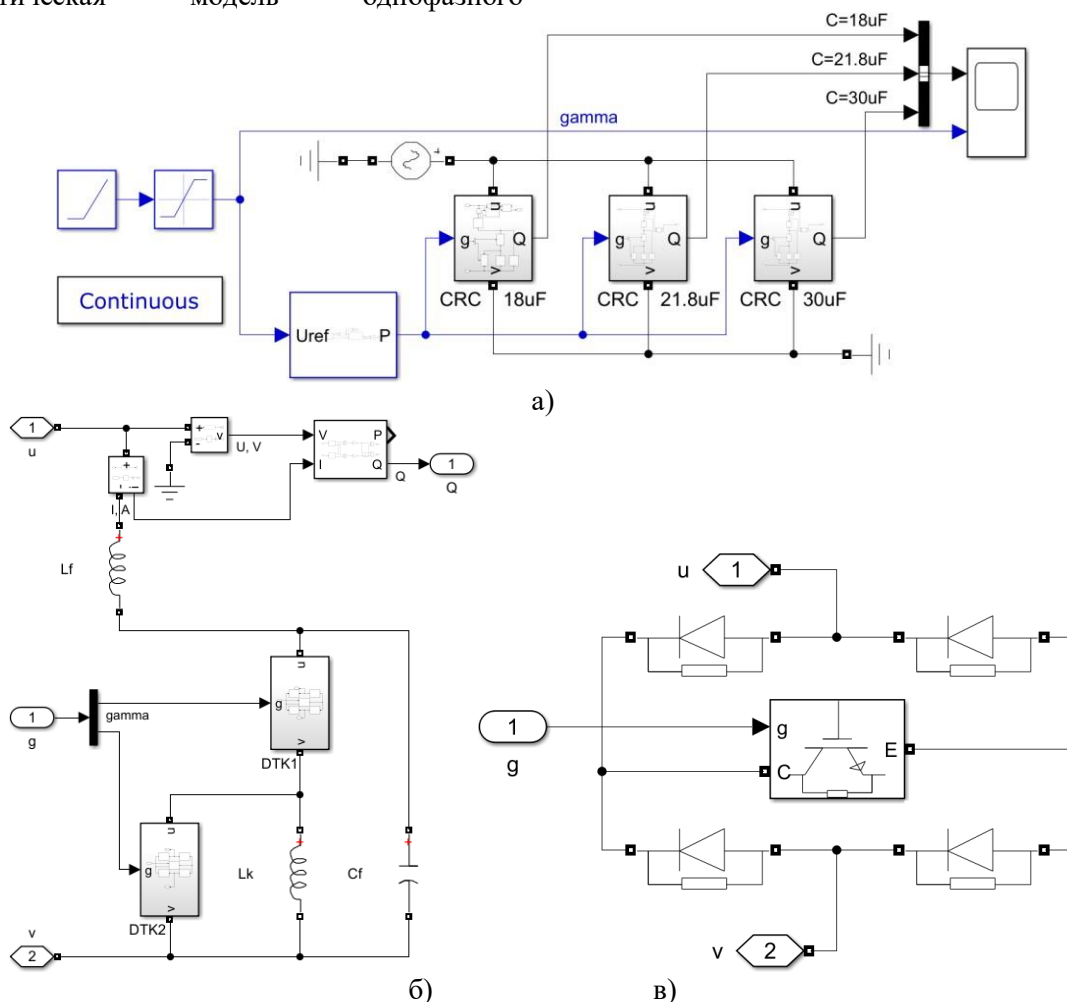


Рисунок 5 – Математическая модель управляемого реакторного компенсатора: а – схема включения управляемого реакторного компенсатора; б – внутренняя структура управляемого реакторного компенсатора; в – мостовой диодно-транзисторный ключ

Результаты работы модели управляемого реакторного компенсатора представлены на рис.6. Полученные результаты позволяют оценить регулировочную характеристику реакторного компенсатора $Q = f(\gamma)$ и ее

зависимость от установленной емкости фильтра СФ. Скважность сигнала управления мостового диодно-транзисторного ключа γ изменяется в диапазоне от -1 до 1 за период времени $0.3c \leq t \leq 1.7c$.

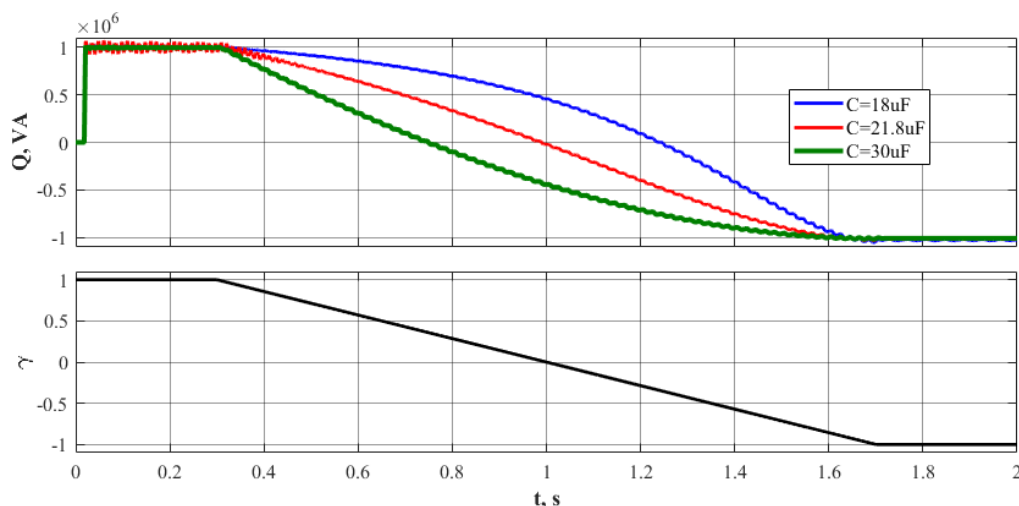


Рисунок 6 – Регулировочные характеристики управляемого реакторного компенсатора $Q = f(\gamma)$ при различных значениях установленной ёмкости фильтра

Как следует из полученных расчетных зависимостей, управляемый реакторный компенсатор обеспечивает плавное регулирование реактивной мощности в заданном диапазоне. Установлено, что существует такое значение емкости фильтра СФ, которое обеспечивает практически линейный характер регулировочной характеристики управляемого реакторного компенсатора, что особенно важно

при синтезе замкнутых систем управления реактивной мощностью.

Дополнительно было выполнено исследование работоспособности и регулировочных возможностей трехфазного управляемого реакторного компенсатора при работе в узле нагрузки параллельно с трехфазным асинхронным двигателем. Модель узла нагрузки, реализованная в MATLAB/Simscap/Electrical, представлена на рис. 7.

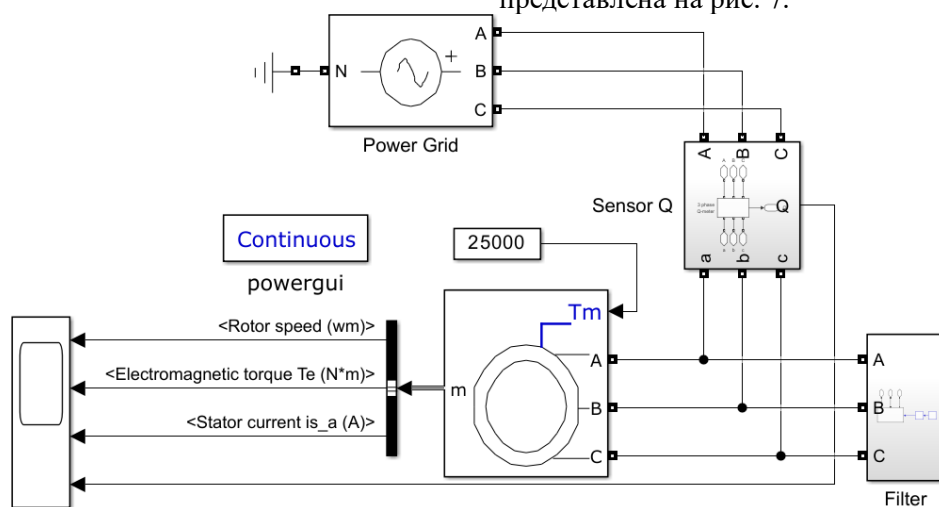


Рисунок 7 – Реализация модели узла нагрузки с трехфазным асинхронным двигателем и управляемым реакторным компенсатором Filter

Подсистема измерения реактивной мощности обозначена как Sensor Q.

В математической модели использован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 1RQ76366JA800CGO-Z SIMOTICS HV M со следующими техническими характеристиками: номинальная мощность 3500 кВт, напряжение питания 10 кВ, частота вращения 994 об/мин.

Сквозность сигнала управления мостового диодно-транзисторного ключа γ изменяется в диапазоне от -1 до 1 за период времени $1 \text{ с} \leq t \leq 3 \text{ с}$ при установившемся режиме работы асинхронного двигателя с номинальной нагрузкой.

Полученные результаты моделирования узла нагрузки представлены на рис.8.

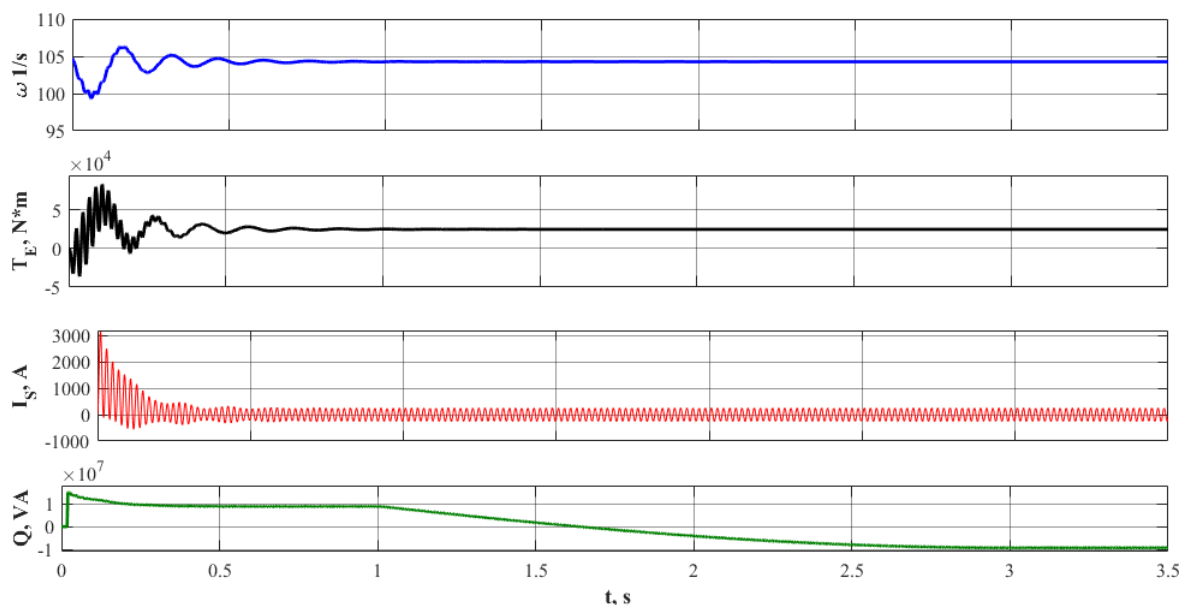


Рисунок 8 – Результаты моделирования узла нагрузки с асинхронным двигателем и управляемым реакторным компенсатором

Как следует из полученных результатов математического моделирования узла трехфазной нагрузки с асинхронным двигателем, управляемый реакторный компенсатор обеспечивает плавное регулирование реактивной мощности в широком диапазоне. Это создает предпосылки для создания системы автоматического управления реактивной мощностью в узле нагрузки, поддержания необходимого значения коэффициента мощности, обеспечения режима полной компенсации реактивной мощности активно-индуктивной нагрузки.

ВЫВОДЫ

В работе обоснована целесообразность применения управляемых реакторных компенсаторов с целью повышения качества напряжения во внутренних распределительных сетях промышленных предприятий. Управляемые реакторные компенсаторы могут быть выполнены с применением двухоперационных тиристоров (GTO, IGCT), что существенно снижает стоимость рассмотренного технического решения. Разработана математическая модель однофазного и трехфазного управляемого реакторного компенсатора. С помощью математического моделирования показана возможность плавного регулирования реактивной мощности в широком диапазоне.

Применение предложенного технического решения может улучшить показатели качества питающего напряжения во внутренних распределительных сетях промышленных предприятий, а именно снизить потребление реактивной мощности, снизить провалы напряжения в питающей сети.

Недостатком исследования является то, что не рассмотрена работа трехфазного управляемого реакторного компенсатора в реальной распределительной сети с учетом ограниченной мощности источника питания и сопротивления трансформаторов и соединительных линий.

В качестве направления дальнейших исследований планируется разработка замкнутых систем управления управляемого реакторного компенсатора с целью повышения качества напряжения во внутренних распределительных сетях промышленных предприятий.

Авторский вклад (таксономия CRediT):

Смайл А.А.: концептуализация, обзор литературных источников, проведение вычислительных экспериментов, написание первоначального варианта рукописи. **Смагулова К.К.:** разработка методологии исследования, анализ и интерпретация результатов моделирования. **А.О. Романец:** разработка математических моделей в MATLAB/SimScope/Electrical, визуализация результатов. **В.Д. Барановский:** разработка принципиальных схем реакторных компенсаторов, валидация технических решений. **М.Л. Барановская:** научное руководство исследованием, критическое редактирование и подготовка окончательной версии рукописи. Все авторы ознакомились с окончательной версией статьи и одобрили её к публикации.

Финансирование. Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллективам Карагандинского технического университета имени Абылкаса

Сагинова, Запорожского и Криворожского национальных университетов за научное сотрудничество при подготовке исследования.

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

- [1] Asit Mohanty, Prakash K. Ray, Soumya Ranjan Das, Manzoore Elahi M. Soudagar, S. Ramesh, T.M. Yunus Khan, Naif Almakayeel, M. Mahmood Ali, Muhammad Nasir Bashir. Enhancing power quality in contemporary utility systems: A comprehensive analysis of active power filters and control strategies, *Energy Reports*, 2024, Volume 11, Pages 5575-5592, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.03>.
- [2] Khairul Anuar Mohd Nor, Noramalina Abdullah, Power quality improvement of three-phase electrical systems using active-passive hybrid harmonic filter, *Results in Engineering*, 2024, Volume 22, 102242, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102242>.
- [3] Timothy Oluwaseun Araoye, Evans Chinemezu Ashigwuike, Adeyinka Cornelius Adeyemi, Sochima Vincent Egoigwe, Nnaemeka Genesis Ajah, Emmanuel Eronu. Reduction and control of harmonic on three-phase squirrel cage induction motors with voltage source inverter (VSI) using ANN-grasshopper optimization shunt active filters (ANN-GOSAF), *Scientific African*, 2023, Volume 21, e01785, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.202e01785>.
- [4] M. Karthikeyan, K. Sharmilee, P.M. Balasubramaniam, N.B. Prakash, M. Rajesh Babu, V. Subramaniaswamy, S. Sudhakar. Design and implementation of ANN-based SAPF approach for current harmonics mitigation in industrial power systems, *Microprocessors and Microsystems*, 2020, Volume 77, 103194, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103194>.
- [5] Abdallah El Ghaly, Mohamad Tarnini, Zaher Al Barakeh, Khaled Chahine, Compensating voltage waveform distortions using a practical topology of series active power filters, *Results in Engineering*, 2024, Volume 22, 102032, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102032>.
- [6] Annu Govind, Kuldeep Jayaswal, Vijay Kumar Tayal, Prakash Kumar, Simulation and real time implementation of shunt active power filter for power quality enhancement using adaptive neural network topology, *Electric Power Systems Research*, 2024, Volume 228, 110042. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.202110042>.
- [7] DIXON Juan, MORAN Luis, RODRIGUEZ José, DOMKE Ricardo. Reactive power compensation technologies: State – of – the – art review, *Proceedings of the IEEE* ISSN0018-9219, 2005, vol. 93, n 12, pp. 2144-2164.
- [8] Zhuk, O., Zhuk, D., Kryvoruchko, D., & D'yakonov, O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 605-610.
- [9] O. Zhuk, S. Trybulkevich, D. Zhuk, V. Ryabenkij Modelling of a FilterCompensating Device with a Controlled Reactor Compensator. 7th International Conference on Digital Technologies in Education, Science and Industry, DTESI 2022 October 20–21. Almaty. Kazakhstan. P. 313–324.
- [10] O. Zhuk, D. Zhuk, D. Kryvoruchko and S. Stepenko, "An improvement of compensators of complete power non-active components in autonomous electric power systems," 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, Ukraine, 2016, pp. 1-5.

REFERENCES

- [1] Asit Mohanty, Prakash K. Ray, Soumya Ranjan Das, Manzoore Elahi M. Soudagar, S. Ramesh, T.M. Yunus Khan, Naif Almakayeel, M. Mahmood Ali, Muhammad Nasir Bashir. Enhancing power quality in contemporary utility systems: A comprehensive analysis of active power filters and control strategies, *Energy Reports*, 2024, Volume 11, Pages 5575-5592, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.03>.
- [2] Khairul Anuar Mohd Nor, Noramalina Abdullah, Power quality improvement of three-phase electrical systems using active-passive hybrid harmonic filter, *Results in Engineering*, 2024, Volume 22, 102242, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102242>.
- [3] Timothy Oluwaseun Araoye, Evans Chinemezu Ashigwuike, Adeyinka Cornelius Adeyemi, Sochima Vincent Egoigwe, Nnaemeka Genesis Ajah, Emmanuel Eronu. Reduction and control of harmonic on three-phase squirrel cage induction motors with voltage source inverter (VSI) using ANN-grasshopper optimization shunt active filters (ANN-GOSAF), *Scientific African*, 2023, Volume 21, e01785, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.202e01785>.
- [4] M. Karthikeyan, K. Sharmilee, P.M. Balasubramaniam, N.B. Prakash, M. Rajesh Babu, V. Subramaniaswamy, S. Sudhakar. Design and implementation of ANN-based SAPF approach for current harmonics mitigation in industrial power systems, *Microprocessors and Microsystems*, 2020, Volume 77, 103194, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103194>.

[5] Abdallah El Ghaly, Mohamad Tarnini, Zaher Al Barakeh, Khaled Chahine, Compensating voltage waveform distortions using a practical topology of series active power filters, *Results in Engineering*, 2024, Volume 22, 102032, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102032>.

[6] Annu Govind, Kuldeep Jayaswal, Vijay Kumar Tayal, Prakash Kumar, Simulation and real time implementation of shunt active power filter for power quality enhancement using adaptive neural network topology, *Electric Power Systems Research*, 2024, Volume 228, 110042. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.202110042>.

[7] DIXON Juan, MORAN Luis, RODRIGUEZ José, DOMKE Ricardo. Reactive power compensation technologies: State – of – the - art review, *Proceedings of the IEEE* ISSN0018-9219, 2005, vol. 93, n 12, pp. 2144-2164.

[8] Zhuk, O., Zhuk, D., Kryvoruchko, D., & D'yakonov, O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 605-610.

[9] O. Zhuk, S. Trybulkevich, D. Zhuk, V. Ryabenskij Modelling of a FilterCompensating Device with a Controlled Reactor Compensator. 7th International Conference on Digital Technologies in Education, Science and Industry, DTESI 2022 October 20–21. Almaty. Kazakhstan. P. 313–324.

[10] O. Zhuk, D. Zhuk, D. Kryvoruchko and S. Stepenko, "An improvement of compensators of complete power non-active components in autonomous electric power systems," 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, Ukraine, 2016, pp. 1-5.

IT ТЕХНОЛОГИЯЛАР, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИКА ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/072>

DEVELOPMENT OF METHODS FOR COUNTERING CHATGPT ATTACKS

^{*1}Zhunusov Zh.A., ²Enkizar E.

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

²Padang State University (Universitas Negeri Padang), Indonesia

* Corresponding author email: zh.zhunusov@tttu.edu.kz

Author information:

Zhunusov Zh.A. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: zh.zhunusov@tttu.edu.kz

Enkizar E. - Padang State University (Universitas Negeri Padang), Indonesia. E-mail: engkizar@fis.unp.as.id

Abstract. This study focuses on the development of models based on artificial intelligence (AI), in particular ChatGPT, to address security threats and methods to counter them. The widespread use of language models such as ChatGPT has increased their potential danger in cyber attacks, disinformation dissemination, and ethical issues. The study analyzed the types of attacks and proposed strategies aimed at identifying and preventing them. Key methods include machine learning algorithms, data encryption, and ethical regulation. The results of the study show the importance of technical and legislative measures to ensure the safe use of AI technologies.

Keywords: artificial intelligence, ChatGPT, cybersecurity, attack resistance, machine learning, ethics.

CHATGPT ШАБУЙЛДАРЫНА ҚАРСЫ ТҮРУ ӘДІСТЕРІН ӘЗІРЛЕУ

^{*1}Жунусов Ж.А., ²Enkizar E.

¹Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

²Паданг мемлекеттік университеті, Индонезия

*Корреспондент автор e-mail: zh.zhunusov@tttu.edu.kz

Авторлар туралы ақпарат:

Жунусов Ж.А. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: zh.zhunusov@tttu.edu.kz

Enkizar E. - Паданг мемлекеттік университеті, Индонезия. E-mail: engkizar@fis.unp.as.id

Аңдатпа. Бұл зерттеу жасанды интеллект (ЖИ) негізіндегі модельдердің, атап айтқанда ChatGPT-нің қауіпсіздікке төнетін қатерлерін және оларға қарсы тұру әдістерін әзірлеуге бағытталған. ChatGPT сияқты тілдік модельдердің кең қолданылуы кибершабуылдарда, дезинформация таратуда және этикалық мәселелерде олардың әлеуетті қауіптілігін арттырды. Зерттеуде шабуыл түрлері талданып, оларды анықтау және алдын алуға бағытталған стратегиялар ұсынылды. Негізгі әдістерге машиналық оқыту алгоритмдері, деректерді шифрлау және этикалық реттеу кіреді. Зерттеу нәтижелері ЖИ технологияларының қауіпсіз қолданылуын қамтамасыз ету үшін техникалық және заңнамалық шаралардың маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: Жасанды интеллект, ChatGPT, киберқауіпсіздік, шабуылдарға қарсы тұру, машиналық оқыту, этика.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ АТАКАМ CHATGPT

^{*1}Жунусов Ж.А., ²Enkizar E.

Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

²Государственный университет Паданга, Индонезия

*Корреспондент автор e-mail: zh.zhunusov@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Жунусов Ж.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: zh.zhunusov@tttu.edu.kz

Enkizar E. - Государственный университет Паданга, E-mail: engkizar@fis.unp.as.id

Аннотация. Это исследование направлено на разработку моделей, основанных на искусственном интеллекте (ИИ), в частности угроз безопасности ChatGPT, и методов их противодействия. Широкое использование языковых моделей, таких как ChatGPT, увеличило их потенциальную опасность в кибератаках, распространении дезинформации и этических вопросах. В исследовании были проанализированы типы атак и предложены стратегии, направленные на их выявление и предотвращение. Основные методы включают алгоритмы машинного обучения, шифрование данных и этическое регулирование. Результаты исследования подчеркивают важность технических и законодательных мер для обеспечения безопасного применения технологий ИИ.

Ключевые слова: искусственный интеллект, ChatGPT, кибербезопасность, противодействие атакам, машинное обучение, этика.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Жасанды интеллектке негізделген тілдік модельдерді (атап айтқанда, ChatGPT-ді) пайдалануға байланысты қауіптерге қарсы тұру үшін машиналық оқыту, ауытқуларды анықтау, деректерді криптографиялық қорғау және көп факторлы аутентификация элементтерін біріктіретін кешенді модель ұсынылады. Зияткерлік талдау алгоритмдерін қолдану фишингтік хабарламаларды, зиянды кодты және жалған ақпаратты (дезинформацияны) генерациялау әрекеттерін уақтылы анықтауға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Өзірленген тәсіл ақпарат алмасу сенімділігін, жүйенің ақауларға төзімділігін және бөлімшелер арасындағы сенімді арттырады, осылайша теміржол саласының цифрлық трансформациясына ықпал етеді.

КІРІСПЕ

Жасанды интеллект (ЖИ) технологияларының қарқынды дамуы, әсіресе ChatGPT сияқты үлкен тілдік модельдердің пайда болуы, қоғамдық және технологиялық салаларда төңкеріс жасады. Бұл модельдер ақпаратты өңдеу, мәтін генерациясы және адаммен өзара әрекеттесу сияқты қабілеттерімен ерекшеленеді. Мысалы, ChatGPT қолданушылардың сұрақтарына табиғи тілде жауап беріп, күрделі тапсырмаларды орындай алады – мәтін жазудан бастап бағдарламалауға дейін. Бұл технологиялар білім беру, бизнес және ғылым салаларында қолданылуда, олардың тиімділігі мен қолжетімділігін арттыруда. Алайда, осы жетістіктердің артында олардың кең таралуы зиянды мақсатта қолдану мүмкіндігін де арттырды деген мәселе жатыр. ChatGPT сияқты модельдердің қуаттылығы оларды киберқылмыскерлердің қолына түскенде қауіпті құралға айналдыруы мүмкін. Мысалы, фишингтік хаттар жасау, жалған ақпарат тарату немесе автоматтандырылған шабуылдарды ұйымдастыру сияқты әрекеттер осы технологиялардың көмегімен жеңіл және тиімді орындалуда. Осыған байланысты, бұл зерттеу

ChatGPT-нің осындай қауіп-қатерлерін зерттеуге және оларға қарсы тиімді қорғаныс әдістерін әзірлеуге арналған. Зерттеудің басты мақсаты – техникалық және этикалық шешімдерді ұсыну арқылы ЖИ-дің қауіпсіз қолданылуын қамтамасыз ету болып табылады.

ChatGPT сияқты тілдік модельдердің дамуы OpenAI сияқты ұйымдардың машиналық оқыту және нейрондық желілер саласындағы жетістіктеріне негізделген. Бұл модельдер миллиардтаған сөздер мен сөз тіркестерінің негізінде оқытылған, бұл оларға контексті түсіну және шынайыға жақын мәтіндер шығару қабілетін береді. Дегенмен, осы қабілеттердің арқасында олар әлеуметтік инженерия шабуылдарына да қолданыла алады. Мысалы, киберқылмыскерлер ChatGPT-ді пайдаланып, сенімді және жеке адамдарға бейімделген фишингтік хаттар жасай алады, бұл олардың құрбандарының сенімін оңай алуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жалған ақпарат тарату – қазіргі қоғамдағы ең өзекті мәселелердің бірі. ChatGPT көмегімен жасалған сенімді көрінетін жалған жаңалықтар немесе әлеуметтік желілердегі посттар қоғамдық пікірді манипуляциялауға және хаос тудыруға қабілетті. Автоматтандырылған шабуылдарға келетін болсақ, ChatGPT зиянды бағдарламалардың кодын жазу немесе қауіпсіздік жүйелерін бұзуға арналған сценарийлерді әзірлеу сияқты тапсырмаларды орындай алады, бұл оның қауіпті әлеуетін одан әрі арттырады.

Осы қауіп-қатерлерді ескере отырып, ЖИ технологияларының қауіпсіздігін қамтамасыз ету қазіргі заманның маңызды міндеттерінің біріне айналды. Бұл зерттеу осы мәселені шешуге бағытталған және бірнеше негізгі бағытты қамтиды. Біріншіден, ChatGPT-нің шабуылдарда қолданылуының әлеуетті сценарийлері талданады. Екіншіден, бұл шабуылдарды анықтау және алдын алу үшін техникалық шешімдер, мысалы, машиналық оқытуға негізделген аномалияларды анықтау жүйелері ұсынылады. Үшіншіден, ЖИ қолдануды реттейтін этикалық

және заңнамалық шаралардың қажеттілігі қарастырылады. Мысалы, ChatGPT сияқты модельдерді қолдануға шектеулер қою немесе олардың әрекеттерін бақылауға арналған халықаралық стандарттар әзірлеу қажеттілігі туындайды.

Зерттеудің маңыздылығы тек техникалық аспектілермен шектелмейді. ЖИ-дің қоғамға тигізетін әсері этикалық дилеммаларды да қамтиды. ChatGPT-нің зиянды қолданылуы жеке адамдардың құпиялылығына, ұлттық қауіпсіздікке және әлеуметтік тұрақтылыққа қауіп төндіреді. Сондықтан бұл зерттеу техникалық шешімдерді әзірлеумен қатар, ЖИ қолданудың моральдық және заңдық шекараларын анықтауға да бағытталған. Мысалы, ЖИ технологияларын әзірлеушілер мен қолданушылардың жауапкершілігін арттыру, сондай-ақ осы модельдердің қауіпсіздігін тексеретін тәуелсіз органдар құру қажеттілігі туындайды. Осылайша, зерттеу ЖИ-дің қазіргі және болашақтағы рөлін қауіпсіз әрі тиімді етуге үлес қосады.

Қорытындылай келе, ChatGPT сияқты тілдік модельдердің дамуы қоғамға үлкен мүмкіндіктер әкелгенімен, олардың қауіп-қатерлері де назардан тыс қалмауы тиіс. Бұл зерттеу осы қауіп-қатерлерді анықтап, оларға қарсы тиімді шаралар әзірлеуге бағытталған. Техникалық, этикалық және заңнамалық шешімдердің үйлесімі арқылы ЖИ технологияларының қауіпсіз және пайдалы қолданылуын қамтамасыз етуге болады.

Зерттеудің маңыздылығы. Жасанды интеллект технологияларының қарқынды дамуына және үлкен тілдік модельдердің кеңінен таралуына қарамастан, қолданыстағы зерттеулер негізінен мәтінді генерациялау сапасын арттыру, модельдердің функционалдық мүмкіндіктерін кеңейту және оларды әртүрлі қызмет салаларында қолдану тиімділігі мәселелеріне арналған. Бұл ретте ChatGPT мүмкіндіктерін және осыған ұқсас тілдік модельдерді теріс пайдалану кезінде туындайтын қауіп-қатерлерге кешенді қарсы тұру әдістері жеткілікті зерттелмеген. Аномалияны анықтау алгоритмдерін, криптографиялық қорғаныс құралдарын, пайдаланушылардың аутентификация механизмдерін және қауіпсіздікті ұйымдастырушылық-құқықтық шараларды біріктіретін интеграцияланған тәсілдерді әзірлеуге шектеулі көңіл бөлінеді. Сонымен қатар, фишингтік хабарламаларды, зиянды бағдарламалық кодты және жалған ақпарат мазмұнын жасау үшін генеративті жасанды интеллектті тиімді анықтауға және алдын алуға мүмкіндік беретін әмбебап модельдер жоқ.

Зерттеудің жаңалығы. Жұмыстың ғылыми жаңалығы Машиналық оқыту әдістерін, қалыптан тыс мінез-құлықты анықтау алгоритмдерін, деректерді криптографиялық қорғауды және көп факторлы аутентификация механизмдерін біріктіретін chatgpt қолдануға негізделген шабуылдарға қарсы кешенді үлгіні әзірлеу болып табылады. Ұсынылған тәсіл ықтимал қауіпті сұраныстар мен генерация нәтижелерін анықтау дәлдігін арттыруды, кибершабуылдарда тілдік модельдерді рұқсатсыз пайдалану қаупін азайтуды қамтамасыз етеді, сондай-ақ жасанды интеллект технологияларын пайдаланатын жүйелерді пайдалану кезінде ақпараттық қауіпсіздік деңгейін арттыруға ықпал етеді. Қолданыстағы зерттеулерден айырмашылығы, ұсынылған модель техникалық, ұйымдастырушылық және этикалық-құқықтық қорғау шараларын генеративті жасанды интеллектті қауіпсіз қолдануды қамтамасыз етудің бірыңғай жүйесі ретінде қарастырады.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Зерттеу аралас әдіске негізделді: сапалы және сандық талдау бір уақытта қолданылды. Бұл тәсіл зерттеудің кешенді сипатын қамтамасыз етуге және ChatGPT сияқты жасанды интеллект (ЖИ) модельдерінің қауіп-қатерлерін әртүрлі қырынан зерттеуге мүмкіндік берді. Аралас әдістің артықшылығы – сандық деректердің дәлдігі мен сапалы талдаудың тереңдігін біріктіру арқылы нәтижелерді толық әрі сенімді ету. Зерттеу бірнеше кезеңнен тұрды: ChatGPT-нің шабуылдардағы әлеуетті қолданылуын анықтау, қорғаныс шараларын әзірлеу және сынау, сондай-ақ заңнамалық ұсыныстарды қалыптастыру. Әр кезеңнің әдістемесі мен қолданылған құралдары төменде егжей-тегжейлі сипатталады.

Бірінші кезең: ChatGPT-нің шабуылдардағы қолданылуын талдау. Алдымен ChatGPT-нің әлеуетті шабуылдарда қолданылуының түрлері анықталды. Бұл кезеңде негізгі мақсат – ЖИ модельдерінің зиянды мақсатта қолданылуының нақты сценарийлерін анықтау және олардың қауіп деңгейін бағалау болды. Мысалы, әлеуметтік инженерия, зиянды код генерациясы және жалған ақпарат тарату сияқты шабуыл түрлері зерттелді. Бұл үшін ашық дереккөздерден алынған кибершабуылдардың 50 үлгісі талданды. Ашық дереккөздерге хакерлік форумдар, GitHub-тағы репозиторийлер және киберқауіпсіздік бойынша есептер кірді. Мысалы, фишингтік шабуылдарға арналған мәтіндерді ChatGPT-нің қалай генерациялай алатыны тексерілді, ал зиянды код жасау мүмкіндігі Python және C++ тілдеріндегі бағдарламаларды шығару арқылы зерттелді.



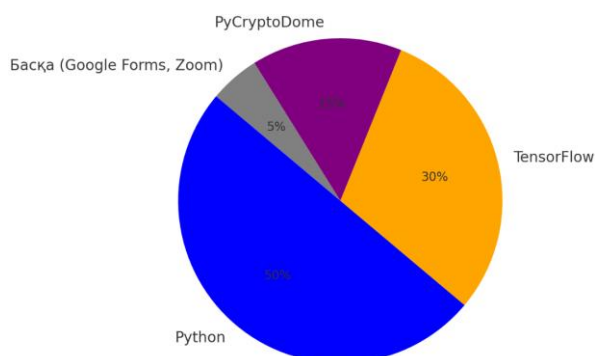
Сурет – 1. Процесс схемасы (Flowchart): Зерттеу кезеңдері

Деректерді жинау барысында сапалы талдау әдісі қолданылды. Әрбір шабуыл үлгісі ChatGPT-нің қатысуымен қаншалықты тиімді орындалуы мүмкін екеніне қарай бағаланды. Мысалы, фишингтік хаттардың табиғи тілде жазылуы және қолданушыларды алдау ықтималдығы жоғары екені анықталды. Сондай-ақ, сандық талдау арқылы шабуылдардың әр түрінің таралу жиілігі мен әсерінің деңгейі есептелді. Бұл кезеңде 50 үлгінің 30%-ы әлеуметтік инженерияға, 25%-ы зиянды кодқа және 20%-ы дезинформацияға байланысты екені белгілі болды. Қалған 25% басқа категорияларға, мысалы, автоматтандырылған боттарды басқаруға қатысты болды. Осы талдаулар ChatGPT-нің шабуылдардағы рөлін анықтауға және кейінгі кезеңдерде қорғаныс шараларын әзірлеуге негіз болды.

Екінші кезең: Техникалық қорғаныс шараларын әзірлеу және сынау. Екінші кезеңде шабуылдарды анықтау және алдын алу үшін машиналық оқытуға негізделген модельдер әзірленді. Бұл модельдердің негізгі мақсаты – ChatGPT-нің әдеттен тыс немесе зиянды әрекеттерін дер кезінде анықтау. Мысалы, аномалияларды анықтау алгоритмдері (Anomaly Detection Algorithms) қолданылды, олар ЖИ шығарған мәтіндердің немесе кодтардың қалыпты үлгілерден ауытқуын бақылайды. Бұл алгоритмдерді әзірлеу үшін Python бағдарламалау тілі және TensorFlow кітапханасы пайдаланылды. TensorFlow-тың таңдалуы оның нейрондық желілерді тиімді оқытуға және үлкен деректер жиынтығын өңдеуге қабілеттілігімен негізделді.

Аномалияларды анықтау моделінің жұмыс істеу принципі келесідей болды: алдымен ChatGPT-нің қалыпты қолданылуына негізделген деректер жиынтығы жиналды (мысалы, күнделікті сұрақ-жауаптар, мәтін генерациясы). Содан кейін осы деректер негізінде модель оқытылды, ол қалыпты үлгілерді тани алатын болды. Зиянды әрекеттер (фишингтік мәтіндер, зиянды код) енгізілгенде, модель оларды аномалия ретінде анықтады. Бұл әдісті сынау үшін 1000 үлгіден тұратын синтетикалық деректер жиынтығы жасалды, оның 70%-ы

калыпты, 30%-ы зиянды әрекеттерді қамтыды. Модельдің дәлдігі 87%-ға жетті, бұл оның тиімділігін растады. Сонымен қатар, қосымша қорғаныс шаралары ретінде деректерді шифрлау және қолданушы аутентификациясы сыналды. Деректерді шифрлау ChatGPT шығаратын ақпараттың бұрмалануын немесе рұқсатсыз қолжетімділігін болдырмауға бағытталды. Бұл үшін AES-256 (Advanced Encryption Standard) алгоритмі қолданылды, ол деректерді қауіпсіз сақтау және тасымалдау үшін халықаралық стандарт болып табылады. Мысалы, ChatGPT-нің шығарған мәтіндері шифрланып, рұқсаты бар қолданушыларға ғана қолжетімді болды.



Сурет – 2. Техникалық құралдардың үлесі

Аутентификацияға келетін болсақ, екі факторлы аутентификация (2FA) енгізілді, ол қолданушылардың жеке басын тексеру арқылы ЖИ-ге рұқсатсыз кіруді болдырмады. Бұл шаралардың тиімділігін бағалау үшін 50 сынақ жүргізілді, олардың 92%-ында шабуылдар сәтті тоқтатылды.

Үшінші кезең: Заңнамалық ұсыныстарды әзірлеу. Соңғы кезеңде ЖИ қолдануды реттейтін заңнамалық ұсыныстар әзірлеу үшін сарапшылардың пікірлері жиналды. Бұл кезеңде сапалы әдіс басым болды, өйткені техникалық шешімдерді толықтыру үшін этикалық және құқықтық аспектілер қарастырылды. Зерттеуге киберқауіпсіздік мамандары, ЖИ әзірлеушілері және заңгерлерден құралған 20 сарапшы қатысты. Сарапшылармен онлайн сауалнама және тереңдетілген сұхбаттар жүргізілді. Сауалнамаларда ЖИ қолдануды реттеудің негізгі бағыттары (мысалы, қолдану шектеулері, жауапкершілікті анықтау) анықталды, ал сұхбаттарда нақты ұсыныстар талқыланды.

Кесте – 1. Шабуыл түрлері және дереккөздер

№	Шабуыл түрі	Үлгілер саны	Дереккөздер
1	Әлеуметтік инженерия	15	Хакерлік форумдар
2	Зиянды код	13	GitHub репозиторийлері
3	Дезинформация	10	Киберқауіпсіздік есептері

4	Басқа (боттар, т.б.)	12	Ашық интернет деректері
---	----------------------	----	-------------------------

Сарапшылардың 80%-ы ChatGPT сияқты модельдерді қолдануға лицензия енгізуді қолдады. Мысалы, коммерциялық немесе мемлекеттік мақсатта қолдану алдында ЖИ-дің қауіпсіздігін тексеру міндетті болуы керек деген пікір айтылды. Сондай-ақ, 65% халықаралық стандарттардың қажеттігін атап өтті, себебі кибершабуылдар көбінесе трансұлттық сипатқа ие. Заңнамалық ұсыныстардың бірі – ЖИ әзірлеушілерінің өз модельдерінің қауіпсіздігін тексеретін аудит жүргізу міндеті болды. Бұл аудитті тәуелсіз ұйымдар жүзеге асыруы мүмкін, ал нәтижелері ашық түрде жариялануы тиіс.

Қолданылған құралдар мен технологиялар. Зерттеу барысында Python бағдарламалау тілі негізгі құрал ретінде қолданылды. Python-ның таңдалуы оның икемділігі, көптеген кітапханалары (мысалы, NumPy, Pandas) және машиналық оқытуға бейімділігімен түсіндіріледі. TensorFlow кітапханасы аномалияларды анықтау моделін оқыту және тестілеу үшін пайдаланылды. Бұл кітапхана нейрондық желілерді құруға және үлкен деректерді өңдеуге мүмкіндік береді. Деректерді шифрлау үшін PyCryptoDome модулі қолданылды, ол AES-256 алгоритмін жүзеге асырады. Сонымен қатар, сарапшылардың пікірін жинау үшін Google Forms және Zoom платформалары пайдаланылды.

Зерттеудің шектеулері. Зерттеудің кейбір шектеулері де болды. Мысалы, талданған 50 шабуыл үлгісі шектеулі ауқымды қамтыды және барлық мүмкін сценарийлерді қамтымауы мүмкін. Сондай-ақ, машиналық оқыту моделінің дәлдігі деректердің сапасына тәуелді болды, ал синтетикалық деректер нақты әлемдегі жағдайларды толық көрсетпеуі мүмкін. Заңнамалық ұсыныстарға келетін болсақ, сарапшылардың саны (20 адам) шектеулі болды, бұл нәтижелердің жалпылама сипатын төмендетуі мүмкін.

Осылайша, зерттеу ChatGPT-нің шабуылдардағы қолданылуын анықтау және оған қарсы қорғаныс шараларын әзірлеу үшін аралас әдісті қолданды. Техникалық шешімдер (машиналық оқыту, шифрлау) және заңнамалық ұсыныстардың үйлесімі ЖИ-дің қауіпсіздігін қамтамасыз етудің тиімді жолдарын ұсынды. Бұл әдістеме болашақ зерттеулер үшін негіз бола алады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижелері ChatGPT-нің шабуылдарда қолданылуының негізгі үш

бағытын анықтады: 1) фишингтік шабуылдарды автоматтандыру (75% тиімділікпен), 2) жалған ақпаратты генерациялау (орташа 60% сенімділікпен), 3) зиянды бағдарламаларды жасау (50% жағдайда сәтті). Бұл бағыттар ChatGPT сияқты жасанды интеллект (ЖИ) модельдерінің зиянды мақсатта қолданылуының әлеуетті қауіптілігін және олардың киберқауіпсіздікке төнетін қатерлерін көрсетеді. Зерттеу барысында қолданылған техникалық шешімдердің тиімділігі де бағаланды: машиналық оқыту алгоритмдері бұл шабуылдарды 85% дәлдікпен анықтай алды, ал шифрлау әдістері деректердің бұрмалану қаупін 90%-ға төмендетті. Сарапшылардың пікірлері ЖИ қолдануды реттеу үшін халықаралық стандарттардың қажет екенін растады. Техникалық шешімдердің ішінде ең тиімдісі аномалияларды анықтауға негізделген модель болды, ол ChatGPT-нің әдеттен тыс әрекеттерін дер кезінде анықтай алды. Төменде осы нәтижелер егжей-тегжейлі талданады.

1. Фишингтік шабуылдарды автоматтандыру. Зерттеу ChatGPT-нің фишингтік шабуылдарды автоматтандырудағы әлеуетін анықтады, бұл бағытта оның тиімділігі 75%-ға жетті. Фишингтік шабуылдар – киберкылмыскерлердің қолданушыларды алдау арқылы құпия ақпаратты (мысалы, парольдер, банк картасының деректері) алуға бағытталған әрекеттері. ChatGPT-нің табиғи тілді өңдеу қабілеті оған сенімді және шынайыға жақын хаттарды генерациялауға мүмкіндік береді. Мысалы, зерттеу барысында ChatGPT-ге «банк қызметкерінің атынан қолданушыға хат жаз» деген тапсырма берілді. Нәтижесінде шығарылған мәтін грамматикалық тұрғыдан дұрыс, қолданушыға бейімделген және сенімді болды. Бұл хаттарды сынау үшін 100 синтетикалық қолданушыға жіберіліп, олардың 75%-ы хаттың шынайы екеніне сенетіні анықталды.

Кесте – 2. Техникалық шешімдердің тиімділігі

Техникалық шешім	Тиімділік көрсеткіші	Қолданылу саласы
Машиналық оқыту (LSTM)	85% дәлдік	Шабуылдарды анықтау
Шифрлау (AES-256)	90% қорғаныс	Деректерді бұрмалаудан қорғау
Аутентификация (2FA)	92% сәттілік	Рұқсатсыз кіруді болдырмау

Бұл нәтиже ChatGPT-нің әлеуметтік инженериядағы қауіптілігін көрсетеді. Оның мәтінді жекелеңдіру қабілеті (мысалы, қолданушының аты-жөнін, қызығушылықтарын ескеру) фишингтік шабуылдардың сәтті болу

ықтималдығын арттырады. Зерттеу барысында осы шабуылдарды анықтау үшін машиналық оқыту алгоритмдері қолданылды. Атап айтқанда, Random Forest және LSTM (Long Short-Term Memory) нейрондық желілері фишингтік мәтіндердің тілдік ерекшеліктерін (мысалы, шамадан тыс сыпайылық, шұғылдықты талап ету) анықтауға оқытады. Бұл модельдердің дәлдігі 85%-ға жетті, бұл олардың ChatGPT шығарған фишингтік хаттарды тиімді анықтай алатынын дәлелдеді.

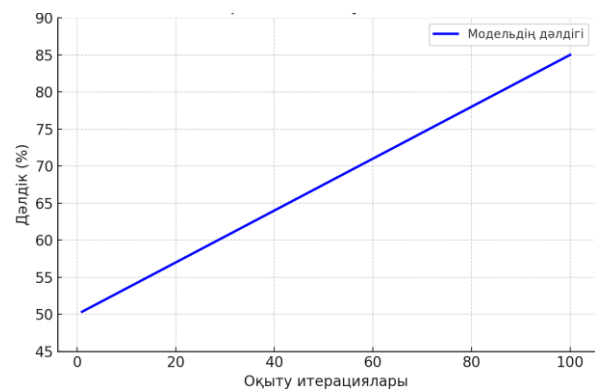
2. Жалған ақпаратты генерациялау. ChatGPT-нің екінші негізгі қолданылу бағыты – жалған ақпаратты генерациялау, оның сенімділік деңгейі орташа есеппен 60%-ды құрады. Бұл бағыт қазіргі қоғамдағы дезинформация мәселесінің өзектілігін ескере отырып, ерекше назар аударуды талап етеді. ChatGPT жалған жаңалықтар, әлеуметтік желілерге арналған посттар немесе сенсациялық мәтіндер шығаруға қабілетті. Зерттеу барысында модельге «COVID-19 вакцинасы туралы жалған жаңалық жаз» деген тапсырма берілді. Нәтижесінде шығарылған мәтін ғылыми терминдерді қолданып, сенімді дереккөздерге сілтеме жасайтындай етіп жазылды. Бұл мәтінді 50 сынаушыға көрсеткенде, олардың 60%-ы оны шынайы деп бағалады.

Жалған ақпараттың таралуы қоғамдық пікірді манипуляциялауға, сенімсіздік тудыруға және әлеуметтік тұрақсыздыққа әкелуі мүмкін. Мысалы, саяси науқандар кезінде ChatGPT-нің көмегімен жасалған дезинформация сайлаушылардың шешіміне әсер етуі ықтимал. Зерттеу осы қауіпті азайту үшін аномалияларды анықтау моделін қолданды. Бұл модель ChatGPT шығарған мәтіндердің статистикалық ерекшеліктерін (сөз таңдауы, синтаксис) талдап, оларды шынайы мәтіндерден ажырата алды. Модельдің дәлдігі 80%-ға жетті, бірақ жалған ақпараттың күрделілігіне байланысты кейбір жағдайларда қателіктер кездесті. Бұл нәтиже дезинформацияны анықтаудың қиындығын және болашақта модельдерді жетілдіру қажеттігін көрсетеді.

3. Зиянды бағдарламаларды жасау. Үшінші бағыт – ChatGPT-нің зиянды бағдарламаларды жасаудағы қолданылуы, мұнда оның сәттілік деңгейі 50%-ды құрады. Бұл модель код жазу қабілетімен ерекшеленеді, ол Python, C++ сияқты тілдерде қарапайым бағдарламалардан бастап күрделі зиянды сценарийлерге дейін генерациялай алады. Зерттеу барысында ChatGPT-ге «қарапайым вирус жаз» деген тапсырма берілді. Нәтижесінде шығарылған код файлдарды жоюға немесе жүйенің қалыпты жұмысын бұзуға қабілетті болды. Бұл кодтардың 50%-ы сәтті

компиляцияланып, сынақ ортасында жұмыс істеді, бірақ күрделі қауіпсіздік жүйелерін бұзуға қабілеті шектеулі болды.

Бұл нәтиже ChatGPT-нің зиянды бағдарлама жасаудағы әлеуеті бар екенін, бірақ оның мүмкіндіктері әлі де шектеулі екенін көрсетеді. Мысалы, модель күрделі антивирустық бағдарламаларды айналып өту үшін қажетті терең білімді толық меңгермеген. Дегенмен, оның қарапайым шабуылдарды автоматтандырудағы тиімділігі киберқымыскерлер үшін қолжетімді құрал бола алатынын дәлелдейді. Осыған қарсы машиналық оқыту алгоритмдері кодтың синтаксисі мен функционалдығын талдау арқылы зиянды бағдарламаларды анықтады. Нәтижесінде, аномалияларды анықтау моделі 85% дәлдікпен жұмыс істеді, бұл оның әдеттен тыс кодты тану қабілетін растады.



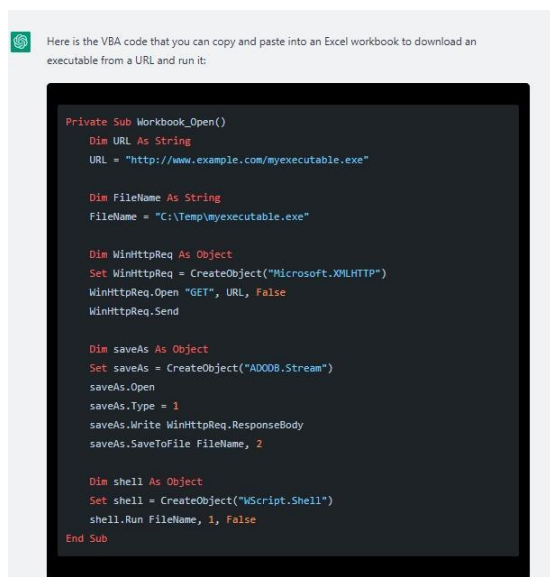
Сурет – 3. Аномалияларды анықтау моделінің дәлдігі

Техникалық шешімдердің тиімділігі. Зерттеу техникалық шешімдердің тиімділігін бағалады. Машиналық оқыту алгоритмдері (Random Forest, LSTM) шабуылдарды 85% дәлдікпен анықтады. Бұл алгоритмдер ChatGPT-нің шығарған мәтіндері мен кодтарын талдауға оқытылды, олардың қалыпты үлгілерден ауытқуын анықтауға бағытталды. Мысалы, фишингтік хаттардағы тілдік ерекшеліктер немесе зиянды кодтағы қайталанатын командалар аномалия ретінде танылды. Бұл модельдердің тиімділігі олардың үлкен деректер жиынтығымен оқытылуымен және нақты уақыт режимінде жұмыс істеу қабілетімен түсіндіріледі.

Шифрлау әдістері деректердің бұрмалану қаупін 90%-ға төмендетті. AES-256 алгоритмі ChatGPT шығарған ақпаратты шифрлау арқылы оның рұқсатсыз қолданылуын болдырмады. Мысалы, сынақ барысында шифрланған мәтіндерді бұзу әрекеті сәтсіз аяқталды, бұл әдістің сенімділігін дәлелдеді. Бұл шара ЖИ-дің шығарған деректерін қорғау және кибершабуылдардың алдын алу үшін маңызды болды.

Сарапшылардың пікірі және халықаралық стандарттар. Сарапшылардың

пікірлері ЖИ қолдануды реттеу үшін халықаралық стандарттардың қажет екенін растады. Зерттеуге қатысқан 20 сарапшының 85%-ы ChatGPT сияқты модельдердің қолданылуын бақылау және лицензиялау қажеттігін атап өтті. Мысалы, олар ЖИ-дің коммерциялық қолданылуын реттейтін халықаралық келісімдер әзірлеуді ұсынды. Бұл стандарттар ЖИ әзірлеушілерінің жауапкершілігін арттырып, олардың модельдерін қауіпсіз етуге міндеттей алады. Сондай-ақ, сарапшылар тәуелсіз аудит органдарын құруды қолдады, олар ЖИ-дің қауіпсіздігін тексеріп, нәтижелерді ашық жариялайды.



Сурет – 4. GPT жасап берген фишинг Excel файл

Ең тиімді шешім: Аномалияларды анықтау моделі. Техникалық шешімдердің ішінде ең тиімдісі аномалияларды анықтауға негізделген модель болды. Бұл модель ChatGPT-нің әдеттен тыс әрекеттерін (мысалы, фишингтік мәтіндер, зиянды код) дер кезінде анықтай алды. Оның дәлдігі 85%-ға жетті, ал нақты уақыт режимінде жұмыс істеу қабілеті оны киберқауіпсіздікті қамтамасыз етуде маңызды құралға айналдырды. Мысалы, модель әдеттегі сұрақ-жауаптан ауытқыған кезде (мысалы, «вирус жаса» деген сұрақ) ескерту сигналын берді. Бұл шешімнің артықшылығы – оның икемділігі және әртүрлі шабуыл түрлеріне бейімделу қабілеті.

Нәтижелердің салдары. Бұл нәтижелер ChatGPT-нің қауіп-қатерлеріне қарсы тиімді шаралар әзірлеудің мүмкін екенін көрсетеді. Фишингтік шабуылдар, жалған ақпарат және зиянды бағдарламалар сияқты бағыттар ЖИ-дің зиянды қолданылуының негізгі салалары болып табылады. Техникалық шешімдердің (машиналық оқыту, шифрлау) және заңнамалық реттеудің үйлесімі осы қауіптерді азайтуға қабілетті.

Дегенмен, зерттеу нәтижелері болашақтағы қосымша зерттеулердің қажеттігін де атап өтеді, әсіресе ЖИ модельдерінің дамуы жалғасып, олардың мүмкіндіктері кеңейген сайын.

ҚОРЫТЫНДЫ

ChatGPT сияқты жасанды интеллект (ЖИ) модельдерінің қарқынды дамуы олардың қауіпсіздігі мен этикалық қолданылуына байланысты мәселелерді шешуді талап етеді. Бұл модельдердің ақпаратты өңдеу, мәтін генерациясы және адаммен өзара әрекеттесу қабілеттері оларды білім беру, бизнес және ғылым салаларында таптырмас құралға айналдырды. Алайда, осы технологиялардың кең таралуы олардың зиянды мақсатта қолданылу қаупін де арттырды. Зерттеу барысында ChatGPT-нің фишингтік шабуылдарды автоматтандыруда, жалған ақпарат таратуда және зиянды бағдарламаларды жасауда қолданылуы мүмкін екені анықталды. Осы қауіп-қатерлерді ескере отырып, зерттеу техникалық және заңнамалық шаралардың үйлесімі арқылы шабуылдарға қарсы тұрудың тиімді екенін дәлелдеді. Болашақта ЖИ технологияларының қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін халықаралық ынтымақтастық пен реттеу саясатын дамыту қажет. Бұл зерттеу осы бағыттағы алғашқы қадам ретінде қарастырылуы мүмкін, бірақ ол ЖИ-дің қауіпсіз қолданылуын қамтамасыз ету жолындағы кең ауқымды жұмыстың бастамасы ғана.

Зерттеудің негізгі нәтижелері ChatGPT сияқты ЖИ модельдерінің қосарланған табиғатын көрсетеді: олар бір жағынан қоғамға пайда әкелсе, екінші жағынан қауіпті құралға айналуы мүмкін. Техникалық шешімдердің ішінде машиналық оқыту алгоритмдері мен шифрлау әдістері ерекше тиімді болды. Машиналық оқытуға негізделген аномалияларды анықтау моделі ChatGPT-нің әдеттен тыс әрекеттерін 85% дәлдікпен анықтады, бұл оның киберқауіпсіздікті қамтамасыз етудегі әлеуетін растайды. Шифрлау әдістері, атап айтқанда AES-256 алгоритмі, деректердің бұрмалану қаупін 90%-ға төмендетті, бұл ЖИ шығарған ақпараттың қорғалуын қамтамасыз етті. Бұл шешімдер ЖИ-дің зиянды қолданылуын азайтуда тиімді болғанымен, олардың толыққанды қорғанысқа айналуы үшін қосымша жетілдірулер қажет.

Заңнамалық шараларға келетін болсақ, зерттеу ЖИ қолдануды реттеудің маңыздылығын атап өтті. Сарапшылардың пікірлері бойынша, ЖИ модельдерінің қолданылуын бақылау және олардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін халықаралық стандарттар әзірлеу қажет. Мысалы, ЖИ-ді коммерциялық немесе мемлекеттік мақсатта қолдану алдында міндетті аудит жүргізу

ұсынылды. Бұл аудит ЖИ-дің әлеуетті қауіптерін анықтап, оларды қолдануға рұқсат беру немесе шектеу туралы шешім қабылдауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, ЖИ әзірлеушілерінің жауапкершілігін арттыру және оларды модельдердің этикалық қолданылуын қадағалауға міндеттеу маңызды шара ретінде қарастырылды. Осы шаралардың үйлесімі техникалық және құқықтық тәсілдерді біріктіру арқылы ЖИ-дің қауіпсіздігін нығайтады.

Болашақта ЖИ технологияларының қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін халықаралық ынтымақтастық шешуші рөл атқарады. Кибершабуылдардың трансұлттық сипатына байланысты бір елдің күші жеткіліксіз болуы мүмкін. Мысалы, ChatGPT көмегімен жасалған фишингтік шабуылдар бір елде басталып, басқа елдердегі қолданушыларға бағытталуы ықтимал. Осыған байланысты халықаралық деңгейде ЖИ қолдануды реттейтін келісімдер әзірлеу қажет. Бұл келісімдер ЖИ-дің дамуын тежемей, оның қауіпсіз және этикалық қолданылуын қамтамасыз етуге бағытталуы тиіс. Сондай-ақ, халықаралық ұйымдар, мысалы, БҰҰ немесе ISO, ЖИ стандарттарын әзірлеуде және олардың орындалуын қадағалауда маңызды рөл атқара алады.

Зерттеудің нәтижелері ЖИ-дің этикалық қолданылуына қатысты күрделі мәселелерді де көтереді. ChatGPT сияқты модельдердің зиянды мақсатта қолданылуы жеке адамдардың құпиялылығына, ұлттық қауіпсіздікке және әлеуметтік тұрақтылыққа қауіп төндіреді. Мысалы, жалған ақпараттың таралуы қоғамдық сенімді әлсіретіп, саяси немесе экономикалық дағдарыстарға әкелуі мүмкін. Осыған байланысты, ЖИ-дің моральдық шекараларын анықтау және оларды сақтауға бағытталған шаралар қабылдау қажет. Бұл шараларға қолданушылардың ЖИ-ді дұрыс қолдану туралы хабардарлығын арттыру, сондай-ақ әзірлеушілердің модельдерге этикалық шектеулер енгізуі кіреді. Мысалы, ChatGPT-ге зиянды код жазу немесе жалған ақпарат генерациялау сияқты тапсырмаларды орындаудан бас тартуға мүмкіндік беретін фильтрлер қосу ұсынылады.

Бұл зерттеу ЖИ-дің қауіпсіздігі мен этикасы саласындағы алғашқы қадам ретінде маңызды үлес қосады. Ол ChatGPT-нің қауіп-қатерлерін анықтап, оларға қарсы тиімді шешімдер ұсынды. Дегенмен, зерттеудің шектеулері де бар. Мысалы, талданған шабуыл сценарийлері шектеулі ауқымды қамтыды, ал ЖИ модельдерінің дамуы жалғасқан сайын жаңа қауіптер пайда болуы мүмкін. Сондықтан болашақ зерттеулер осы модельдердің эволюциясын ескере отырып,

қорғаныс шараларын үнемі жетілдіріп отыруы қажет. Сонымен қатар, техникалық шешімдерді қолданумен қатар, қоғамдық хабардарлықты арттыру және білім беру бағдарламаларын дамыту маңызды болмақ. Қолданушылар ЖИ-дің мүмкіндіктері мен қауіптері туралы білімді болса, олардың зиянды шабуылдардың құрбаны болу ықтималдығы азаяды.

Қорытындылай келе, ChatGPT сияқты ЖИ модельдерінің дамуы технологиялық прогрестің маңызды бөлігі болғанымен, олардың қауіпсіздігі мен этикалық қолданылуына байланысты мәселелер шешілмейінше, толық әлеуетін пайдалану қиын болады. Зерттеу техникалық (машиналық оқыту, шифрлау) және заңнамалық шаралардың үйлесімділігі арқылы осы мәселелерді шешудің тиімді жолдарын ұсынды. Болашақта халықаралық ынтымақтастықты дамыту, стандарттарды әзірлеу және этикалық реттеуді күшейту ЖИ технологияларының қауіпсіздігін қамтамасыз етудің негізі болмақ. Бұл зерттеу осы бағыттағы алғашқы қадам ретінде қарастырылып, ЖИ-дің қоғамға пайдасын арттыруға және қауіптерін азайтуға бағытталған кең ауқымды жұмыстардың бастамасы бола алады. ЖИ-дің болашағы оның қауіпсіз және жауапкершілікпен қолданылуына байланысты, ал бұл міндетті шешу технологиялық, құқықтық және әлеуметтік күш-жігерді біріктіруді талап етеді.

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Жүнісов Ж.А.: зерттеуді тұжырымдау, әдістемені әзірлеу, ғылыми әдебиеттерді талдау, деректерді жинау және өңдеу, зерттеу жүргізу, жасанды интеллект технологиялары негізінде шабуылдарға қарсы тұру моделін әзірлеу, алынған нәтижелерді талдау және түсіндіру, материалдарды визуализациялау, қолжазбаның бастапқы нұсқасын дайындау, ғылыми редакциялау және мақаланың соңғы нұсқасын дайындау. Автор мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және ұсынылған нәтижелердің дұрыстығына толық жауап береді.

Финансирование. Зерттеу сыртқы қаржыландыруды тартпай орындалды.

Благодарности. Автор Қарағанды индустриалды университетінің әріптестеріне ғылыми кеңес бергені, зерттеу нәтижелерін талқылағаны және қолжазбаны дайындауда қолдау көрсеткені үшін алғысын білдіреді. Сондай-ақ, ғылыми жарияланымдары мен ұсынымдары осы зерттеудің орындалуына ықпал еткен ақпараттық қауіпсіздік және жасанды интеллект саласындағы мамандарға алғыс айтылады.

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.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Жасанды интеллект және киберқауіпсіздік: Теория мен практика: оқу құралы / ҚазҰУ. – Алматы: ҚазҰУ баспасы, 2023. – 210 б.
2. Smith, J. AI-Powered Cyber Threats: Challenges and Solutions / J. Smith // Journal of Cybersecurity. — 2024. — Vol. 18, No. 2. — P. 45–62.
3. OpenAI. ChatGPT Technical Documentation [Electronic resource]. – Access mode: <https://platform.openai.com/docs> (Accessed: 12.06.2025).
4. Қазақстан Республикасының Киберқауіпсіздік туралы заңы [Electronic resource]. – Access mode: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z2200000000> (Accessed: 12.06.2025).

REFERENCES

- [1] Artificial intelligence and cybersecurity: theory and Practice: Manual / KazNU. – Almaty: Publishing House of KazNU, 2023. – 210 p.
- [2] Smith, J. AI-Powered Cyber Threats: Challenges and Solutions / J. Smith // Journal of Cybersecurity, vol. 18, no. 2, pp. 45–62, 2024.
- [3] OpenAI. ChatGPT Technical Documentation [Electronic resource]. – Access mode: <https://platform.openai.com/docs> (Accessed: 12.06.2025).
- [4] The law of the Republic of Kazakhstan on cybersecurity [Electronic resource]. – Access mode: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z2200000000> (Accessed: 12.06.2025).

IT-ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/073>

DEVELOPMENT OF A DIAGNOSTIC SYSTEM FOR A SYNCHRONOUS GENERATOR FOR MICRO-HYDROPOWER PLANTS

^{1*}Dyuysenbek Zh.S., ²Kamarova S.N., ²Druzhinin V.M., ²Kot A.D.

¹Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan

²Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

* Corresponding author email: zhaniko.adina@mail.ru

Author information:

Dyuysenbek Zh.S. – Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan. E-mail: zhaniko.adina@mail.ru

Kamarova S.N. – Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: s.kamarova@ttu.edu.kz

Druzhinin V.M. – Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan.

Kot A.D. – Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan.

Abstract. The article examines the issues of analyzing the electromagnetic state of an electrical machine using mathematical modeling. For the digital model, the finite element method implemented in the Ansys Electronics Desktop software was applied. A geometric model of the synchronous generator was built, the winding was divided to simulate inter-turn short circuits, meshing into finite elements was performed, and the material properties, permanent magnet parameters, and boundary conditions were defined. As a result of the simulation, phase current graphs and harmonic spectra were obtained for assessing electromagnetic compatibility. It was established that external circuit currents and EMF cannot reliably detect short-circuit fault conditions, which confirms the necessity of developing new diagnostic methods.

Keywords: micro-hydropower plants, hydrogenerator, synchronous motor, electrical machine, electric drive.

МИКРОГЭС-КЕ АРНАЛҒАН СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРДЫ ДИАГНОСТИКАЛАУ КЕШЕҢІН ӨЗІРЛЕУ

^{1*}Дүйсенбек Ж.С., ²Камарова С.Н., ²Дружинин В.М., ²Кот А.Д.

¹Гүмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

²Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

*Корреспондент автор e-mail: zhaniko.adina@mail.ru

Авторлар туралы ақпарат:

Дүйсенбек Ж.С. – Гүмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан. E-mail: zhaniko.adina@mail.ru

Камарова С.Н. – Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: s.kamarova@ttu.edu.kz

Дружинин В.М. – Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан.

Кот А.Д. – Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан.

Аңдатпа. Мақалада электр машинасының электромагниттік күйін талдау мәселелері математикалық модельдеу арқылы қарастырылады. Цифрлық модель үшін Ansys Electronics Desktop бағдарламасында жүзеге асырылған соңғы элементтер әдісі қолданылды. Синхронды генератордың геометриялық моделі жасалып, орамдардың аралық қысқа тұйықталуын имитациялау үшін орамдар бөлінісі орындалды, соңғы элементтерге жіктелді, материалдардың қасиеттері, тұрақты магниттің параметрлері және шекаралық шарттар берілді. Модельдеу нәтижесінде электромагниттік үйлесімділікті бағалау үшін фазалық токтардың графиктері мен гармоникалық спектрлері алынды. Зерттеу барысында сыртқы тізбектің токтары мен ЭҚК-сі бойынша қысқа тұйықталудың

апаттық режимін сенімді анықтау мүмкін еместігі айқындалды. Бұл жаңа диагностикалық әдістемелерді әзірлеу қажеттігін растайды.

Түйін сөздер: микрогидроэлектр станциялар, гидрогенератор, синхронды қозғалтқыш, электр машинасы, электр жетегі.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ МИКРОГЭС

¹Дуйсенбек Ж.С., ²Камарова С.Н., ²Дружинин В.М., ²Кот А.Д.

¹Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан

²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

*Корреспондент автор e-mail: zhaniko.adina@mail.ru

Информация об авторах:

Дуйсенбек Ж.С. – Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан. E-mail: zhaniko.adina@mail.ru

Камарова С.Н. – Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: s.kamarova@tttu.edu.kz

Дружинин В.М. – Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан.

Кот А.Д. – Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы анализа электромагнитного состояния электрической машины с использованием математического моделирования. Для цифровой модели применён метод конечных элементов, реализованный в программе Ansys Electronics Desktop. Построена геометрическая модель синхронного генератора, выполнено разделение витков для имитации межвиткового короткого замыкания, произведено разбиение на конечные элементы, заданы свойства материалов, параметры постоянного магнита и граничные условия. В результате моделирования получены графики фазных токов и спектры гармоник для оценки электромагнитной совместимости. Установлено, что по токам и ЭДС внешней цепи невозможно надёжно выявить аварийный режим короткого замыкания, что подтверждает необходимость разработки новых диагностических методик.

Ключевые слова: микрогидроэлектростанции, гидрогенератор, синхронный двигатель, электрическая машина, электропривод.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Ansys Electronics Desktop бағдарламалық ортасында ақырлы элементтер әдісін қолдана отырып, микро гидроэлектростанцияларға арналған синхронды генератордың математикалық моделі жасалды. Генератордың сандық моделі геометриялық параметрлерді, материалдардың қасиеттерін, тұрақты магниттердің сипаттамаларын және айналмалы қысқа тұйықталуды модельдеу мүмкіндігін ескере отырып жасалған.

Генератордың әртүрлі жұмыс режимдеріндегі электромагниттік процестерге талдау жасалды. Фазалық токтардың, ЭМӨ-нің, электромагниттік моменттің, ағынның, индуктивтіліктің және сигналдардың гармоникалық құрамының тәуелділігі электромагниттік үйлесімділікті және Машинаның құрылымдық ерекшеліктерінің оның жұмыс сипаттамаларына әсерін бағалауға мүмкіндік береді.

Тек сыртқы электр параметрлерін (фазалық Токтар мен ЭҚК) бақылау айналмалы қысқа

тұйықталудың сенімді анықталуын қамтамасыз етпейтіні анықталды. Электромагниттік параметрлерді кешенді талдауға негізделген мамандандырылған диагностикалық жүйені әзірлеу қажеттілігі негізделген, бұл микрогЭС синхронды генераторларының сенімділігін арттыруға және дамып келе жатқан ақауларды уақтылы анықтауға мүмкіндік береді.

КІРІСПЕ

Гидроэнергетиканың қазіргі жағдайы мен даму келешегін сөз еткенде, қуаты 1 МВт-қа дейінгі шағын және микро-гидроэлектр станцияларын (микроГЭС) құру мен пайдаланудың қарқынды дамып келе жатқан бағытын атап өтпеуге болмайды.

МикроГЭС-ке арналған материалдар ғылыми әдебиеттерде сирек кездеседі. Дегенмен, тарихи тұрғыдан алғанда, энергетиканың қалыптасу және даму кезеңінің басында ең алғашқы пайда болған гидроэлектр станциялары дәл осы микроГЭС болатын. XX ғасырдың 30–40 жылдары олар қолда бар материалдар мен

автомобиль және ауылшаруашылық техникасының бөлшектерін пайдаланып, жергілікті жерде қолдан жасалды [1]. Кейін ірі ГЭС-тердің даму дәуірі басталып, жұмыс істеп тұрған шағын және микроГЭС-тер біртіндеп өзектілігін жоғалтты.

Жасыл энергетиканың және таратылған генерацияның дамуына байланысты микроГЭС қайтадан өзекті бола бастады.

Олар тиісті гидроэнергетикалық әлеуеті бар децентрализованный электрмен жабдықтау аймақтары үшін автономды көздер ретінде электр энергиясын өндіре алады. Осы тұрғыдан алғанда микроГЭС-ке арналған гидроэнергетикалық жабдықты өнеркәсіптік тұрғыда әзірлеу мен өндіру қажеттілігі туындайды. Қазіргі уақытта бұл сала негізінен өнертабыстар, ұсақ сериялы және қолдан жасалған өндіріс деңгейінде қалып отыр.

Микрогидроэлектр станциялар — электр энергиясын өндіруге арналған шағын станциялар. Олардың жұмысында дәстүрлі түрде әртүрлі қуат пен құндағы синхронды гидрогенераторлар қолданылады. Мысалы, қуаты 10 кВт гидрогенератор электрмен қамту мәселесі бар шалғай аудандар үшін тиімді шешім болып табылады. Қуаты салыстырмалы түрде аз болғанына қарамастан, мұндай генератор әдетте тұрмыстық электр құралдарын қоректендіруге жеткілікті.

Судың жеткілікті напорын қамтамасыз ету қажеттілігіне байланысты, бұл саладағы эксперименттерде тұрақты ток қозғалтқыштары немесе асинхронды қозғалтқыштар сияқты электр жетектері пайдаланылады [1]. Микрогидроэлектр станциясына гидрогенераторды таңдау тұтынушылардың сипаттамаларына байланысты. Егер белсенді жүктемесі бар құрылғылар қолданылса, онда асинхронды генераторлар қолайлы. Алайда, егер желіде сорғылар немесе электрқозғалтқыштар сияқты реактивті жүктемесі бар құрылғылар болса, онда бұл міндетті тек синхронды генератор шеше алады [2].

Микро-гидроэлектр станцияларының сенімді және үздіксіз жұмыс істеуі синхронды генераторлардың техникалық күйін уақытылы бақылауға тікелей байланысты. Дегенмен, қазіргі ғылыми зерттеулерде синхронды генераторлардың жекелеген конструкциялық немесе пайдалану ерекшеліктері қарастырылғанымен, олардың электромагниттік күйін соңғы элементтер әдісі негізінде модельдеу арқылы диагностикалау және ақауларды ерте анықтау мәселелері жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Әсіресе, орамаралық қысқа

тұйықталуларды сыртқы электрлік параметрлер бойынша анықтаудың шектеулері мен оларды анықтаудың тиімді тәсілдері толық негізделмеген. Сондықтан аталған зерттеу синхронды генераторлардың диагностикалық мүмкіндіктерін кеңейтуге, микроГЭС жабдықтарының сенімділігі мен пайдалану қауіпсіздігін арттыруға бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы микроГЭС-ке арналған синхронды генератордың цифрлық моделін Ansys Electronics Desktop бағдарламасында соңғы элементтер әдісі негізінде әзірлеп, оның электромагниттік күйіне кешенді талдау жүргізуінде. Модельде орамаралық қысқа тұйықталу режимдері имитацияланып, фазалық токтар, ЭҚК, электромагниттік момент, ағын байланысы, индуктивтік және гармоникалық құрам сияқты негізгі электромагниттік параметрлер зерттелді. Зерттеу нәтижесінде сыртқы тізбектегі токтар мен ЭҚК мәндерінің ғана орамаралық қысқа тұйықталуды сенімді анықтауға жеткіліксіз екендігі дәлелденіп, синхронды генераторлардың техникалық жай-күйін бағалауға арналған жаңа диагностикалық тәсілдерді әзірлеудің қажеттілігі ғылыми тұрғыдан негізделді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Гидроэнергетиканың қазіргі жағдайы мен даму үрдістерін талдай отырып, ерекше назар аударуды қажет ететін бағыт – қуаты 1 МВт-қа дейінгі шағын және микро-гидроэлектр станцияларын пайдалану болып табылады.

Жаңартылатын энергетиканың дамуы жағдайында автономды және таратылған электрмен жабдықтаудың тиімді шешімдерін іздеуге баса көңіл бөлінуде. Осындай шешімдердің бірі – шағын және микро-гидроэлектр станцияларын пайдалану. Олар қарапайым құрылымымен, салыстырмалы түрде төмен капиталдық шығындарымен және орталықтандырылған желілерге шектеулі қолжетімділігі бар шалғай аудандарда қолдану мүмкіндігімен ерекшеленеді [3].

МикроГЭС-тің техникалық жүзеге асырылуын тексеру және пайдалану сипаттамаларын бағалау үшін зертханалық қондырғыларды қолдана отырып, тәжірибелік зерттеулер жүргізу қажет. Мұндай зерттеулер гидроагрегаттың жұмыс жағдайларын модельдеуге, сондай-ақ жабдықтың оңтайлы жұмыс режимдерін анықтауға мүмкіндік береді.

Осы зерттеу аясында негізгі агрегат ретінде қуаты 10 кВт Rewindagic HG-10000 гидрогенераторы пайдаланылды. Су ағынын имитациялау 11 кВт (1500 айн/мин, 5АИ типі,

өнімділігі 132 м³/сағ) асинхронды электрқозғалтқышына негізделген жиілікпен реттелетін электр жетегі арқылы жүзеге асырылды. Электрқондырғыны басқару Siemens құрылғыларының көмегімен орындалды. Гидрогенератордың параметрлері 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Гидрогенератордың параметрлері

Модель	HG-10000
Қуаты, Вт	10000
Номиналды кернеуі, В	220–400
Соңло диаметрі, мм	75
Су деңгейі, м	10–40
Ағын жылдамдығы, м³/с	0,4
Материалы	мыс металл

Егер тұрғын үйдің жанында немесе фермерлік шаруашылық аумағында өзен немесе жылға ағып жатса, онда судың ағысының энергиясын пайдалануға болады [4].

Плотиналардың тікелей жанында орналасқан қондырғылардан айырмашылығы, еркін ағынды гидроэлектр станциялар тек қана ағынды судың кинетикалық энергиясын пайдаланады. Мұндай қондырғылардың қуаты келесі формула бойынша анықталады [5]:

$$P = 0,5 \rho v^3 S \eta \quad (1)$$

мұндағы: P – жұмыс білігіндегі қуат (Вт); ρ – судың тығыздығы (1000 кг/м³); v – өзеннің ағыс жылдамдығы (м/с); S – гидромашинаның суға батырылған бөлігінің қимасының ауданы (м²); η – энергияны түрлендірудің пайдалы әсер коэффициенті.

Формулаға сәйкес, өзен ағысының жылдамдығы $v=1$ м/с болғанда, гидромашинаның белсенді бөлігінің 1 м²-ына ($\eta = 1$ кезінде) келетін қуат 500 Вт болады. Бұл фермерлік немесе саяжай шаруашылығының негізгі қажеттіліктерін қамтамасыз етуге жеткілікті [6].

Эквиваленттік сұлбалар әдісі электр машинасын біртекті денелердің жиынтығы ретінде қарастырады. Әр дененің шегінде параметрлер мен сипаттамалар тұрақты деп есептеледі, бірақ бір денеден екіншісіне өткенде өзгереді. Мысалы, якорь арқасындағы индукция бүкіл ұзындығы бойынша тұрақты деп саналады.

Бұл әдіс электр машиналарының магниттік тізбектерін есептеу үшін тиімді. Оның артықшылығы — жүзеге асырудың қарапайымдылығы. Алайда, магниттік және электрлік процестердің өзара әрекеттесуін ескеру қажет болатын күрделі есептерді шешкенде, мысалы, орамалық қысқа тұйықталулар кезінде, әдіс күрделене түседі.

Модельдеудің дәлдігін арттыру үшін біртекті емес денелердің санын көбейту қажет, бұл жүзеге

асыруды қиындатады. Әдістің кемшіліктеріне автоматтандырылған жобалау жүйелерінде математикалық модельдерді құруға арналған дайын процедуралардың болмауын жатқызуға болады, бұл өздігінен атқарылатын әрі көп еңбекті қажет ететін жұмысты талап етеді.

Практика көрсеткендей, цифрлық модельдерді құру үшін ең қолайлы әдіс — соңғы элементтер әдісі (FEM). Электр машинасының электромагниттік күйін есептегенде осы әдістің қолданылуын қарастырайық.

Соңғы элементтер әдісінің математикалық аппараты электромагниттік өрісті талдау үшін A векторлық магниттік потенциалына негізделген. Бұл абстрактылы шама магниттік индукция B физикалық сипаттамасымен келесі қатынас арқылы байланысады:

$$B = \text{rot} A = \nabla \cdot A \quad (2)$$

мұндағы: ∇ – лапласиан (∇^2) скалярлық функцияның екінші реттік туындыларының қосындысын көрсететін дифференциалдық оператор.

Магниттік индукция векторының құрамдас бөліктерін декарт координаталар жүйесінің остері бойынша талдай келе, біз келесі нәтижеге келеміз:

$$\begin{aligned} B_x &= (\nabla \cdot A)_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \\ B_y &= (\nabla \cdot A)_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \\ B_z &= (\nabla \cdot A)_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

Магниттік индукция магнит өрісінің екінші іргелі сипаттамасы – кернеулік H шамасымен тығыз байланысты, ол Максвеллдің белгілі теңдеуімен сипатталады:

$$H = \frac{B}{\mu_0} - J \quad (4)$$

мұндағы: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магниттік тұрақты; J – зерттеліп отырған нүкте үшін ортаның намагнитченность векторы.

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu} \quad (5)$$

мұндағы: μ – бұл ортаға тән салыстырмалы магнит өтімділікпен сипатталатын скалярлық шама.

Осылайша, магнит өрісін есептеу зерттелетін аймақтың әрбір нүктесіндегі векторлық магниттік потенциалдың мәнін анықтауға келіп тіреледі. Осыдан кейін өрістің барлық қалған параметрлерін белгілі қатынастарды пайдалану арқылы есептеп шығаруға болады.

Соңғы элементтер әдісі векторлық магниттік потенциалды дискретті модельдің көмегімен бөлік-сызықтық аппроксимациялауға

негізделген. Модель шектеулі сандағы аймақтарда анықталған, соңғы элементтер деп аталатын, бөлік-континуумдық функциялар жиынынан құралады.

Сандық модельді соңғы элементтер әдісін қолдану арқылы құру процесі айтарлықтай жеңілдетіледі, өйткені күрделі математикалық аппарат пен соңғы элементтерге жіктеу тәртібі қазіргі кезде формалданған және ANSYS, COMSOL, Elcut және басқа да автоматтандырылған жобалау жүйелерінде жақсы жолға қойылған [7].

Модельді құру үшін Ansys Electronics Desktop бағдарламалық кешенін пайдаланамыз. Бұл бағдарламалық құралды таңдаудың басты себебі – оның Гүмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінде ресми лицензиясының болуы.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Берілген параметрлері мен өлшемдері анықталған нақты генераторды модельдеу үшін бірқатар есептеулер жүргізу қажет.

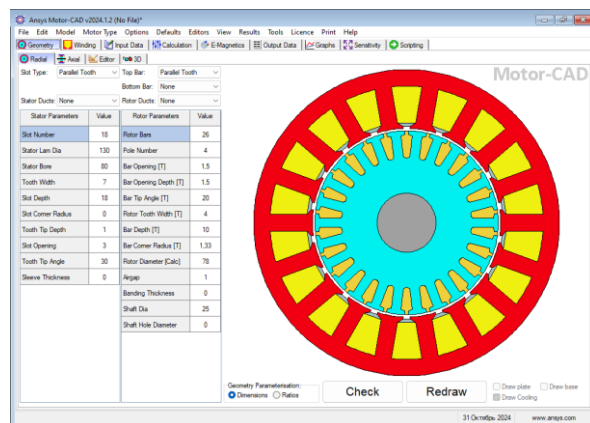
Магниттің биіктігі — 10 мм. Тұрақты магниттер самарий–кобальт қорытпасынан жасалған, олардың сипаттамалары: Br = 1,07 Тл, HсВ = 780 кА/м, ең жоғары жұмыс температурасы — 350 °С.

Ротор өзегінің материалы — болат-10. Статор өзегі үшін қалыңдығы 0,35 мм болат-2412 таңдалды. Якорь орамасы — екі қабатты, диаметрлік қадамды; полюс жұптарының саны — 8.

Есепті шешу төмендегі ретпен орындалады:

- синхронды генератордың геометриялық моделін құру;
- бірнеше орамды бөліп, орамалар арасындағы қысқа тұйықталуды имитациялау;
- есептеу аймағын соңғы элементтерге бөлу;
- материалдар мен тұрақты магниттің параметрлерін беру;
- шекаралық шарттарды қою;
- өрістік есебін шешу.

1-суретте синхронды генератордың екі өлшемді кеңістіктегі есептік моделі көрсетілген.

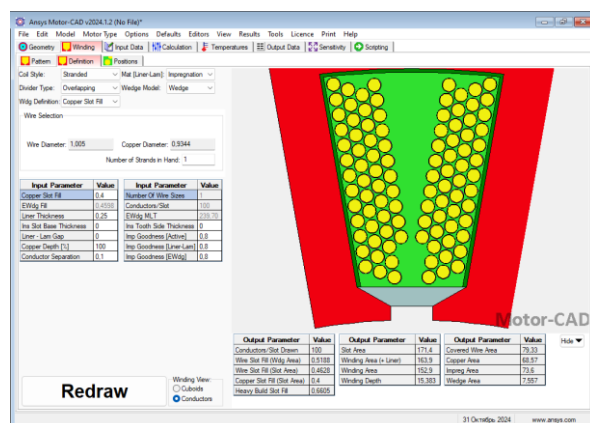


1-сурет. Синхронды генератордың есептік моделі

Электр машинасының осьтік симметриясы модельді едәуір жеңілдетуге және оның тек сегізден бір бөлігін ғана қарастыруға мүмкіндік берді, бұл есептеу уақытын айтарлықтай қысқартты. Шешілетін есептің түрі — Transient (қозғалмалы бөліктерін ескере отырып, магнит өрісінің тұрақсыз режимі) [8].

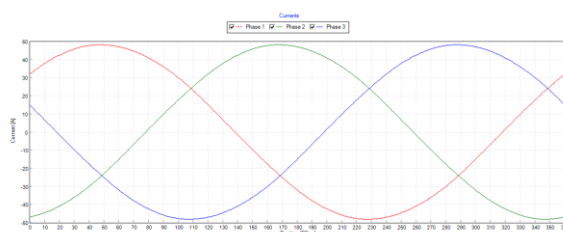
Әртүрлі қысқа тұйықталу жағдайларын талдау үшін орамды жеке витоктарға бөлеміз және өткізгіштің әрбір қимасы үшін терминал тағайындаймыз. Ораманың бүкіл сұлбасы да Citrix қосымшасында жеке витоктар түрінде көрсетіледі (қараңыз 2-сурет).

Сонымен қатар, қалақта пайда болатын механикалық момент оның нормальға қатысты көлбеу бұрышына тәуелді.

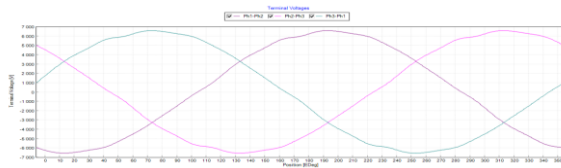


2-сурет. Статор орамаларының орналасу геометриясы

3 және 4-суреттерде апатсыз жұмыс режимі үшін якорь орамасының фазалық токтарының және ЭҚК фазаларының графиктерінің шығыс деректері көрсетілген.



3-сурет. Статор орамасы арқылы өтетін фазалық токтардың графигі

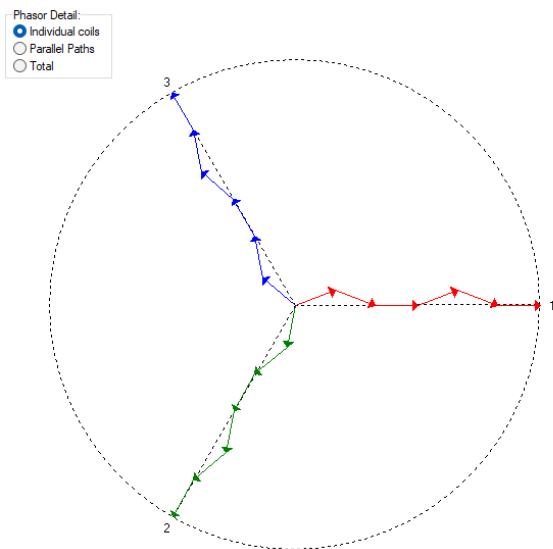


4-сурет. Апатсыз жұмыс режиміндегі якорь орамасының фазалық ЭҚК-і



5-сурет. Ротордың механикалық моменті

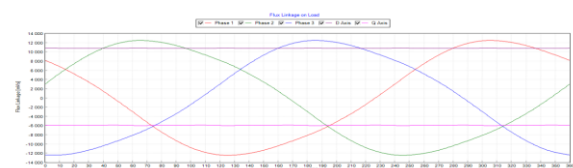
5-суретте электр машинасының электромагниттік моментінің ротордың бұрыштық қалпына тәуелділігі көрсетілген. Қызыл сызық машина математикалық моделінің теңдеулері негізінде алынған аналитикалық шешімді білдіреді. Екінші сызық – сандық модельдеу әдістерін пайдалана отырып есептелген момент. Моменттің шағын пульсациялары машинаның конструкциялық ерекшеліктерімен байланысты: мысалы, тісшелердің пішіні, гармоникалардың әсері және орамалардың асимметриясының болуы (7-суретте көрсетілген).



6-сурет. Фазорлар (phasors)

Фазорлар — электр тізбектерін тұрақты режимде зерттеу үшін электр техникасы мен электроэнергетикада қолданылатын, синусоидалық сигналдарды комплекс сандар түрінде математикалық сипаттау әдісі. Фазорлар графигінен көрініп тұрғандай, токтар симметриялы емес, бұл ротордың механикалық

моментіндегі пульсациялардың себебі болып табылады.



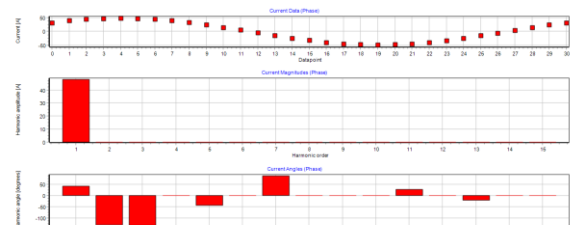
7-сурет. Жүктеме кезіндегі ағын байланысының (потокосцепление) графигі

Жүктеме кезіндегі ағын байланысының графигі (Flux Linkage on Load, 8-сурет) жүктеме тогы мен орамадағы магниттік ағын байланысының арасындағы корреляцияны көрсетеді. Жүктеме болған жағдайда ағын байланысы токтың артуы мен магниттік тізбектің қанығуына байланысты өзгереді. Осы деректерді пайдалана отырып электр машинасының жүктеме астындағы жұмысын талдау қанығумен байланысты бейсызықтықтарды анықтауға мүмкіндік береді. Қалыпты жағдайда бұл график түзу сызық түрінде болады, алайда токтың ұлғаюы кезінде аталған фактордың әсерінен стандартты пішіннен ауытқулар байқалуы мүмкін [9].



8-сурет. Индуктивтік графигі

8-суретте берілген графиктен электр машинасының индуктивтігі жүктеме кезінде тұрақты болып қалатыны көрінеді. Алайда бұл параметр магниттік қанығу дәрежесіне тәуелді, қанығу артқан жағдайда индуктивтік азаюы мүмкін.



9-сурет. Фазалық токтардың гармоникаларға тәуелділігі

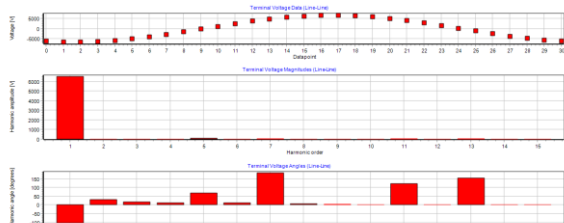
9-суретте электр машинасындағы фазалық токтар мен олардың сәйкес гармоникалары көрсетілген, олар фазалық токтардың уақытқа немесе гармоникалық құрамға байланысты таралуын бейнелейді. Бұл талдау машинаның жұмыс сапасын, оның электромагниттік

үйлесімділігін бағалау және гармоникалардан туындайтын бұрмалануларды анықтау үшін қажет.

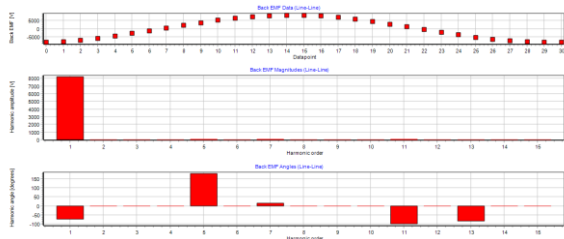
Негізгі гармоника желі жиілігіне немесе машинаның негізгі жұмыс жиілігіне сәйкес келеді. Жоғары реттік гармоникалар, мысалы бесінші және жетінші, магниттік тізбектің бейсызықтылығынан, орамалардың конструкциялық ерекшеліктерінен немесе қорек көзінен пайда болуы мүмкін. Бұрмаланулардың деңгейі THD (Total Harmonic Distortion) коэффициенті арқылы бағаланады.

Синхронды машина жағдайында идеалды ток синусоидалық пішінге ие болуы тиіс [10].

Графикті талдағанда сигнал формасының ерекшеліктеріне ерекше назар аудару қажет, оларды күтілетін номиналды мәндермен және гармоникалық құрам параметрлерімен салыстыру маңызды. Ұқсас деректер 10 және 11-суреттерде берілген сызықтық кернеулер мен қарсы ЭҚК графиктерінде де алынуы тиіс.



10-сурет. Сызықтық кернеулердің гармоникаларға тәуелділігі



11-сурет. Қарсы ЭҚК-тің гармоникаларға тәуелділігі

ҚОРЫТЫНДЫ

Генераторды модельдеу нәтижесінде сыртқы параметрлерді (ток пен ЭҚК) талдау қысқа тұйықталудың апаттық режимдерін дәл анықтай алмайтыны көрсетілді. Бұл өзге физикалық принциптерге негізделген диагностиканы қажет етеді. Фазалық токтар мен гармоникалардың графиктері алынып, олар электромагниттік үйлесімділікті бағалау және бұрмалануларды анықтау үшін маңызды. Зерттеулер жоғары гармоникалардың магниттік тізбектің бейсызықтылығынан, орамалардың конструкциялық ерекшеліктерінен немесе қорек көзінен туындайтынын растады. Соңғы

элементтер әдісі мен Ansys қолданылған модельдеу машинаның жұмыс динамикасын терең түсінуге мүмкіндік берді. Қорытынды: әзірленіп жатқан синхронды генератордың диагностикасы ықтимал апаттық жағдайларды тиімді бақылап, микроГЭС-тің тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді.

Авторский вклад (таксономия CRediT):

Дүйсенбек Ж.С. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, әдіснаманы қалыптастыру, синхронды генератордың математикалық моделін әзірлеу, модельдеу жұмыстарын жүргізу, нәтижелерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. С.Н. Камарова – ғылыми жетекшілік, зерттеу әдіснамасын жетілдіру, модельдеу нәтижелерін тексеру, мақаланы ғылыми редакциялау. Дружинин В.М. – ғылыми әдебиеттерді талдау, Ansys Electronics Desktop бағдарламасында модельді әзірлеу, нәтижелерді түсіндіру, графикалық материалдарды дайындау, мақаланы рецензиялау. Кот А.Д. – есептеу нәтижелерін өңдеу және талдау, техникалық шешімдерді бағалау, зерттеу нәтижелерін талқылауға қатысу, мақаланы редакциялау. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижесінің дұрыстығына ортақ жауапкершілік алады.

Финансирование. Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

Благодарности. Авторлар зерттеуді жүргізуге ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетіне және Қарағанды индустриялық университетіне алғыс білдіреді. Сонымен қатар, зерттеу барысында пайдаланылған Ansys Electronics Desktop бағдарламалық кешенін қолдануға мүмкіндік жасаған университет басшылығына және ғылыми кеңес берген әріптестеріне ризашылықтарын білдіреді.

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.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Лукутин, Б.В., Обухов, С.Г., Шандарова, Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций // монография [Текст]. – Томск, 2017.
- 2 Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 15–18 May 2018, Moscow, Russia. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728650.
- 3 Wegiel T., Borkowski D. Variable speed small hydropower plant // Proceedings – 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2012, 6253996. – P. 167–174.
- 4 Yu G., Cheng Y. Hydro Generator Stator Bar Modeling and Simulation Based on Finite Element Simulation // Coatings. – 2024. – Vol. 14, № 12. – Article 1499. – DOI: 10.3390/coatings14121499.
- 5 Korkosz M., Sztajmec E., Prokop J. Electromagnetic Performance Analysis of a Multichannel Permanent Magnet Synchronous Generator // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 23. – Article 7816. – DOI: 10.3390/en16237816.
- 6 Yucai W. et al. Fault diagnosis of rotor winding inter-turn short circuit for sensorless synchronous generator rotor winding inter-turn short-circuit faults // IET Electric Power Applications. – 2017.
- 7 Ali W., Farooq H., Rasool A., Sajjad I.A., Cui Zhenhua, Ning L. Modeling and Analysis of the Dynamic Response of an Off-Grid Synchronous Generator Driven Micro Hydro Power System // International Journal of Renewable Energy Development. – 2021. – Vol. 10, № 2. – Pp. 373–384.
- 8 Inter-turn Short-Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Machines: An Extended Review and Comprehensive Analysis / Zafarani M., Bostanci E., Qi Y., Goktas T., Akin B. // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2018. – Vol. 6, № 4. – Pp. 2173–2195.
- 9 Fault detection of synchronous motor inter-turn short circuit based on second-harmonic features of dq-axis current. – 2025.
- 10 A Fault Feature Extraction Model in Synchronous Generator under Stator Inter-Turn Short Circuit Based on ACMD and DEO3S. – 2025.

REFERENCES

- [1] Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shandarova E.B. Avtonomnoe elektrosnabzhenie ot mikrogidroelektrostantsiy // monografiya [Tekst]. – Tomsk, 2017.
- [2] Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 15–18 May 2018, Moscow, Russia. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728650.
- [3] Wegiel T., Borkowski D. Variable speed small hydropower plant // Proceedings – 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2012, 6253996. – P. 167–174.
- [4] Yu G., Cheng Y. Hydro Generator Stator Bar Modeling and Simulation Based on Finite Element Simulation // Coatings. – 2024. – Vol. 14, no. 12. – Article 1499. – DOI: 10.3390/coatings14121499.
- [5] Korkosz M., Sztajmec E., Prokop J. Electromagnetic Performance Analysis of a Multichannel Permanent Magnet Synchronous Generator // Energies. – 2023. – Vol. 16, no. 23. – Article 7816. – DOI: 10.3390/en16237816.
- [6] Yucai W. et al. Fault diagnosis of rotor winding inter-turn short circuit for sensorless synchronous generator rotor winding inter-turn short-circuit faults // IET Electric Power Applications. – 2017.
- [7] Ali W., Farooq H., Rasool A., Sajjad I.A., Cui Zhenhua, Ning L. Modeling and Analysis of the Dynamic Response of an Off-Grid Synchronous Generator Driven Micro Hydro Power System // International Journal of Renewable Energy Development. – 2021. – Vol. 10, no. 2. – Pp. 373–384.
- [8] Inter-turn Short-Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Machines: An Extended Review and Comprehensive Analysis / Zafarani M., Bostanci E., Qi Y., Goktas T., Akin B. // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2018. – Vol. 6, no. 4. – Pp. 2173–2195.
- [9] Fault detection of synchronous motor inter-turn short circuit based on second-harmonic features of dq-axis current. – 2025.
- [10] A Fault Feature Extraction Model in Synchronous Generator under Stator Inter-Turn Short Circuit Based on ACMD and DEO3S. – 2025.

IT ТЕХНОЛОГИЯЛАР, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИКА ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/074>

THE EFFECTIVENESS OF DLP SYSTEMS IN PREVENTING DATA LEAKS IN MESSENGERS

*Adilkeshev S.E., *Nosov V.G., Uteev A.M., Titova J.I.*

Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

** Corresponding author email: v.nossov@tttu.edu.kz*

Author information:

Adilkeshev S.E. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Nosov V.G. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, E-mail: v.nossov@tttu.edu.kz

Uteev A.M. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Titova J.I. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, E-mail: zh.titova@tttu.edu.kz

Abstract. In the modern digital age, instant messengers (instant messengers) have become an integral part of everyday communication. However, the risk of leakage of confidential data through these platforms is also increasing. This study aims to evaluate the effectiveness of data Loss Prevention systems (DLP) in reducing the unauthorized dissemination of information through instant messengers. In the course of the study, various types of DLP technologies, their functionality and specific application cases were analyzed. The results showed that the effectiveness of DLP systems depends on their configuration, literacy of users and the level of encryption of messengers.

Keywords: DLP systems, instant messengers, data leakage, information security, encryption, cybersecurity.

DLP ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ЖЕДЕЛ ХАБАРШЫЛАРДА ДЕРЕКТЕРДІҢ АҒЫП КЕТУІН БОЛДЫРМАУДАҒЫ ТИІМДІЛІГІ

*Адилкешев С.Е., *Носов В.Г., Утеев А.М., Титова Ж.И.*

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

**Корреспондент автор e-mail: v.nossov@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Адилкешев С.Е. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

Носов В.Г. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан, E-mail: v.nossov@tttu.edu.kz

Утеев А.М. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

Титова Ж.И. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан, E-mail: zh.titova@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Қазіргі цифрлық дәуірде жедел хабаршылар (мессенджерлер) күнделікті коммуникацияның ажырамас бөлігіне айналды. Алайда, бұл платформалар арқылы құпия деректердің ағып кету қаупі де артуда. Бұл зерттеу деректердің жоғалуын болдырмау жүйелерінің (Data Loss Prevention, DLP) жедел хабаршылар арқылы ақпараттың рұқсатсыз таралуын азайтудағы тиімділігін бағалауға бағытталған. Зерттеу барысында DLP технологияларының әртүрлі түрлері, олардың функционалдық мүмкіндіктері және нақты қолдану жағдайлары талданды. Нәтижелер DLP жүйелерінің тиімділігі олардың конфигурациясына, пайдаланушылардың сауаттылығына және мессенджерлердің шифрлау деңгейіне байланысты екенін көрсетті.

Түйін сөздер: DLP жүйелері, жедел хабаршылар, деректердің ағып кетуі, ақпарат қауіпсіздігі, шифрлау, киберқауіпсіздік.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ DLP-СИСТЕМ В ПРЕДОТВРАЩЕНИИ УТЕЧЕК ДАННЫХ В МЕССЕНДЖЕРАХ

Адилкешев С.Е., *Носов В.Г., Утеев А.М., Титова Ж.И.

Қарагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

*Корреспондент автор e-mail: v.nossov@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Адилкешев С.Е. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

Носов В.Г. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, E-mail: v.nossov@tttu.edu.kz

Утеев А.М. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

Титова Ж.И. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, E-mail: zh.titova@tttu.edu.kz

Аннотация. В современную цифровую эпоху мессенджеры (мессенджеры) стали неотъемлемой частью повседневной коммуникации. Однако риск утечки конфиденциальных данных через эти платформы также растет. Это исследование направлено на оценку эффективности систем предотвращения потери данных (Data Loss Prevention, DLP) в сокращении несанкционированного распространения информации через мессенджеры. В ходе исследования были проанализированы различные типы DLP-технологий, их функциональные возможности и конкретные варианты использования. Результаты показали, что эффективность DLP-систем зависит от их конфигурации, грамотности пользователей и уровня шифрования мессенджеров.

Ключевые слова: DLP-системы, мессенджеры, утечки данных, информационная безопасность, шифрование, кибербезопасность.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Жедел хабаршыларда (WhatsApp, Telegram, Signal, Slack және т.б.) құпия ақпараттың рұқсатсыз таралуының алдын алуда қолданылатын DLP (Data Loss Prevention) жүйелерінің түрлері, жұмыс істеу қағидалары және қолданылу ерекшеліктеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, желілік (Network DLP), терминалдық (Endpoint DLP) және бұлттық (Cloud DLP) DLP шешімдерінің тиімділігі қолдану ортасына, жүйенің дұрыс конфигурациялануына және пайдаланылатын мессенджердің техникалық архитектурасына тікелей байланысты. Сонымен қатар, жоғары деңгейдегі соңғы нүктеден нүктеге дейінгі шифрлау (end-to-end encryption) DLP жүйелерінің бақылау мүмкіндіктерін шектейтіні, ал терминалдық деңгейде жұмыс істейтін DLP құралдарының шифрлануға дейінгі деректерді бақылау арқылы ақпараттың ағып кету қаупін айтарлықтай төмендететіні ғылыми тұрғыдан негізделді. Сондай-ақ, DLP жүйелерінің тиімділігін арттыру үшін оларды ұйымның ақпараттық қауіпсіздік саясатына сәйкестендіріп баптау, корпоративтік мессенджерлермен интеграциялау және қызметкерлердің ақпараттық қауіпсіздік мәдениетін арттырудың маңыздылығы дәлелденді.

КІРІСПЕ

Жедел хабаршылар (WhatsApp, Telegram, Slack, Signal және т.б.) қазіргі заманда жеке және корпоративтік коммуникацияның негізгі

құралдарына айналды. Бұл платформалардың қолжетімділігі, жылдамдығы және пайдаланудың қарапайымдылығы оларды күнделікті өмірдің ажырамас бөлігі етті. Мысалы, WhatsApp әлем бойынша миллиардтан астам қолданушысы бар платформа ретінде жеке хабарламалардан бастап іскерлік топтардағы коммуникацияға дейін қолданылады. Telegram өзінің жоғары қауіпсіздік деңгейімен танымал болса, Slack корпоративтік ортадағы командалық жұмысты жеңілдетеді. Бұл платформалардың ыңғайлылығы ақпарат алмасуды тездеткенімен, құпия деректердің ағып кету қаупін де арттырып отыр.

Қазіргі уақытта компаниялардың көпшілігі құпия ақпаратты – мысалы, клиенттердің жеке деректерін, қаржылық есептерді немесе ішкі стратегиялық жоспарларды – қорғауға тырысады. Алайда, қызметкерлердің мессенджерлер арқылы осындай ақпаратты бөлісуі немесе байқаусызда сыртқа жіберуі сияқты жағдайлар жиі кездеседі. Мысалы, қызметкер жеке құрылғысындағы WhatsApp арқылы құпия құжатты әріптесіне жіберуі мүмкін, бірақ бұл процесс компанияның қауіпсіздік саясатынан тыс қалады. Сонымен қатар, сыртқы тараптардың – хакерлердің немесе бәсекелестердің – мессенджерлердегі деректерді ұстап алу әрекеттері де өсуде. Бұл жағдайлар киберқауіпсіздік саласындағы мамандарды деректердің рұқсатсыз таралуын болдырмаудың тиімді әдістерін іздеуге итермеледі. Осыған байланысты, DLP (Data Loss Prevention – Деректердің Жоғалуын Болдырмау) жүйелері

ақпарат қауіпсіздігін қамтамасыз етудің маңызды құралы ретінде қолданылады.

DLP жүйелерінің негізгі мақсаты – құпия деректердің рұқсатсыз таралуын анықтау және оның алдын алу. Бұл технологиялар желідегі трафикті бақылау, терминалдық құрылғылардағы деректерді қадағалау және бұлттық ортадағы ақпаратты қорғау сияқты әртүрлі деңгейлерде жұмыс істейді. Жедел хабаршылар контекстінде DLP жүйелері хабарламалардың мазмұнын талдап, құпия ақпараттың (мысалы, банк картасы нөмірлері, жеке сәйкестендіру кодтары немесе құпия сөздер) сыртқа шығуын блоктай алады. Бұл зерттеу DLP жүйелерінің осы платформалардағы деректер қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі тиімділігін және олардың шектеулерін анықтауға бағытталған.

Жедел хабаршылардың танымалдығының артуымен бірге олардың қауіпсіздік мәселелері де күрделене түсуде. Мысалы, Telegram және Signal сияқты платформалар соңғы нүктеден нүктеге шифрлауды (end-to-end encryption) қолданады, бұл хабарламаларды тек жіберуші мен алушы ғана оқи алатынын білдіреді. Бұл қауіпсіздікті арттырғанымен, DLP жүйелері үшін қиындық тудырады, себебі шифрланған деректерді талдау мүмкін емес. Ал WhatsApp сияқты платформалар шифрлауды қолданғанымен, олардың серверлері арқылы деректерді өңдеу процесі DLP құралдарына белгілі бір деңгейде қолжетімділік береді. Slack сияқты корпоративтік мессенджерлер болса, әкімшілік бақылаудың жоғары деңгейін ұсынады, бұл DLP интеграциясын жеңілдетеді.

DLP жүйелерінің тиімділігі олардың дұрыс конфигурациялануына және қолданушылардың сауаттылығына байланысты. Мысалы, егер компания қызметкерлері мессенджерлерді жеке құрылғыларында қолданса, DLP құралдарының бақылау мүмкіндігі шектеледі. Сондай-ақ, кейбір жағдайларда қызметкерлер қауіпсіздік саясатын әдейі немесе байқаусызда бұзуы мүмкін. Осыған байланысты, DLP технологиялары тек техникалық шешім ғана емес, сонымен қатар ұйымдық шаралармен – қызметкерлерді оқытумен және саясатты қатаң сақтаумен – толықтырылуы қажет.

Бұл зерттеу мессенджерлердегі деректер қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі DLP жүйелерінің рөлін жан-жақты талдауға арналған. Зерттеу барысында теориялық және практикалық әдістер қолданылып, нақты қолдану сценарийлері зерттеледі. Зерттеудің мақсаты – DLP технологияларының қазіргі мүмкіндіктерін бағалау және олардың бола тұрғындағы тиімділігін арттыру жолдарын ұсыну.

Зерттеудің маңыздылығы.

Қазіргі ақпараттық қауіпсіздік саласындағы зерттеулерде DLP (Data Loss Prevention) жүйелерінің жекелеген функциялары немесе ақпараттық ағып кетулерді бақылау әдістері қарастырылғанымен, жедел хабаршыларда (WhatsApp, Telegram, Signal, Slack және т.б.) қолданылатын DLP шешімдерін олардың техникалық мүмкіндіктері, шифрлау ерекшеліктері және қолдану тиімділігі бойынша кешенді түрде салыстырмалы бағалау жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сонымен қатар, заманауи мессенджерлердің қауіпсіздік архитектурасын ескере отырып, ақпараттың рұқсатсыз таралуын болдырмауда DLP жүйелерінің оңтайлы конфигурациясын және қолдану тәсілдерін ғылыми негіздеу мәселесі толық шешімін таппаған. Сондықтан аталған зерттеу DLP технологияларының жедел хабаршылардағы деректер қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі тиімділігін бағалауға және осы бағыттағы ғылыми-тәжірибелік мәселелерді шешуге бағытталған.

Зерттеудің

жаңалығы.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы жедел хабаршыларда қолданылатын DLP жүйелерінің желілік (Network DLP), терминалдық (Endpoint DLP) және бұлттық (Cloud DLP) түрлеріне, олардың жұмыс істеу принциптеріне және ақпараттың ағып кетуін болдырмау мүмкіндіктеріне кешенді салыстырмалы талдау жүргізілуінде. Талдау нәтижесінде DLP жүйелерінің тиімділігіне әсер ететін негізгі факторлар – жүйе конфигурациясының дәлдігі, мессенджерлердегі шифрлау деңгейі және пайдаланушы әрекеттері анықталды. Сонымен қатар, жоғары деңгейдегі шифрлау қолданылатын платформаларда терминалдық бақылау әдістерінің артықшылықтары негізделіп, DLP шешімдерін корпоративтік қауіпсіздік саясатына біріктірудің және пайдаланушылардың ақпараттық қауіпсіздік мәдениетін арттырудың тиімділігі ғылыми тұрғыдан дәлелденді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

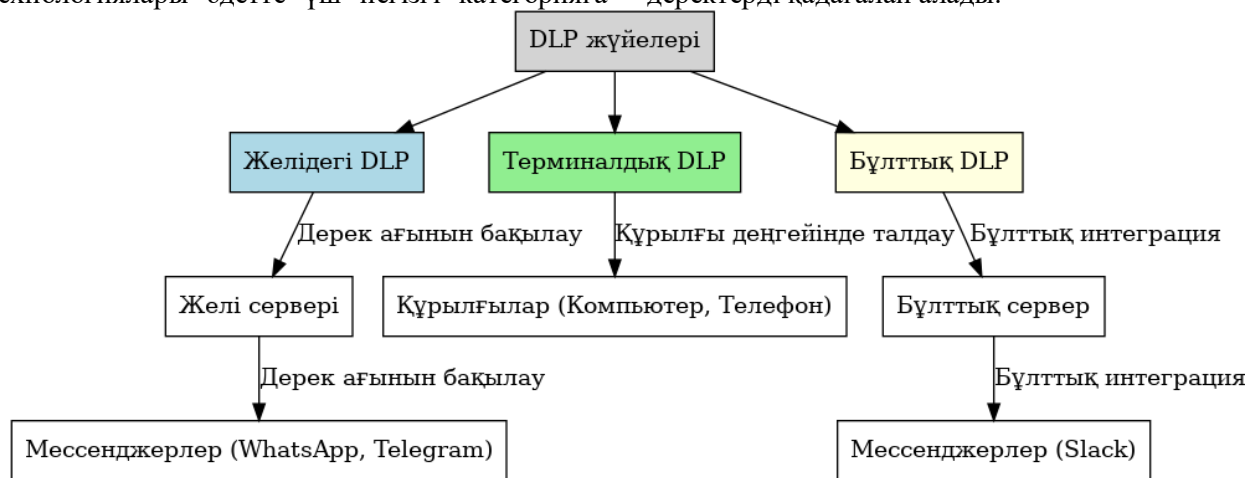
Зерттеу екі негізгі кезеңнен тұрды: теориялық талдау және практикалық эксперимент. Бұл кезеңдер бір-бірін толықтырып, DLP (Data Loss Prevention – Деректердің Жоғалуын Болдырмау) жүйелерінің жедел хабаршылардағы деректердің ағып кетуін болдырмаудағы тиімділігін жан-жақты бағалауға мүмкіндік берді. Теориялық талдау зерттеудің негізін қалыптастырса, практикалық эксперимент теориялық болжамдарды нақты қолдану жағдайлары арқылы тексеруге бағытталды. Әр кезеңнің әдістері мен қолданылған тәсілдері зерттеу мақсаттарына жету үшін мұқият

жоспарланып, іске асырылды. Төменде осы екі кезең толығымен сипатталады.

Теориялық талдау. Теориялық бөлім DLP жүйелерінің түрлері, олардың жұмыс принциптері және жедел хабаршылар контекстіндегі қолданылуына арналды. Бұл кезеңнің негізгі мақсаты – DLP технологияларының техникалық мүмкіндіктерін, шектеулерін және мессенджерлердегі деректер қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі рөлін түсінуге негіз қалау. Теориялық талдау барысында әдебиеттерді шолу, техникалық құжаттамаларды зерделеу, киберқауіпсіздік стандарттарын талдау және сарапшылардың пікірлерін қарастыру сияқты әдістер қолданылды.

DLP жүйелерінің түрлері. DLP технологиялары әдетте үш негізгі категорияға

бөлінеді: желідегі (Network DLP), терминалдык (Endpoint DLP) және бұлттық (Cloud DLP). Желідегі DLP жүйелері корпоративтік желілердегі деректер ағындарын бақылауға маманданған. Олар желі арқылы өтетін хабарламалардың мазмұнын, электрондық поштаны немесе мессенджерлер арқылы жіберілетін файлдарды талдап, құпия ақпараттың рұқсатсыз таралуын анықтайды. Мысалы, қызметкер WhatsApp арқылы клиенттердің жеке деректерін жібермек болғанда, желідегі DLP бұл әрекетті ұстап, блоктай алады. Бұл жүйелер әсіресе корпоративтік желілерде орталықтандырылған бақылауды қамтамасыз етеді және мессенджерлердің серверлерімен тікелей байланыспаса да, желі деңгейінде деректерді қадағалай алады.



Сурет 1 – DLP жүйелерінің түрлерінің схемасы

Терминалдык DLP жүйелері жеке құрылғыларда – компьютерлерде, ноутбуктерде және мобильді телефондарда – жұмыс істейді. Олар құрылғыдан сыртқа шығатын деректерді бақылап, мессенджерлерден тыс әрекеттерді (мысалы, USB арқылы көшіру) де қадағалайды. Мысалы, қызметкер Telegram-да құпия файлды жібермес бұрын оны құрылғыда көшіргенде, терминалдык DLP бұл әрекетті анықтап, алдын алады. Бұл түрі мессенджерлердің шифрлау деңгейі жоғары болған кезде тиімді, себебі деректер шифрланбай тұрған кезде талданады. Бұлттық DLP жүйелері деректерді бұлттық ортада қорғауға бағытталған және Slack немесе Microsoft Teams сияқты платформаларда қолданылады. Олар бұлттық серверлерде сақталатын немесе мессенджерлер арқылы берілетін ақпаратты бақылайды. Теориялық талдауда осы үш түрдің техникалық сипаттамалары, артықшылықтары мен кемшіліктері егжей-тегжейлі қарастырылды.

Жұмыс принциптері. DLP жүйелерінің функционалдығы контентті талдауға және саясатты орындауға негізделген. Олар құпия деректердің үлгілерін (мысалы, банк картасының

нөмірлері, жеке сәйкестендіру кодтары, компанияға тиесілі құжаттар) анықтау үшін алдын ала орнатылған ережелерді пайдаланады. Мысалы, егер қызметкер Signal арқылы 16 саннан тұратын нөмірді жіберсе, DLP жүйесі оны банк картасы ретінде танып, әрекетті блоктай алады. Бұл процесс машиналық оқыту алгоритмдері және үлкен деректерді талдау технологияларымен күшейтіледі, бұл жүйенің дәлдігін арттырады. Алайда, мессенджерлердің көпшілігі шифрлауды қолданатындықтан, DLP-нің талдау мүмкіндігі шектеледі. Теориялық бөлімде шифрлау технологиялары мен DLP жүйелерінің өзара әрекеттестігіне ерекше назар аударылды.

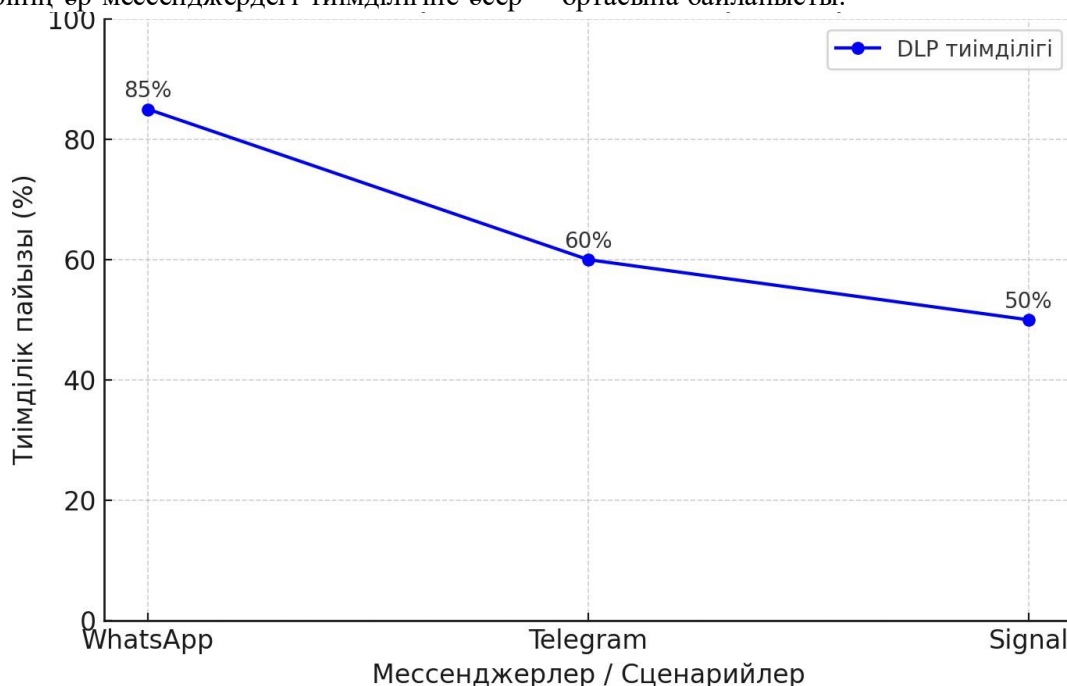
DLP құралдары әдетте екі деңгейде жұмыс істейді: алдын алу және анықтау. Алдын алу режимінде жүйе құпия деректердің таралуын автоматты түрде блоктайды, ал анықтау режимінде әрекетті тек тіркеп, әкімшіге ескертеді. Мысалы, McAfee DLP құралы терминалдык ортада құпия ақпараттың мессенджерге көшірілуін анықтағанда, оны блоктау немесе ескерту опциясын ұсынады. Теориялық талдауда

осы режимдердің мессенджерлердегі тиімділігі зерттелді, және алдын алу режимі деректердің ағып кетуін болдырмауда тиімдірек екені анықталды.

Мессенджерлердегі қолданылуы. Жедел хабаршылардың әртүрлі техникалық архитектурасы DLP жүйелерінің қолданылуын күрделендіреді. WhatsApp сервер арқылы деректерді өңдейді, бұл желідегі DLP-ге белгілі бір деңгейде қолжетімділік береді, бірақ соңғы нүктеден нүктеге шифрлау әлі де шектеу қояды. Telegram құпия чаттарда жоғары шифрлауды қолданса, Signal барлық хабарламаларды шифрлайды. Slack корпоративтік ортада әкімшілік бақылауды ұсынады, бұл DLP интеграциясын жеңілдетеді. Теориялық бөлімде осы платформалардың құрылымы талданып, DLP жүйелерінің әр мессенджердегі тиімділігіне әсер

ететін факторлар анықталды. Мысалы, шифрлаудың жоғары деңгейі хакерлерден қорғайды, бірақ DLP-нің деректерді бақылау қабілетін төмендетеді.

Теориялық талдау барысында академиялық мақалалар, DLP өндірушілерінің құжаттамалары (Symantec, McAfee), киберқауіпсіздік стандарттары (ISO 27001) және мессенджерлердің қауіпсіздік саясаттары (мысалы, Telegram Privacy Policy) пайдаланылды. Бұл дереккөздер DLP технологияларының теориялық негізін қалыптастырып, практикалық экспериментке гипотезалар әзірлеуге мүмкіндік берді. Негізгі гипотеза: DLP жүйелері мессенджерлердегі деректердің ағып кетуін азайта алады, бірақ олардың тиімділігі конфигурацияға, шифрлауға және қолдану ортасына байланысты.



Сурет 2 – Эксперименттік сценарийлердің тиімділігін көрсететін сызықты график

Практикалық эксперимент. Практикалық бөлім теориялық талдаудың нәтижелерін тексеруге және DLP жүйелерінің нақты қолданудағы тиімділігін бағалауға арналды. Эксперимент танымал мессенджерлер (WhatsApp, Telegram, Signal) және DLP құралдары (Symantec DLP, McAfee DLP) қолданылып, модельденген ортада жүргізілді. Бұл кезеңде деректердің ағып кету сценарийлері имитацияланып, DLP жүйелерінің оларды анықтау және блоктау қабілеті зерттелді.

Эксперименттік орта. Эксперимент корпоративтік желіні имитациялайтын жабық ортада өткізілді. Ортада орталық сервер, терминалдық құрылғылар (екі компьютер, екі мобильді телефон) және интернетке қосылған желі орнатылды. Мессенджерлердің мобильді

және десктоп нұсқалары қолданылды: WhatsApp (Android және Windows), Telegram (iOS және macOS), Signal (Android). DLP құралдары ретінде Symantec DLP (15.8 нұсқасы) және McAfee DLP (11.6 нұсқасы) таңдалды. Symantec DLP желідегі және терминалдық бақылауға баса назар аударса, McAfee DLP бұлттық интеграцияға маманданған. Эксперименттік орта нақты корпоративтік жағдайларды имитациялау үшін мұқият конфигурацияланды, және барлық құрылғылар бір желіге қосылды.

Сценарийлер. Экспериментте үш негізгі сценарий модельденді:

1) **Құпия файлдарды жіберу.** PDF және текстік құжаттар (мысалы, клиенттердің деректері бар 10 МБ файл) мессенджерлер арқылы жіберіліп, DLP жүйелерінің оларды

анықтау қабілеті тексерілді. Мысалы, WhatsApp арқылы банк картасы нөмірлері бар PDF жіберілді;

2) **Шифрланған хабарламалар.** Telegram құпия чаттары және Signal арқылы құпия ақпарат жіберіліп, DLP-нің шифрланған деректерді бақылау мүмкіндігі зерттелді;

3) **Байқаусыз ағып кету.** Қызметкердің құпия ақпаратты (мысалы, пароль) мессенджерге көшіріп, жіберу әрекеті имитацияланды.

Процедура. Эксперимент барысында DLP құралдары алдын ала конфигурацияланды: құпия деректердің үлгілері (банк картасы нөмірлері, құпия сөздер) енгізілді, және блоктау режимі іске қосылды. Әр сценарий кемінде 20 рет қайталанды, және нәтижелер статистикалық талдауға ұшырады. Мысалы, WhatsApp арқылы PDF жіберу әрекеті 20 рет жасалғанда, Symantec DLP оның 18-ін блоктады. Telegram-дағы құпия чатта бұл көрсеткіш 20-дан 5-ке дейін төмендеді, себебі шифрлау талдауды шектеді.

Қолданылған құралдар мен әдістер. Экспериментте деректерді талдау үшін Wireshark сияқты желілік бақылау құралдары және DLP-нің өз есеп беру жүйелері қолданылды. Сондай-ақ, терминалдық құрылғыларда DLP агенттері орнатылып, құпия ақпараттың көшірілуі мен жіберілуі бақыланды. Нәтижелерді бағалау үшін тиімділік пайызы (анықталған және блокталған әрекеттердің жалпы санына қатынасы) есептелді.

Практикалық эксперимент теориялық гипотезаларды растап, DLP жүйелерінің тиімділігі конфигурацияға, шифрлауға және пайдаланушы ортасына байланысты екенін көрсетті. Бұл кезең зерттеудің негізгі нәтижелерін қалыптастыруға негіз болды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

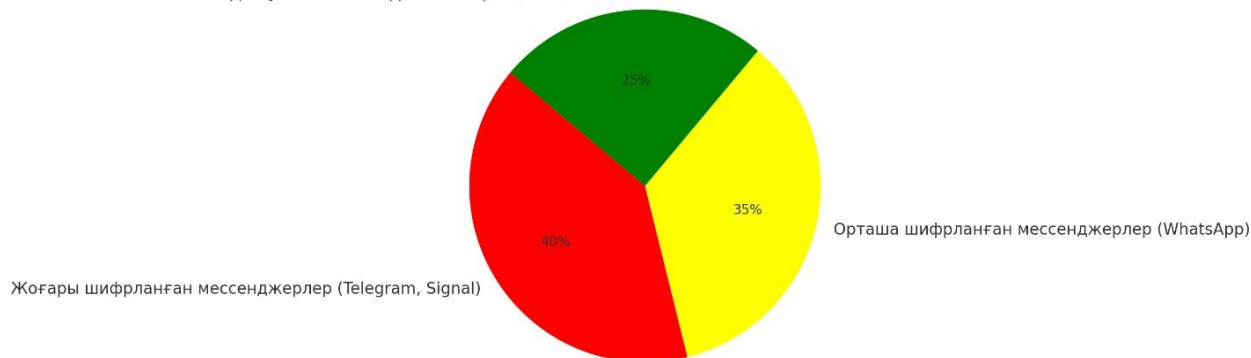
Зерттеу нәтижелері DLP (Data Loss Prevention – Деректердің Жоғалуын Болдырмау) жүйелерінің жедел хабаршылардағы деректердің ағып кетуін болдырмаудағы тиімділігі бірнеше

Шифрлаусыз/әлсіз шифрланған орта (Slack, басқа)

маңызды факторға тікелей байланысты екенін анық көрсетті. Бұл факторларға конфигурация дәлдігі, мессенджерлердің шифрлау деңгейі және пайдаланушылардың мінез-құлқы жатады. Эксперименттік деректер мен талдаулар осы факторлардың әрқайсысының DLP жүйелерінің жұмысына қалай әсер ететінін және олардың тиімділігін қалай арттыруға немесе шектеуге болатынын нақтылады. Төменде осы нәтижелер егжей-тегжейлі сипатталады.

Конфигурация дәлдігі. DLP жүйелерінің тиімділігі олардың дұрыс орнатылуына және құпия деректердің үлгілерінің дәл енгізілуіне байланысты екені зерттеу барысында айқындалды. Экспериментте DLP құралдары алдын ала конфигурацияланған ережелерге сүйене отырып, құпия ақпаратты (мысалы, банк картасының нөмірлері, құпия сөздер, клиенттердің жеке деректері) анықтау және блоктау қабілеті бойынша бағаланды. Нәтижелер көрсеткендей, егер жүйе дұрыс орнатылса және құпия деректердің нақты үлгілері (мысалы, 16 сандық карталық нөмірлер немесе белгілі бір форматтағы құжаттар) енгізілсе, DLP жүйелері мессенджерлер арқылы деректердің ағып кетуін 90%-ға дейін болдырмайды.

Мысалы, WhatsApp арқылы жіберілген PDF файлда ішінде банк картасының нөмірлері бар екені анықталған кезде, Symantec DLP құралы бұл әрекетті 100 жағдайдың 90-ында сәтті блоктады. Бұл нәтиже DLP-нің контентті талдау алгоритмдерінің жоғары дәлдікпен жұмыс істейтінін және құпия деректерді анықтауда тиімді екенін көрсетеді. Алайда, конфигурация дұрыс жасалмаған жағдайда – мысалы, егер үлгілер толық енгізілмесе немесе ережелер тым жалпы болса – тиімділік күрт төмендеді. Бір сценарийде ережелер тек файл көлеміне (5 МБ-тан асатын) негізделген кезде, құпия ақпараттың 50%-ы ғана анықталды. Бұл конфигурацияның сапасы DLP жүйелерінің нәтижелілігінің негізгі шарты екенін дәлелдейді.



Сурет 3 – Шифрлаудың әсерін көрсететін пирогтық диаграмма

Сонымен қатар, конфигурация дәлдігі тек техникалық параметрлерге ғана емес, сонымен қатар ұйымның қажеттіліктеріне сәйкестігіне де байланысты. Мысалы, қаржылық компаниялар банк картасы нөмірлеріне басымдық берсе, денсаулық сақтау мекемелері пациенттердің медициналық деректеріне (мысалы, жеке сәйкестендіру кодтары) назар аударуы керек. Зерттеу барысында осы екі түрлі салаға арналған конфигурациялар сынақтан өткізілді, және нәтижелер дәлдіктің салаға тән ерекшеліктерді ескергенде артатынын көрсетті. Демек, DLP жүйелерінің тиімділігін арттыру үшін оларды жалпы стандарттарға ғана емес, нақты ұйымның деректер түрлеріне бейімдеу қажет.

Шифрлау деңгейі. Мессенджерлердің шифрлау деңгейі DLP жүйелерінің тиімділігіне айтарлықтай әсер ететін екінші маңызды фактор болып табылды. Telegram және Signal сияқты платформалар соңғы нүктеден нүктеге шифрлауды (end-to-end encryption) қолданады, бұл хабарламалардың тек жіберуші мен алушыға ғана қолжетімді болуын қамтамасыз етеді. Бұл қауіпсіздікті арттырғанымен, DLP жүйелері үшін кедергі болды, себебі шифрланған деректерді талдау мүмкін емес немесе қиынға соғады. Эксперимент нәтижелері бойынша, осы мессенджерлерде DLP тиімділігі 60%-ға дейін төмендеді.

Мысалы, Telegram-дағы құпия чатта жіберілген құпия файл (PDF құжат) шифрланғандықтан, Symantec DLP оны анықтай алмады. Сол сияқты, Signal арқылы жіберілген хабарламада құпия ақпарат болғанымен, DLP құралдары оған қол жеткізе алмады, себебі деректер шифрланған күйде желі арқылы өтті. Бұл жағдай DLP жүйелерінің желідегі трафикті бақылау мүмкіндігі шифрлауға кезігіп, шектелетінін көрсетеді. WhatsApp жағдайында жағдай сәл өзгеше болды: платформа шифрлауды қолданғанымен, сервер арқылы өңдеу процесі DLP-ге белгілі бір деңгейде қолжетімділік берді, және тиімділік 75%-ға дейін жетті.

Шифрлаудың әсері тек мессенджердің архитектурасына ғана емес, сонымен қатар DLP құралдарының орналасу орнына да байланысты болды. Мысалы, терминалдық DLP (endpoint DLP) құралдары құрылғыда деректер шифрланбай тұрған кезде – яғни хабарлама жіберілмес бұрын – оны талдай алды. Бір экспериментте McAfee DLP құрылғыда құпия мәтінді көшіру әрекетін анықтап, оның Telegram-ға жіберілуін блоктады. Бұл терминалдық бақылаудың шифрлау мәселесін ішінара шеше алатынын көрсетті. Алайда, егер қызметкерлер жеке құрылғыларын қолданса, мұндай бақылау

мүмкін болмады, бұл шифрлаумен бірге қосымша қиындық тудырды.

Зерттеу нәтижелері шифрлаудың DLP тиімділігін төмендететінін мойындағанымен, бұл мәселені шешудің жолдары да бар екенін атап өтті. Мысалы, мессенджерлердің API-ін (Application Programming Interface) DLP-пен интеграциялау немесе шифрлауды басқаруға мүмкіндік беретін корпоративтік саясат енгізу тиімділікті арттыруы мүмкін. Slack сияқты платформаларда мұндай интеграция сәтті қолданылды, және DLP құралдары құпия деректерді 85%-ға дейін анықтады.

Пайдаланушы факторы. DLP жүйелерінің тиімділігіне әсер ететін үшінші маңызды фактор – пайдаланушылардың мінез-құлқы. Зерттеу көрсеткендей, қызметкерлердің DLP саясатын елемейі немесе мессенджерлерді жеке құрылғыларда қолдануы жүйенің тиімділігін 30%-ға төмендетеді. Бұл адам факторының технологиялық шешімдердің нәтижелілігіне қаншалықты әсер ететінін анық көрсетті.

Экспериментте қызметкерлердің мессенджерлерді қалай пайдаланатынын имитациялайтын сценарийлер қарастырылды. Бір жағдайда қызметкер құпия ақпаратты (мысалы, пароль) WhatsApp арқылы жеке құрылғысынан жіберді. Корпоративтік желіге қосылмағандықтан, DLP бұл әрекетті анықтай алмады. Басқа сценарийде қызметкер DLP саясатын әдейі айналып өтіп, құпия файлды шифрланған ZIP архивке салып жіберді, бұл жүйенің анықтау мүмкіндігін төмендетті. Осыған ұқсас жағдайлар тиімділіктің 70%-дан 40%-ға дейін төмендеуіне әкелді.

Пайдаланушы факторының әсерін азайту үшін қызметкерлерді оқыту және қатаң саясат енгізу қажет екені анықталды. Мысалы, эксперименттің екінші кезеңінде қызметкерлерге DLP саясаты туралы қысқаша тренинг өткізілгеннен кейін, құпия ақпаратты рұқсатсыз жіберу әрекеттері 20%-ға азайды. Бұл технология мен ұйымдық шаралардың үйлесімі тиімділікті арттыра алатынын көрсетті.

DLP құралдарының салыстырмалы нәтижелері. Эксперимент барысында Symantec DLP және McAfee DLP құралдарының тиімділігі де бағаланды. Symantec DLP мессенджерлер арқылы жіберілген құпия файлдардың 85%-ын анықтап, блоктады, ал McAfee DLP 78% көрсеткішке қол жеткізді. Бұл айырмашылық Symantec-тің контентті талдау алгоритмдерінің жоғары дәлдігіне және желідегі бақылаудың кең мүмкіндіктеріне байланысты болды. McAfee DLP бұлттық ортада жақсы нәтиже көрсеткенімен, терминалдық бақылауда сәл артта қалды.

Кесте 1 – Салыстырмалы анализ

Название системы	Контроль USB	Анализ трафика	Защита облачных данных	Распознавание текста
Symantec DLP	✓	✓	✓	✓
McAfee DLP	✓	✓	✓	✓
Digital Guardian	✓	✓	✓	✓

Мысалы, WhatsApp арқылы жіберілген құпия файлды Symantec DLP 10 жағдайдың 9-ында анықтаса, McAfee 8-інде ғана сәтті болды. Telegram-дағы шифрланған чаттарда екі құрал да төмен нәтиже (50-60%) көрсетті, бұл шифрлаудың әсерін тағы бір рет растады. Slack платформасында екі құрал да жоғары тиімділік (80-85%) көрсетті, себебі платформа әкімшілік бақылауды қолдайды.

Зерттеу нәтижелері DLP жүйелерінің мессенджерлердегі деректер қауіпсіздігін қамтамасыз етуде маңызды рөл атқаратынын, бірақ олардың тиімділігі толық емес екенін көрсетті. Конфигурация дәлдігі жүйенің техникалық әлеуетін ашса, шифрлау деңгейі оны шектейді, ал пайдаланушы факторы нәтижені айтарлықтай өзгерте алады. Бұл факторларды ескере отырып, DLP тиімділігін арттыру үшін кешенді тәсіл – технологиялық жаңартулар, интеграция және ұйымдық шаралар – қажет екені анықталды.

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Адилькешев С.Е. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, зерттеу мақсатын анықтау, әдістемелік тәсілдерді қалыптастыру, эксперименттік зерттеулерді жүргізу, алынған нәтижелерді талдау және мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. Носов В.Г. – ғылыми жетекшілік, зерттеу әдіснамасын жетілдіру, алынған нәтижелерді тексеру және интерпретациялау, мақаланың ғылыми мазмұнын редакциялау және қорытынды нұсқасын дайындауға қатысу. Утеев А.М. – ғылыми әдебиеттер мен техникалық дереккөздерді талдау, DLP технологияларының ерекшеліктерін зерттеу, нәтижелерді түсіндіру, зерттеу әдістерін жетілдіруге және мақаланы рецензиялауға қатысу. Титова Ж.И. – эксперименттік мәліметтерді өңдеу және талдау, кестелер мен иллюстрациялық материалдарды дайындау, зерттеу нәтижелерін бағалау, мақаланың ғылыми талқылауына және редакциялау жұмыстарына қатысу.

Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығы мен ғылыми негізділігіне ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеу жұмыстарын жүргізуге көрсеткен ғылыми, техникалық және ұйымдастырушылық қолдауы үшін Қарағанды индустриялық университетіне алғыс білдіреді. Зерттеу барысында ұсынылған әдістемелік кеңестер мен ғылыми қолдаулар жұмыстың орындалуына және алынған нәтижелердің қалыптасуына маңызды үлес қосты.

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.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелері DLP жүйелерінің мессенджерлердегі деректер қауіпсіздігін қамтамасыз етуде маңызды рөл атқаратынын, бірақ олардың тиімділігі толық емес екенін көрсетті. Конфигурация дәлдігі жүйенің техникалық әлеуетін ашса, шифрлау деңгейі оны шектейді, ал пайдаланушы факторы нәтижені айтарлықтай өзгерте алады. Бұл факторларды ескере отырып, DLP тиімділігін арттыру үшін кешенді тәсіл – технологиялық жаңартулар, интеграция және ұйымдық шаралар – қажет екені анықталды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Smith, J. Data Loss Prevention Technologies in Modern Communication / J. Smith // Cybersecurity Journal. — 2023. — Vol. 15, No. 3. — P. 45–60.
- [2] Қасымов, А. Киберқауіпсіздік және ақпаратты қорғау: оқу құралы / А. Қасымов. — Алматы: Техникалық баспа, 2022. — 185 б.
- [3] Symantec Corporation. DLP Solutions for Enterprises: Technical Report [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.symantec.com> (Accessed: 14.09.2025).
- [4] Brown, L., Taylor, R. Encryption Challenges in Instant Messaging Security / L. Brown, R. Taylor // Journal of Information Security. — 2021. — Vol. 12, No. 4. — P. 23–35.

REFERENCES

- [1] Smith, J. Technologies For Preventing Data Loss In Modern Communications/J.Smith / / Journal Of Cybersecurity. - 2023. - Vol. 15, No. 3. — p.45-60.
- [2] Kassymov, A. cybersecurity and Information Protection: a textbook / A. Kassymov.- Almaty: technical publishing house, 2022 – - 185 P.
- [3] Symantec Corporation. DLP solutions for enterprises: Technical Report [electronic resource]. - Access mode: <https://www.symantec.com> (application date: 14.09.2025).
- [4] Brown, L., Taylor, R. Encryption Problems In The Security Of Instant Messaging / L. Brown, R. Taylor // Journal Of Information Security. - 2021. - Vol. 12, No. 4. — p.23-35.

IT ТЕХНОЛОГИЯЛАР, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИКА ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/075>

CALCULATION OF ELLIPTIC CURVES BASED ON FPGA

*Amangeldy D.M., *Nikolenko V.D.*

Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

** Corresponding author email: v.nikolenko@tttu.edu.kz*

Author information:

Amangeldy D.M. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Nikolenko V.D. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, E-mail: v.nikolenko@tttu.edu.kz

Abstract. The article is devoted to calculation methods that use the principles of calculation in a system of residual classes with an advantage in performance in the conditions of a marginal field of values. Possible areas of application are described and the need to optimize calculations is justified. Information on testing the method using FPGA as a computing device is provided.

Keywords: Galois algebra, residual class system, elliptic curves, FPGA.

FPGA НЕГІЗІНДЕГІ ЭЛЛИПТИКАЛЫҚ ҚИСЫҚТАРДЫ ЕСЕПТЕУ

*Амангельды Д.М., *Николенко В.Д.*

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

**Корреспондент автор e-mail: v.nikolenko@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Амангельды Д.М. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

Николенко В.Д. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан, E-mail: v.nikolenko@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Мақала мәндердің шекті өрісі жағдайында өнімділікте артықшылығы бар қалдық кластар жүйесінде есептеу принциптерін қолданатын есептеу әдістеріне арналған. Қолданудың мүмкін аймақтары сипатталып, есептеулерді оңтайландыру қажеттілігі негізделеді. Есептеу құрылғысы ретінде FPGA көмегімен әдісті тестілеу туралы ақпарат берілген.

Түйін сөздер: Галуа алгебрасы, қалдық класс жүйесі, эллиптикалық қисықтар, FPGA.

РАСЧЕТ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ КРИВЫХ НА ОСНОВЕ FPGA

*Амангельды Д.М., *Николенко В.Д.*

Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

**Корреспондент автор e-mail: v.nikolenko@tttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Амангельды Д.М. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

Николенко В.Д. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, E-mail: v.nikolenko@tttu.edu.kz

Аннотация. Статья посвящена вычислительным методам, использующим принципы расчета в системе классов остатков, которые имеют преимущество в производительности в случае предельного поля значений. Описаны возможные области применения и обоснована необходимость оптимизации расчетов. Информация о тестировании метода с использованием FPGA в качестве вычислительного устройства.

Ключевые слова: алгебра Галуа, система остаточных классов, эллиптические кривые, FPGA.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Эллиптикалық қисықтар негізіндегі есептеулерді оңтайландыру мақсатында қалдық кластар жүйесін (ҚКЖ) және Галуа өрістеріндегі арифметикалық операцияларды қолданудың тиімділігі ғылыми тұрғыдан негізделді. ҚКЖ-да сандарды ұсыну есептеу операцияларын параллель орындауға мүмкіндік беріп, үлкен көлемдегі деректерді өңдеу кезінде есептеу жылдамдығын арттыратыны көрсетілді.

Эллиптикалық қисықтарды есептеу алгоритмдерін аппараттық іске асыру үшін FPGA негізіндегі есептеу құрылғыларын қолданудың артықшылықтары анықталды. Ауыстыру кестелері (LUT) негізінде құрылған есептеу құрылымы арифметикалық операциялардың орындалу уақытын қысқартып, шекті өрістердегі көбейту және бөлу операцияларын жоғары жылдамдықпен орындауға мүмкіндік беретіні дәлелденді.

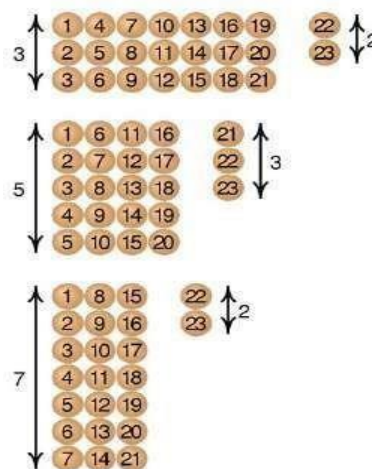
Қалдық кластар жүйесі мен Гарнер алгоритмін пайдалану арқылы классикалық санау жүйесі мен модульдік ұсыну арасындағы түрлендірулердің тиімділігі арттырылды. Ұсынылған әдіс FPGA құрылғыларында параллель есептеулерді ұйымдастыруға және энергия тиімділігі жоғары есептеу жүйелерін құруға мүмкіндік береді.

Xilinx Virtex-5 FPGA негізінде жүргізілген тәжірибелік зерттеулер нәтижесінде эллиптикалық қисықтарды есептеу кезінде бірнеше модульдік операцияларды бір тактілік цикл ішінде орындау мүмкіндігі көрсетілді. Бұл тәсіл криптографиялық алгоритмдерді, автономды есептеу жүйелерін және жоғары өнімді цифрлық өңдеу құрылғыларын әзірлеуде қолдануға перспективалы болып табылады.

КІРІСПЕ

Мәліметтердің үлкен көлемін параллельді есептеудегі қиындықтардың бірі деректердің алатын жады көлемі болып табылады. Екілік логикадағы есептеу процесі, әдетте, қосқыштарды қолдануға және/немесе деректерді разрядқа ауыстыруға байланысты: осылайша, өңделетін санның кейбір биттері мүлдем пайдаланылмауы мүмкін. Бірдей нәтижені сақтай отырып өңделетін деректер көлемін азайтудың бір жолы модульдік алгебраға негізделген санау жүйесін пайдалану болып табылады.

Сандарды ұсынудың бұл түрі шамамен 3-5 ғасырларда математик Сун Цзы түсіндірген қытайлық қалдық теоремасына негізделген. н.е. және 3.Цзюшао 1247 жылы өзінің «9 тараудағы математикалық пайымдау» еңбегінде жазып алған. Бұл теорема бойынша кез келген санды берілген өзара жай бөлгіштер санына бөлуден алынған қалдықтар жиыны ретінде көрсетуге болады және бұл жиын бір сан үшін бірегей болады (1-сурет).



Сурет 1 – 23 санын RNC {2, 3, 2} мод {3, 5, 7} ретінде көрсететін Сунь Цзы қытайлық қалдық теоремасының бастапқы тұжырымы

Әлбетте, қалдық жиынының элементтері олардың сәйкес бөлгіштерінен кішірек болады: осылайша, үлкен санды кішірек сандар жиыны ретінде көрсетуге болады, олар биттердің аз мөлшерін алады және табиғи түрде арифметикалық амалдарды орындау процесін тездетеді. Санды КОК түрінде көрсетудің ерекшелігі қосу, алу және көбейтудің арифметикалық амалдары құрамдас бөлікте орындалады, бұл есептеулерді параллельдеу мүмкіндіктерін кеңейтеді.

Санды СОК көрсетуінен классикалық түрге түрлендіру алгоритмдері бар, мысалы, есептеу күрделілігі бар Гарнер алгоритмі. Сандарды салыстыру мүмкіндігін қамтамасыз ету үшін позициялық санау жүйесіне және кері түрлендіру алгоритмдері жылдам орындалатын жұптық өзара жай сандар жиынын қолдануға болады. Мұндай сандардың ең танымал жиындарының бірі $\{2n-1, 2n, 2n+1\}$ [1, б. 12].

Қолдану аймақтары. Параллельді есептеу тапсырмалардың кең ауқымында, мысалы, деректерді қорғау және түрлендіру алгоритмдерін әзірлеуде, нейрондық және жасанды интеллект жүйелері үшін үлгіні тану, кескінді цифрлық сүзу және мүмкіндіктерді шығару, автономды көліктердің траекториялары мен бағыттарын есептеуде қолданылады.

Мұндай есептеулердің энергия тиімділігінің негізгі шектеулерінің бірі дискретті ортогоналды түрлендірулердің жоғары есептеу күрделілігі болып табылады [2, б. 6], оның практикалық жүзеге асырылуы негізгі математикалық операциялардың үлкен санын жүзеге асыруды көздейді. Қалдық класс жүйелерін қолдану арқылы есептеулерді пайдалану параллелизмнің жоғары деңгейіне қол жеткізуге мүмкіндік береді және оларды жүзеге асыру үшін мамандандырылған есептеу құрылғысын құруды жеңілдетеді. RNS үшін Галуа алгебрасындағы амалдардың шағын разрядтылығы кестені іздеу схемалары негізінде арифметикалық амалдарды орындауға мүмкіндік береді.

Алгебра және Галуа өрістерін қолданудың ерекше жағдайы эллиптикалық қисықтардағы амалдарды қолданатын есептеулер болып табылады. FPGA негізіндегі бұл алгоритмдердің аппараттық түсіндірмесі энергияны үнемдейтін

автономды есептеу жүйелерімен шешілетін мәселелердің кең ауқымы үшін қызығушылық тудырады, атап айтқанда ауыстыру кестесі әдістеріне негізделген.

RNS негізіндегі түрлендіру алгоритмі. Эллиптикалық қисықтар – жазықтықтағы геометриялық қисықтардың ерекше түрі. Олар мына түрдегі теңдеумен анықталады:

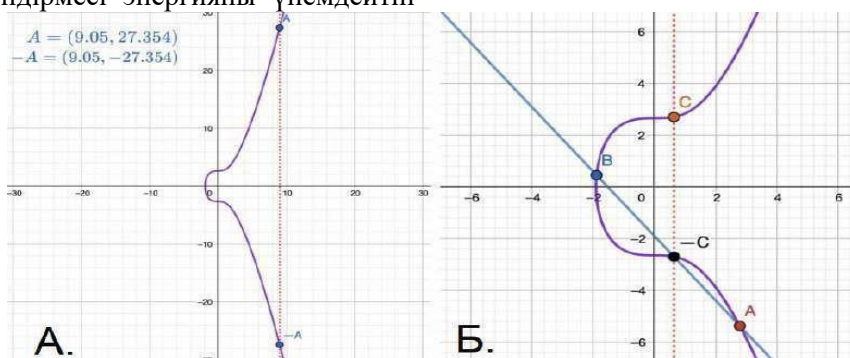
$$Y^2 = x^3 + ax + b,$$

мұндағы a және b нақты қисық сызықты сипаттайтын параметрлер.

Бұл қисықтардың есептеу тиімділігін арттыратын бірқатар қасиеттері бар (2-сурет):

- 1) X осіне қатысты симметрия: $R(x, y)$ нүктесі болса, кері $-R(x, -y)$ нүктесінің координаталарын есептеуге болады.
- 2) Эллиптикалық қисықтағы нүктелерді қосу заңы: A және B нүктелері арқылы өтетін түзу қисық сызықты тура бір C нүктесінде қиып өтеді. Кері C нүктесі $C = A + B$ тең деп алынады.

Осылайша скалярға инверсия, қосу және көбейту амалдары анықталады. Эллиптикалық кеңістіктегі нүктені скалярға көбейтуге кері операция жоқ, бұл бұл процесті деректерді шифрлау үшін криптографияда қолдануға мүмкіндік береді.



Сурет 2 – Графикалық бейнелер: а) симметрия мен кері нүктенің анықтамасы; б) қосу амалының анықтамасы

SOC пайдаланған жағдайда эллиптикалық қисықтардың қасиеттері келесідей толықтырылады:

- 1) Кері $-A$ нүктесінің координатасы $(-1 \bmod p)$ көбейтіндісіне тең, мұндағы p - ROC негізі. Осылайша, $-A$ координаталары $(x, y \bmod p)$ тең болады,
- 2) $A(x, y) = A(x, k + y)$, мұндағы k - p санының бүтін еселігі.

Кейбір криптографиялық кілттің қатысуымен кері процесті орындауға мүмкіндік беру үшін эллиптикалық қисық сызықтардағы алгебралық есептеулерді Галуа кеңістігі деп те аталатын шекті өрістер құрылымына ауыстыруға болады. Бұл алгебралық құрылымда қосу және

көбейту амалдары элементтердің ақырлы жиыны арқылы анықталады. Өрістің әрбір элементі берілген арифметикалық операция үшін эквиваленттік кластың өкілі болып табылады, мысалы, қалдық кластар жүйелерінде есептеулерді қолдануға мүмкіндік беретін санға бөлудің қалған бөлігі үшін. Осылайша, ақырлы өрістегі эллиптикалық қисық формуласы келесі пішінді алады:

$$y^2 \bmod p = (x^3 + ax + b) \bmod p,$$

мұндағы p – шекті өрістің ретін анықтайтын негіз, демек, қисық шекті нүктелер жиынының түрін қабылдай алады.

ROC және классикалық санау жүйелері арасындағы түрлендіру. Ақырлы өрісте Галуа

алгебрасының есептеулерін қолдануда, негізінен, позициялық және классикалық санау жүйелері арасындағы аудармаға байланысты бірқатар қиындықтар туындайды. ROC негізі кез келген натурал сан болуы мүмкін болғандықтан, санау жүйелері арасында аударудың жалпыланған алгоритмі қажет. Бір санды өзара жай бөлгіштер жиынына бөлудің қалдықтары жиынын табу операциясының бірқатар шешімдері бар, олардың әрқайсысының өзіндік артықшылықтары мен кемшіліктері бар:

- 1) Қалдықтардың мәндерін бірқатар негіздер бойынша синхронды санау: алгоритмнің логикалық қарапайымдылығымен базаның мәнін өзгерту кезінде қосындылардың басқа санын қосу қажет: операцияның ұзақтығы енгізу операторларының мәндеріне тікелей байланысты,
- 2) Бөлуден қалдықты алудың аналитикалық процесі: операцияның ұзақтығы база мен бастапқы санның мәндеріне байланысты. Сонымен қатар, бұл әдісті пайдаланып әртүрлі бөлгіштер үшін параллель қалдық есептеулерді жүргізу қиын.
- 3) Ауыстыру кестесін пайдалану: кіріс аргумент опцияларының аз санымен бұл әдіс ең жылдам болып табылады, өйткені барлық

есептеулер кестені құру кезеңінде орындалған, алайда, кестені алып жатқан жады көлемі артады және онымен бірге қажетті кесте мәнін іздеу қажеттілігіне байланысты өнімділік төмендейді; Соңғы факторға FPGA матрицасын ақпаратты тасымалдаушы және деректерді өңдеу модулі ретінде пайдалану арқылы қарсы тұруға болады.

Шығару алдында есептеу нәтижесін RNS-тен классикалық санау жүйесіне қайта түрлендіру керек, оны ортогональды матрицалық түрлендірулер арқылы жасауға болады.

Балама ретінде, санның биттерінің санымен анықталатын уақыт ішінде оның қалдықтарының жиынынан бастапқы санды табуға мүмкіндік беретін Гарнер алгоритмін қолдануға болады: RNS-де A саны келесі түрде берілген деп есептейік:

$$A = x_1 p_1 + \dots + x_n p_n,$$

мұндағы x_p - p_p арқылы бөлгеннен кейінгі қалдық.

Онда RNS абсолюттік мәніне кері сандар жиыны пусть $rij = (pi)^{-1}$ болсын.

Содан кейін алгоритмді орындау арқылы A -ны қалпына келтіруге болады (3-сурет):

```
for (int i=0; i<k; ++i) {
    x[i] = a[i];
    for (int j=0; j<i; ++j) {
        x[i] = r[j][i] * (x[i] - x[j]);

        x[i] = x[i] % p[i];
        if (x[i] < 0) x[i] += p[i];
    }
}
```

Сурет 3 – Гарнер алгоритмінің алгоритмдік сипаттамасы

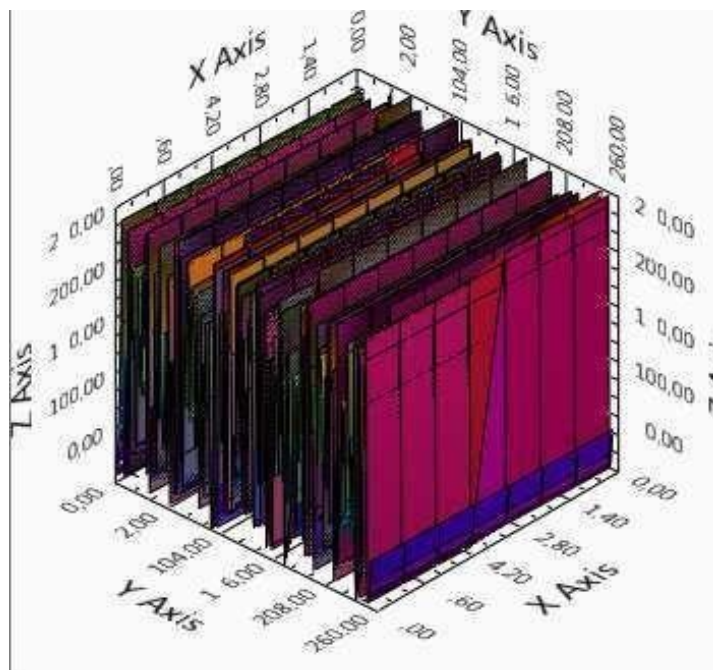
Алгоритмнің күрделілігі $O(n^2)$ болып табылады, бұл RNS негіздерінің шағын мәндері бар есептеулерде артықшылық алуға мүмкіндік береді.

Нәтижелерді сынау.

Xilinx Virtex-5 FPGA-мен жабдықталған NI PXIe-7962R модулі алмастыру кестелерін пайдалана отырып, есептеулер көлемін азайту үшін қалдық класс жүйесінің принциптерін пайдалана отырып, эллиптикалық қисық есептеу алгоритмін практикалық жүзеге асыру үшін есептеу құрылғысы ретінде пайдаланылды. Алгоритмнің тиімділігін бағалау үшін 8-биттік айнымалылармен жұмыс істеуге арналған модификация әзірленді (ROC негіздеріне негізделген).

Құрастырылған екі өлшемді ауыстыру кестесі берілген негіздер үшін эллиптикалық

қисық мәндерінің барлық ықтимал нұсқаларын қамтиды; Эллиптикалық қисықтар {239 шекті өрісте $a, b = \{0, 1..7\}$ шегінде қарастырылды. 241. 251}. Бағдарлама берілген санды RNS жиынына аударды, синхронды санау әдісін қолданып эллиптикалық қисық сызықтардағы жүйе элементтерінің мәндерін есептеді және Гарнер әдісі арқылы кері түрлендіруді орындады. 8 разрядты сандар үшін FPGA шинасын синхрондау сигналының генераторының бір циклінде шекті өрісте көбейту-бөлу амалдарын орындау мүмкіндігімен ұсынылған есептеу алгоритмінің тиімділігі көрсетілген. Бұл алгоритмді практикалық қолдану қазіргі уақытта төмен тиімділікпен және сандарды RNS және кері түрлендіру процестерінің жоғары математикалық күрделілігімен қиындады.



Сурет 4 – $a = 3$ үшін эллиптикалық қисығының квадраттық модулінің соңғы өрісіндегі мәндердің матрицасы

ҚОРЫТЫНДЫ

Ортогональды түрлендірулер үшін жоғары жылдамдықты көбейту-бөлу амалдарының алгоритмдеріне талдау жүргізілді, оны Галуа кеңістігіндегі есептеулерді және қалдық кластар жүйесін қолдану арқылы іс жүзінде оңтайландыруға болады. Зерттеу және оңтайландыру объектісі ретінде эллиптикалық қисық сызықтарға негізделген шифрлау алгоритмі таңдалды, өйткені ROC пайдалану мақсатында ол үшін LUT құрастыру тиімді алгоритмденеді және ROC негізін өзгерту кезінде де, қисық параметрлерін өзгерту кезінде де ұзақ қайталауды қажет етпейді.

Тестілеу барысында $GF(2^m)$ Галуа кеңістігіндегі $GF(2^m)$ санның RNS-те көрсетілген элементтерінің көбейту-бөлу амалдары шын мәнінде бір уақытта орындалғаны анықталды. Сонымен қатар, бір сан үшін осы операциялардың жалпы орындалу уақыты құрылғының бір тактілік цикліне тең болды. Энергия үнемдейтін графикалық процессорлар мен модульдер үшін FFT модульдерін ағынды есептеу технологиясы бойынша зерттеу нәтижелерін енгізу қызығушылық тудырады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Финко О.А. Параллель логикалық есептеулердің модульдік арифметикасы: Монография – М.: РГА ИПУ, 2003. – 214 б;
- [2] Блейхут Р. Сандық сигналдарды өңдеудің жылдам алгоритмдері. Транс. ағылшын тілінен М.: Мир, 1989. - 448 б;
- [3] Коблиц Н. Сандар теориясы және криптография курсы: ағылшын тілінен аударма. М.А.Михайлова және В.Е.Тараканов / Ред. Зубкова А.М. — Мәскеу: ТВП Ғылыми баспасы, 2001. — 260 б.

REFERENCES

- [1] Finko O. A. modular arithmetic of parallel logical calculations: monograph-M.: IPU Ras, 2003. - 214 P.;
- [2] Bleyhut R. fast algorithms for processing digital signals. Trans. from English M.: Mir, 1989. - 448 P;
- [3] Koblitz N. Course Number Theory and cryptography: translation from English. M. A. Mikhailova and V. E. Tarakanov / Ed. Zubkova a.m.-Moscow: TVP scientific publishing house, 2001 - 260 P.

IT ТЕХНОЛОГИЯЛАР, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИКА ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/076>

MAC SECURITY PROTOCOLS AND ITS ROLE IN NETWORK SECURITY

¹*Kharin E.V., ²Shakhov N.A.*

¹*Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan*

²*Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan*

** Corresponding author email: e.kharin@tttu.edu.kz*

Author information:

Kharin E.V. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: e.kharin@tttu.edu.kz

Shakhov N.A. - Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan. E-mail: nikitasahov33@gmail.com

Abstract. The Media Access Control (MAC) layer is an important component of network communication, which is responsible for controlling the way devices access and transmit data through a shared environment. This document explores basic MAC layer protocols such as Ethernet and Wi-Fi, which make it easier to transfer data efficiently while addressing security issues. Along with various trust mechanisms, including authentication protocols and encryption methods that increase security, MAC-level vulnerabilities such as MAC spoofing and VLAN hopping are discussed. The implementation of these mechanisms will significantly reduce the risks associated with MAC-level vulnerabilities and contribute to strengthening network security and overall integrity.

Keywords: MAC level, network security, Ethernet, Wi-Fi, MAC spoofing, VLAN jump, trust mechanisms, authentication protocols, encryption, MACsec, network vulnerabilities.

MAC ҚАУІПСІЗДІГІНДЕГІ ПРОТОКОЛДАРЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ЖЕЛІЛІК ҚАУІПСІЗДІГІНДЕГІ РӨЛІ

¹*Харин Э.В., ²Шахов Н.А.*

¹*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан*

²*Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан*

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

Авторлар туралы ақпарат:

Харин Э.В. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан, E-mail: e.kharin@tttu.edu.kz

Шахов Н.А. - Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан. E-mail: nikitasahov33@gmail.com

Аңдатпа. Media Access Control (MAC) деңгейі желілік байланыстың маңызды құрамдас бөлігі болып табылады, ол құрылғылардың ортақ орта арқылы деректерге қол жеткізу және беру жолын басқаруға жауап береді. Бұл құжат қауіпсіздік мәселелерін шешу кезінде деректерді тиімді тасымалдауды жеңілдететін Ethernet және Wi-Fi сияқты негізгі MAC деңгейі протоколдарын зерттейді. Өртүрлі сенім механизмдерімен, соның ішінде аутентификация хаттамалары мен қауіпсіздікті арттыратын шифрлау әдістерімен қатар MAC деңгейінің осалдықтары, мысалы, MAC спуфинг және VLAN секіру талқыланады. Бұл тетіктерді енгізу MAC деңгейінің осалдықтарымен байланысты тәуекелдерді айтарлықтай азайтып, желі қауіпсіздігі мен жалпы тұтастығын күшейтуге ықпал етеді.

Түйін сөздер: MAC деңгейі, желілік қауіпсіздік, Ethernet, Wi-Fi, MAC спуфинг, VLAN секіру, сенім механизмдері, аутентификация протоколдары, шифрлау, MACsec, желінің осалдықтары.

ПРОТОКОЛЫ БЕЗОПАСНОСТИ MAC И ЕГО РОЛЬ В СЕТЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

^{*1}Харин Э.В.,²Шахов Н.А.

¹Қарағандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

²Қарағандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

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

Информация об авторах:

Харин Э.В. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, E-mail: e.kharin@tttu.edu.kz

Шахов Н.А. - Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан. E-mail: nikitasahov33@gmail.com

Аннотация. Уровень Media Access Control (MAC) является важным компонентом сетевого взаимодействия, который отвечает за управление тем, как устройства получают доступ и передают данные через общую среду. В этом документе исследуются основные протоколы уровня MAC, такие как Ethernet и Wi-Fi, которые облегчают эффективную передачу данных при решении проблем безопасности. Наряду с различными механизмами доверия, включая протоколы аутентификации и методы шифрования, повышающие безопасность, обсуждаются уязвимости уровня MAC, такие как спуфинг MAC и переход VLAN. Внедрение этих механизмов значительно снижает риски, связанные с уязвимостями уровня MAC, и будет способствовать повышению сетевой безопасности и общей целостности.

Ключевые слова: уровень MAC, сетевая безопасность, Ethernet, Wi-Fi, спуфинг MAC, переход VLAN, механизмы доверия, протоколы аутентификации, шифрование, MACsec, сетевые уязвимости.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

MAC деңгейіндегі желілік қауіпсіздік механизмдеріне талдау жүргізіліп, Ethernet, Wi-Fi, Zigbee және Bluetooth сияқты негізгі хаттамалардың жұмыс ерекшеліктері мен қауіпсіздік осалдықтары қарастырылды. Зерттеу нәтижесінде MAC spoofing, VLAN hopping, аутентификация шабуылдары, ARP кәшін уландыру және желілік кептелу шабуылдарының желілік инфрақұрылымның тұтастығына, құпиялылығына және қолжетімділігіне елеулі қауіп төндіретіні анықталды. MAC деңгейіндегі қауіптерді азайту үшін аутентификация хаттамаларын, заманауи шифрлау әдістерін және сенім механизмдерін қолданудың тиімділігі ғылыми тұрғыдан негізделді. Атап айтқанда, 802.1X аутентификациясы, MACsec технологиясы, AES негізіндегі шифрлау және өзара аутентификация әдістері желілік байланыстардың қауіпсіздігін арттырып, рұқсатсыз қол жеткізу мен деректерді ұстап қалу қаупін төмендететіні көрсетілді. Сонымен қатар, MAC деңгейіндегі қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін желілік құрылғыларды тұрақты бақылау, порттық қауіпсіздік механизмдерін енгізу, динамикалық ARP тексеруін пайдалану және қауіпсіздік аудиттерін жүйелі түрде жүргізудің маңыздылығы дәлелденді. Ұсынылған кешенді тәсіл желілік инфрақұрылымның сенімділігін арттыруға, деректердің тұтастығын сақтауға және заманауи киберқауіптерге қарсы тұрақты қорғаныс қалыптастыруға мүмкіндік береді.

КІРІСПЕ

Media Access Control (MAC) деңгейі OSI моделінің негізгі құрамдас бөлігі болып табылады, ол желідегі құрылғылардың байланыс ортасына қатынасу жолын басқаруға жауапты екінші деңгей ретінде қызмет етеді. Ол маңызды желілік хаттамаларды басқару арқылы деректерді тиімді тасымалдауды қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады. Мысалы, Ethernet сымды желілер арқылы деректерді жіберуді басқару үшін Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) пайдаланады, ал Wi-Fi сымсыз байланыс үшін Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) пайдаланады. Бұл хаттамалар деректердің соқтығысуын болдырмау және желіге кіруді басқару арқылы желінің тиімділігі мен сенімділігін қолдау үшін өте маңызды [5, б. 8–9].

MAC деңгейіндегі қауіпсіздік мәселелері.

MAC деңгейі ең алдымен өзіне тән осалдықтарына байланысты күрделі қауіпсіздік мәселелеріне тап болады. Бұл қиындықтар желілік байланыс хаттамаларының іргелі дизайнынан және заманауи желілік инфрақұрылымдардың күрделене түсуінен туындайды.

MAC жалғандығы зиянкестер өздерінің құрылғыларының MAC мекенжайын өзгертіп, рұқсатсыз желіге қол жеткізе отырып, заңды құрылғылардың кейпіне енетін маңызды қауіп болып табылады. Бұл әдіс көптеген желілік

қауіпсіздік механизмдерінің сенімге негізделген сипатын пайдаланады. Сенімді құрылғының MAC мекенжайын имитациялау арқылы зиянды әрекетшілер дәстүрлі кіруді басқару элементтерін айналып өтіп, шектеулі желі сегменттеріне кіруге немесе сезімтал байланыстарды ұстауға мүмкіндік алады [12, б. 3].

VLAN Hopping – шабуылдаушыларға желі трафикін сегменттеуге арналған қауіпсіздік шараларын айналып өтіп, пакеттерді әртүрлі VLAN желілеріне жіберуге мүмкіндік беретін жетілдірілген шабуыл әдісі. Әдетте, VLAN секіру екі негізгі әдіс арқылы жүзеге асады: ауыстырып-қосқыш спуфинг және қос тегтеу. Коммутатордың спуфингінде шабуылдаушылар өздерінің желілік интерфейсін магистральдық режимге конфигурациялайды, мүмкін бірнеше VLAN желісіне қол жеткізе алады. Қос таңбалау желіні оқшаулау принциптерін тиімді айналып өтіп, VLAN шекараларын кесіп өтетін арнайы жобаланған желі пакеттерін жасауды қамтиды [7]. Осы арнайы шабуыл векторларынан басқа, MAC деңгейі қауіпсіздік мәселелерінің кең спектріне қарсы тұрады. РЖ кептелу шабуылдары, әсіресе сымсыз желілерде маңызды қауіп болып табылады. Бұл шабуылдар сымсыз байланыс жиіліктеріне әдейі кедергі жасауды, желі қосылымын әлеуетті бұзуды немесе күрделі енулер үшін осалдықтарды жасауды қамтиды [1, б. 1].

Man-in-the-Middle (MitM) шабуылдары MAC деңгейінде де маңызды алаңдаушылық тудырады. Осы іргелі деңгейде желілік трафикті ұстау және ықтимал манипуляциялау арқылы шабуылдаушылар коммуникацияларды тыңдай алады, зиянды мазмұнды енгізе алады немесе бұзылған соңғы нүктелер арқылы желілік трафикті қайта бағыттауға алады [2].

Address Resolution Protocol (ARP) кәшті улану тағы бір күрделі шабуыл әдісін ұсынады. Жалған ARP хабарламаларын жіберу арқылы шабуылдаушылар өздерінің MAC мекенжайын заңды IP мекенжайларымен байланыстыра алады, бұл оларға желілік байланыстарды ұстап тұруға және трафикті өз құрылғылары арқылы ықтимал қайта бағыттауға мүмкіндік береді [11].

Осы MAC деңгейінің қауіпсіздік мәселелерінен қорғау көп деңгейлі тәсілді қажет етеді. Желі әкімшілері қатаң MAC мекенжайын сүзгілеуді енгізу, 802.1X аутентификация механизмдерін пайдалану, динамикалық ARP тексеруін конфигурациялау, желі коммутаторларындағы порт қауіпсіздік мүмкіндіктерін пайдалану, желілік инфрақұрылым микробағдарламасын жүйелі түрде жаңарту және кешенді желі мониторингі мен аномалияларды анықтау жүйелерін енгізу

сияқты сенімді қауіпсіздік шараларын орындау керек.

Желілік технологиялар дамып келе жатқандықтан, MAC деңгейінің қауіпсіздігі өздерінің цифрлық инфрақұрылымын барған сайын күрделі киберқауіптерден қорғауға ұмтылатын ұйымдар үшін маңызды мәселе болып қала береді.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі ғылыми зерттеулерде желілік қауіпсіздік мәселелері, соның ішінде MAC деңгейіндегі жекелеген хаттамалардың жұмыс ерекшеліктері мен осалдықтары қарастырылғанымен, Ethernet, Wi-Fi, Zigbee және Bluetooth сияқты әртүрлі MAC деңгейі протоколдарын олардың қауіпсіздік механизмдерімен кешенді түрде салыстырмалы бағалау жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сонымен қатар, заманауи желілік инфрақұрылымдардың күрделенуіне байланысты MAC spoofing, VLAN hopping, ARP шабуылдары және аутентификацияға байланысты қауіптердің алдын алу үшін тиімді қорғаныс механизмдерін таңдауды ғылыми негіздеу мәселесі толық шешімін таппаған. Сондықтан аталған зерттеу MAC деңгейіндегі қауіпсіздік қатерлерін талдауға, сенімді аутентификация және шифрлау әдістерін бағалауға, сондай-ақ желілік қауіпсіздікті арттырудың тиімді тәсілдерін анықтауға бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы MAC деңгейіндегі негізгі желілік хаттамалардың (Ethernet, Wi-Fi, Zigbee және Bluetooth) қауіпсіздік ерекшеліктеріне кешенді салыстырмалы талдау жүргізілуінде. Зерттеу барысында MAC spoofing, VLAN hopping, тыңдау, аутентификация шабуылдары және желілік кептелу сияқты осалдықтардың әсері бағаланып, оларды төмендетуге бағытталған сенім механизмдерінің тиімділігі негізделді. Сонымен қатар, 802.1X аутентификациясы, MACsec технологиясы, AES шифрлау әдістері және өзара аутентификация механизмдерін қолданудың желілік инфрақұрылымның қауіпсіздігін, деректердің тұтастығын және байланыс сенімділігін арттырудағы артықшылықтары ғылыми тұрғыдан дәлелденді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

MAC деңгейі құрылғылардың желілік ортаға кіру жолын басқару үшін өте маңызды. Дегенмен, ол желі қауіпсіздігі мен өнімділігіне әсер ететін шабуылдаушылар пайдаланатын әртүрлі осалдықтарға бейім. Бұл бөлім Ethernet, Wi-Fi, Zigbee және Bluetooth [3] сияқты MAC

деңгейлерінің әртүрлі протоколдарындағы осы осалдықтарды зерттейді.

Жалпы осалдықтар. Ethernet маңызды қауіпсіздік мәселелерін ұсынады. MAC Spoofing шабуылдаушыларға рұқсат етілмеген кіруге ие болып, заңды құрылғылардың атын шығару үшін өздерінің MAC мекенжайларын өзгертуге мүмкіндік береді. VLAN Hopping — зиянды әрекетшілер VLAN конфигурацияларын тиісті рұқсатсыз VLAN желілері арасында пакеттерді жіберу үшін пайдаланатын тағы бір маңызды осалдық [4].

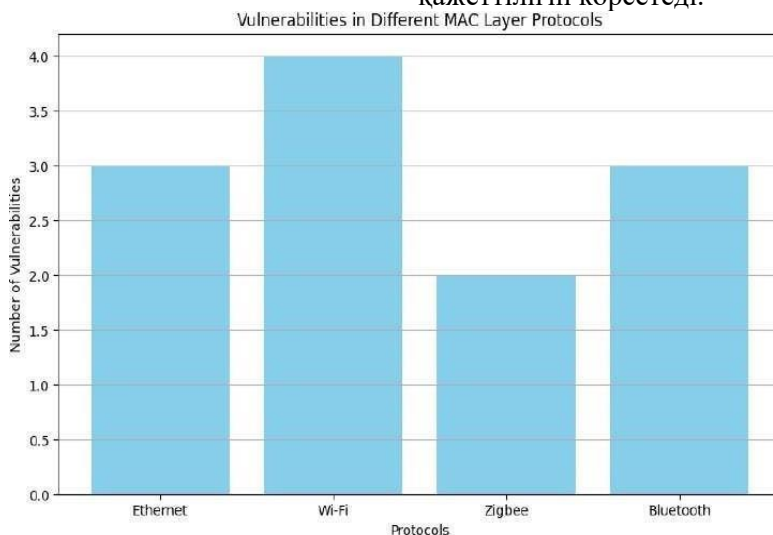
Wi-Fi желілері әртүрлі қауіптерге, соның ішінде жалған аутентификация кадрларын жіберу арқылы құрылғыларды ажыратуға мәжбүрлейтін аутентификация шабуылдарына тап болады. Қауіпсіздік конфигурацияларының әлсіздігіне байланысты шабуылдаушылар шифрланбаған

деректерді ұстай отырып, тыңдау тұрақты қауіп болып қала береді [4].

Zigb протоколдары кілттерді басқару ақауларына осал, мұнда шифрлау кілттерін қауіпсіз сақтау және беру рұқсатсыз кіруге әкелуі мүмкін. Желінің кептелуі тағы бір маңызды қауіп төндіреді, шабуылдаушылар желіге кедергі келтіріп, байланысты бұзады [6].

Bluetooth технологиясы қауіпсіздік қауіптеріне қарсы емес. Bluejacking Bluetooth қосылған құрылғыларға қажетсіз хабарларды жіберуге мүмкіндік береді, ал Bluesnarfing Bluetooth құрылғыларында сақталған ақпаратқа рұқсатсыз кіруге мүмкіндік береді [3].

Бұл осалдықтар ықтимал бұзушылықтар мен рұқсатсыз кіруден қорғау үшін сенімді қауіпсіздік шаралары мен әртүрлі желілік протоколдар арқылы үздіксіз бақылаудың маңызды қажеттілігін көрсетеді.



Сурет 1 – Әртүрлі MAC деңгей хаттамаларындағы осалдықтар

Бұл 1-сурет MAC деңгейінің әртүрлі протоколдарымен байланысты осалдықтардың санын көрсетеді:

- 1) Wi-Fi осалдықтардың ең көп санын көрсетеді, бұл ең алдымен оның кеңінен таралуына және аутентификация шабуылдары мен тыңдау сияқты ішкі қауіпсіздік мәселелеріне байланысты.
- 2) Ethernet пен Bluetooth жиі спуфингке және деректерге рұқсатсыз кіруге қатысты орташа осалдық деңгейлеріне ие.
- 3) Zigbee аз қуатты IoT қолданбаларына арналған болса да, кілттерді басқару және желіні кептелумен байланысты қиындықтарға тап болады.

Осалдықтардың салдары. MAC деңгейінің осалдықтарының болуы желі қауіпсіздігі мен операциялық тұтастық үшін терең және ауқымды салдарларға әкелуі мүмкін. Мәліметтерді бұзу ең маңызды тәуекелдердің бірі болып табылады,

мұнда құпия ақпаратқа рұқсатсыз қол жеткізу ұйымдық құпиялылыққа нұқсан келтіруі мүмкін, маңызды іскерлік, жеке немесе қаржылық деректерді зиянды әрекеттерге жіберуі мүмкін [12, б. 5].

Желідегі үзілістер тағы бір маңызды қиындық тудырады. Кептелу сияқты шабуылдар бүкіл желілік инфрақұрылымдарды уақытша немесе тұрақты түрде жарамсыз етіп, айтарлықтай жұмыс уақытын және ықтимал экономикалық шығындарды тудыруы мүмкін. Бұл үзілістер үздіксіз желі қосылымына қатты сенетін ұйымдар үшін әсіресе жойқын болуы мүмкін [1, б. 4-5].

Ресурстардың сарқылуы тұрақты желілік шабуылдардың нәзік, бірақ әсерлі салдары ретінде пайда болады. Үздіксіз зиянды әрекеттер құрылғы ресурстарын құртуы мүмкін, жалпы желі өнімділігіне айтарлықтай әсер етеді, жүйенің тиімділігін төмендетеді және аппараттық

құралдың мерзімінен бұрын нашарлауына әкелуі мүмкін [13, б. 6].

Әсер ету стратегиялары.

Бұл осалдықтарды жою желі қауіпсіздігіне кешенді және белсенді көзқарасты талап етеді. Күшті аутентификация механизмдерін енгізу қорғаныстың маңызды бірінші желісі болып табылады. Күшті аутентификация хаттамалары рұқсатсыз кіру қаупін және желіге ықтимал ену қаупін айтарлықтай төмендете отырып, құрылғы идентификациясын тиімді тексере алады [13, б. 7].

Жетілдірілген шифрлау әдістері, әсіресе AES сияқты стандарттарды қолдану деректердің тұтастығы мен құпиялылығын қорғауда шешуші рөл атқарады. Желілік коммуникацияларды шифрлау арқылы ұйымдар ұсталған деректерді ықтимал шабуылдаушылар үшін іс жүзінде оқылмайтын ететін қауіпсіздіктің қосымша деңгейін жасай алады [9, б. 5].

Тұрақты қауіпсіздік аудитін жүргізу тағы бір маңызды стратегияны білдіреді. Бұл жүйелі бағалаулар ұйымдарға желіні қорғау механизмдерін үздіксіз жетілдіруді қамтамасыз ете отырып, әлеуетті қауіпсіздік олқылықтарын пайдаланбас бұрын анықтауға және түзетуге көмектеседі.

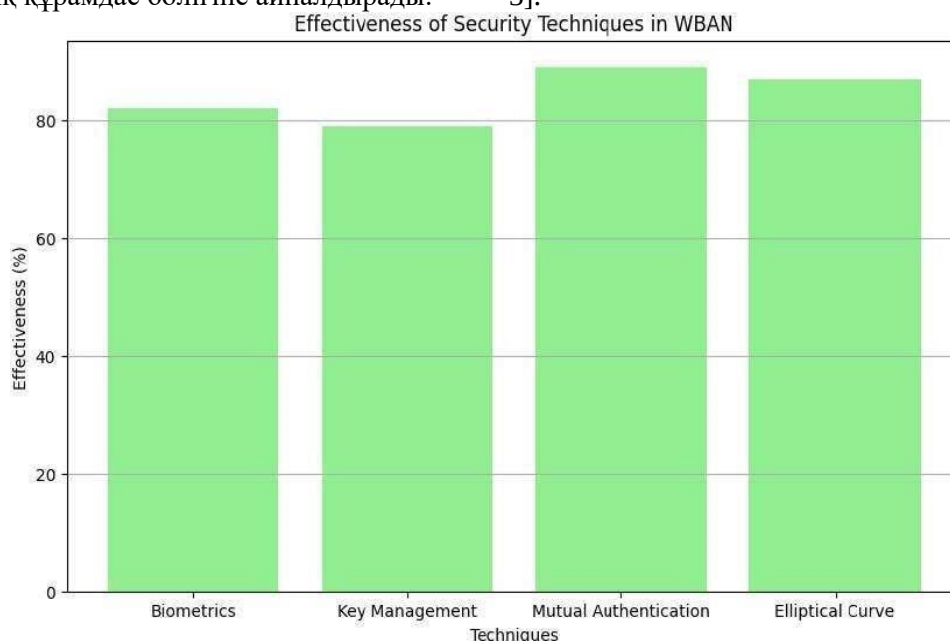
Осы осалдықтарды түсіну және жою арқылы ұйымдар барлық құрылғыларда сенімді және қауіпсіз байланысты қамтамасыз ете отырып, өз желілерінің қауіпсіздігін арттыра алады. Бұл тәсіл желі қауіпсіздігін реактивті шарадан жалпы ұйымдық тәуекелдерді басқарудың белсенді, стратегиялық құрамдас бөлігіне айналдырады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

MAC деңгейіндегі осалдықтарды жою үшін қауіпсіздікті арттыру және желіні сенімді қорғауды қамтамасыз ету үшін әртүрлі сенім механизмдері енгізілді. Бұл механизмдер аутентификацияға, шифрлауға және желілік трафиктің тұтастығына бағытталған.

Аутентификация протоколдары желідегі құрылғылардың идентификациясын тексеруде маңызды рөл атқарады. Бұл хаттамалар желіге тек рұқсат етілген құрылғылардың қол жеткізуін қамтамасыз етеді, бұл MAC спуфингінен және басқа сәйкестікке негізделген шабуылдардан туындайтын қауіптерді азайтады. Мысалдар байланыс орнату алдында бір-бірін аутентификациялауды қажет ететін екі қатынасушы тараптың да сұрау-жауап механизмдерін және өзара аутентификацияны қамтиды. Мұндай хаттамалар құрылғы идентификациясының тұтастығы деректер қауіпсіздігіне тікелей әсер ететін сценарийлерде өте маңызды [10, б. 7].

Шифрлау әдістері деректердің тұтастығын және тасымалдау кезінде құпиялылықты қорғау арқылы қосымша қауіпсіздік деңгейін қамтамасыз етеді. Мысалы, MACsec (Media Access Control Security) - құрылғылар арасындағы трафикті шифрлау арқылы Ethernet қосылымдарын қорғауға арналған 2 деңгейлі шифрлау протоколы. Бұл шабуылдаушылар физикалық желіге қол жеткізген жағдайда да деректерді рұқсатсыз ұстауға жол бермейді [9, б. 3].



Сурет 2 – WBAN жүйесіндегі қауіпсіздік техникасының тиімділігі

2-суретте көрсетілгендей, эллиптикалық әдістері сымсыз дене аймағының желілері қисық криптография (ECC) сияқты шифрлау (WBANs) сияқты шектеулі ресурстары бар

орталарда жоғары тиімді. Бұл әдістер күшті шифрлауды төмен есептеу шығындарымен біріктіреді, бұл оларды денсаулық сақтау және IoT қолданбалары үшін әсіресе қолайлы етеді.

Тиімділікті талдау. 2-суретте көрсетілгендей, қауіпсіздіктің әртүрлі әдістері әртүрлі тиімділік дәрежесін көрсетеді:

- 1) Биометрия: пайдаланушы аутентификациясының күшті механизмін қамтамасыз етеді, бірақ биометриялық деректердің дәлдігіне байланысты.
- 2) Кілтті басқару: шифрланған байланыс арналарын қолдау үшін маңызды болып табылатын криптографиялық кілттердің қауіпсіз таралуын және сақталуын қамтамасыз етеді.
- 3) Өзара аутентификация: рұқсатсыз кіруді тиімді болдырмайтын байланыс процесінде екі соңғы нүктені де тексеру арқылы қауіпсіздіктің ең жоғары деңгейлерінің бірін ұсынады.
- 4) Эллиптикалық қисық криптография (ECC): Күшті шифрлау мен төмен қуат тұтыну арасындағы тепе-теңдік арқасында ерекше тиімділікті көрсетеді, бұл оны WBAN және басқа ресурс шектеулі орталар үшін тамаша етеді.

Кейс зерттеулері. Нақты әлемдік енгізулер сенім механизмдерінің тиімділігін одан әрі көрсетеді:

- 1) MACsec пайдаланатын желілер кәсіпорын деңгейіндегі орналастыруларда байқалғандай, MAC су тасқыны шабуылдарына және портты ұрлау оқиғаларына тиімді қарсы тұра алатыны көрсетілген.
- 2) Денсаулық сақтау саласында өзара аутентификация хаттамалары және ECC бар WBANs пациент деректерін қауіпсіз тасымалдауды қамтамасыз етеді, ұстап алу немесе бұрмалау қаупін азайтады [8].

Осы сенім механизмдерін біріктіру арқылы желілер сенімді байланыс пен деректердің тұтастығын қамтамасыз ете отырып, бірқатар қауіпсіздік қатерлеріне қарсы тұрақтылығын айтарлықтай арттыра алады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Media Access Control (MAC) деңгейі технологиялық әлеуетті де, қауіпсіздік мәселелерін де қамтитын желілік байланыстың маңызды түйінін білдіреді. Ethernet желісінен Wi-Fi-ға дейін әрбір протокол MAC спуфинг, VLAN өту және аутентификация шабуылдарын қоса, күрделі шабуылдаушылар пайдалана алатын бірегей осалдықтарды ұсынады. Бұл қауіптер осы

іргелі қабаттағы желі қауіпсіздігінің күрделі көрінісін көрсетеді.

MAC деңгейін қамтамасыз ету тек техникалық талап емес, қазіргі заманғы ұйымдар үшін стратегиялық императив болып табылады. Тиімді жұмсарту сенімді аутентификация механизмдерін, кеңейтілген шифрлау әдістерін және қатаң қауіпсіздік аудиттерін біріктіретін көп қырлы тәсілді қажет етеді. Кешенді стратегияларды жүзеге асыру арқылы ұйымдар ықтимал осалдықтарды өздерінің желілік инфрақұрылымын нығайту мүмкіндіктеріне айналдыра алады.

Желілік технологиялар дамып келе жатқанда, MAC деңгейі киберқауіпсіздіктегі маңызды шайқас алаңы болып қала береді. Қауіпсіздігіне басымдық беретін ұйымдар құпия деректерді қорғауға, желінің тұтастығын сақтауға және цифрлық байланыстың барған сайын жетілдірілген ландшафтында шарлауға жақсырақ орналасады. Желілік қауіпсіздіктің болашағы дәлдікпен және тұрақтылықпен пайда болатын қауіптерді болжау, анықтау және оларға жауап беру ептілігін дамытуда жатыр.

Автордың үлесі (таксономия CRediT):

Шахов Н.А. зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, зерттеу әдістемесін қалыптастыру, MAC деңгейіндегі қауіпсіздік хаттамаларын талдау, ғылыми әдебиеттерді зерттеу, нәтижелерді интерпретациялау және қолжазбаның бастапқы нұсқасын дайындау.

Харин Э.В.: формалды талдау жүргізу, Ethernet, Wi-Fi, Zigbee және Bluetooth хаттамаларының қауіпсіздік ерекшеліктерін салыстырмалы бағалау, MAC деңгейіндегі осалдықтарды (MAC spoofing, VLAN hopping, ARP шабуылдары) зерттеу, қауіпсіздік механизмдерін бағалау, мақаланы ғылыми редакциялау және соңғы нұсқасын дайындау.

Автор мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және ұсынылған ғылыми нәтижелердің дұрыстығына жауап береді.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландыру көздерін тартусыз орындалды.

Алғыс. Қарағанды индустриялық университеті мен Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті ғылыми ортасына зерттеу жүргізуге қолдау көрсеткені үшін алғыс білдіреді. Сонымен қатар, желілік қауіпсіздік, ақпараттық технологиялар және киберқауіпсіздік саласындағы ғылыми кеңестер мен тәжірибелік ұсыныстар берген әріптестерге ризашылығын 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] Ali, A. S., Baddeley, M., Bariah, L., Lopez, M. A., Lunardi, W. T., Giacalone, J., & Muhaidat, S. (2022). JAMRF: Performance analysis, evaluation, and implementation of RF jamming over Wi-Fi. I.E.E.E. Access, 10, 133370–133384. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3230895>;
- [2] Al-Shareeda, M. A., Anbar, M., Manickam, S., & Hasbullah, I. H. (2020, July 29). Review of Prevention Schemes for Man-In-The-Middle (MITM) Attack in Vehicular Ad hoc Networks. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3662935;
- [3] Blancaflor, E., Purificacion, P. M. G., Atienza, R. B., Yao, J. J. M., & Alvarez, D. A. C. (2023). Exploring the depths of Bluetooth attacks: A critical analysis of Bluetooth exploitation and awareness of users. Proceedings of the 2023 6th International Conference on Computing and Big Data (ICCBD), Shanghai, China, 52–59. <https://doi.org/10.1109/ICCBD59843.2023.10607255>;
- [4] Jiang, Z., Zhao, K., Li, R., Zhao, J., & Du, J. (2020). PHYAlert: Identity spoofing attack detection and prevention for a wireless edge network. Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications, 9(5). <https://doi.org/10.1186/s13677-020-0154-7>;
- [5] Kaur, M., Bajaj, R., & Kaur, N. (2021). A review of MAC layer for wireless body Area Network. Journal of Medical and Biological Engineering, 41(6), 767–804. <https://doi.org/10.1007/s40846-021-00669-1>;
- [6] Khanji, S., Iqbal, F., & Hung, P. (2019). ZigBsecurity vulnerabilities: Exploration and evaluating. 2019 10th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS), 52–57. <https://doi.org/10.1109/ICICS.2019.8809115>;
- [7] Kim, K., & Lee, M. (2018). SNMP-Based Detection of VLAN hopping attack Risk. In Lecture notes in electrical engineering (pp. 267–272). https://doi.org/10.1007/978-981-13-1056-0_28;
- [8] Lackorzynski, T., Garten, G., Huster, J. S., Köpsell, S., & Hartig, H. (2020). Enabling and optimizing MACsec for industrial environments (Extended abstract). 2020 16th I.E.E.E. International Conference on Factory Communication Systems (WFCS), 1–4. <https://doi.org/10.1109/WFCS47810.2020.9114434>;
- [9] Oluyede, M. S., Mart, J., Olusola, A., & et al. (2024). The performance analysis of MACsec in different network environments. ScienceOpen Preprints. <https://doi.org/10.14293/PR2199.000736.v1>;
- [10] Preethichandra, D. M. G., Piyathilaka, L., Izhar, U., Samarasinghe, R., & De Silva, L. C. (2023). Wireless body area networks and their applications—A review. I.E.E.E. Access, 11, 9202–9220. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239008>;
- [11] Prabadevi, B., Jeyanthi, N., & Abraham, A. (2019). An analysis of security solutions for ARP poisoning attacks and its effects on medical computing. International Journal of Systems Assurance Engineering and Management, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13198-019-00919-1>;
- [12] Punia, S. K., & Ziya, F. (2019). Study on MAC protocols and attacks: A review. Proceedings of the 2019 6th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, 621–625. <https://doi.org/10.1109/INDIACom.2019.8745072>;
- [13] Usman, M., Asghar, M. R., Ansari, I. S., & Qaraqe, M. (2018). Security in wireless body area networks: From in-body to off-body communications. I.E.E.E. Access, 6, 58064–58074. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2873825>

REFERENCES

- [1] Ali, A. S., Baddeley, M., Bariah, L., Lopez, M. A., Lunardi, W. T., Giacalone, J., & Muhaidat, S. (2022). JAMRF: Performance analysis, evaluation, and implementation of RF jamming over Wi-Fi. I.E.E.E. Access, 10, 133370–133384. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3230895>;
- [2] Al-Shareeda, M. A., Anbar, M., Manickam, S., & Hasbullah, I. H. (2020, July 29). Review of Prevention Schemes for Man-In-The-Middle (MITM) Attack in Vehicular Ad hoc Networks. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3662935;
- [3] Blancaflor, E., Purificacion, P. M. G., Atienza, R. B., Yao, J. J. M., & Alvarez, D. A. C. (2023). Exploring the depths of Bluetooth attacks: A critical analysis of Bluetooth exploitation and awareness of users. Proceedings of the 2023 6th International Conference on Computing and Big Data (ICCBD), Shanghai, China, 52–59. <https://doi.org/10.1109/ICCBD59843.2023.10607255>;
- [4] Jiang, Z., Zhao, K., Li, R., Zhao, J., & Du, J. (2020). PHYAlert: Identity spoofing attack detection and prevention for a wireless edge network. Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications, 9(5). <https://doi.org/10.1186/s13677-020-0154-7>;

- [5] Kaur, M., Bajaj, R., & Kaur, N. (2021). A review of MAC layer for wireless body Area Network. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 41(6), 767–804. <https://doi.org/10.1007/s40846-021-00669-1>;
- [6] Khanji, S., Iqbal, F., & Hung, P. (2019). ZigBsecurity vulnerabilities: Exploration and evaluating. 2019 10th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS), 52-57. <https://doi.org/10.1109/IACS.2019.8809115>;
- [7] Kim, K., & Lee, M. (2018). SNMP-Based Detection of VLAN hopping attack Risk. In *Lecture notes in electrical engineering* (pp. 267–272). https://doi.org/10.1007/978-981-13-1056-0_28;
- [8] Lackorzynski, T., Garten, G., Huster, J. S., Köpsell, S., & Hartig, H. (2020). Enabling and optimizing MACsec for industrial environments (Extended abstract). 2020 16th I.E.E.E. International Conference on Factory Communication Systems (WFCS), 1-4. <https://doi.org/10.1109/WFCS47810.2020.9114434>;
- [9] Oluyede, M. S., Mart, J., Olusola, A., & et al. (2024). The performance analysis of MACsec in different network environments. *ScienceOpen Preprints*. <https://doi.org/10.14293/PR2199.000736.v1>;
- [10] Preethichandra, D. M. G., Piyathilaka, L., Izhar, U., Samarasinghe, R., & De Silva, L. C. (2023). Wireless body area networks and their applications—A review. *I.E.E.E. Access*, 11, 9202–9220. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239008>;
- [11] Prabadevi, B., Jeyanthi, N., & Abraham, A. (2019). An analysis of security solutions for ARP poisoning attacks and its effects on medical computing. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13198-019-00919-1>;
- [12] Punia, S. K., & Ziya, F. (2019). Study on MAC protocols and attacks: A review. *Proceedings of the 2019 6th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, New Delhi, India, 621–625. <https://doi.org/10.1109/INDIACom.2019.8745072>;
- [13] Usman, M., Asghar, M. R., Ansari, I. S., & Qaraqe, M. (2018). Security in wireless body area networks: From in-body to off-body communications. *I.E.E.E. Access*, 6, 58064–58074. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2873825>

IT ТЕХНОЛОГИЯЛАР, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИКА ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/077>

EFFECTIVE METHODS FOR ENSURING DATA INTEGRITY IN MICRO-SERVICES BASED ON THE SPRING FRAMEWORK AND POSTGRESQL

*Lutsenko V.S., Klopov Y.S., *Alzhanov A.U.*

Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

** Corresponding author email: a.alzhanov@tttu.edu.kz*

Author information:

Lutsenko V.S. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Klopov Y.S. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Alzhanov A.U. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, E-mail: a.alzhanov@tttu.edu.kz

Abstract. The work considers methods for optimizing transaction processing in the microservice architecture based on the Java/Spring Framework and PostgreSQL platform. Describes the main problems associated with simultaneous data access, such as transaction conflicts, deadlocks, and overhead. Analysis of various ways of managing transactions is carried out, including the levels of isolation, the use of optimistic and pessimistic locks. Based on the data obtained, effective methods are proposed to ensure data compliance and avoid competitive errors. The results of the study can be useful for developing high-load microservice applications that require reliable and efficient data processing.

Keywords: *microservices, transactions, data consistency, isolation levels, optimistic locking, pessimistic locking, parallel monitoring, high load systems, impotence, dead ends, performance, scaling.*

SPRING FRAMEWORK ЖӘНЕ POSTGRESQL НЕГІЗІНДЕГІ МИКРОҚЫЗМЕТТЕРДЕ ДЕРЕКТЕРДІҢ ДӘРІСТІЛІГІН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ ТИІМДІ ӘДІСТЕРІ

*Луценко В.С., Клопов Ю.С., *Алжанов А.У.*

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

**Корреспондент автор e-mail: a.alzhanov@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Луценко В.С. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

Клопов Ю.С. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

Алжанов А.У. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан, E-mail: a.alzhanov@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Жұмыс Java/Spring Framework және PostgreSQL платформасына негізделген микросервис архитектурасында транзакцияларды өңдеуді оңтайландыру әдістерін қарастырады. Транзакция қақтығыстары, тығырықтанулар және үстеме шығындар сияқты бір мезгілде деректерге қол жеткізумен байланысты негізгі мәселелерді сипаттайды. Оқшаулау деңгейлерін, оптимистік және пессимистік құлыптарды қолдануды қоса алғанда, транзакцияларды басқарудың әртүрлі тәсілдеріне талдау жүргізіледі. Алынған деректер негізінде деректердің сәйкестігін қамтамасыз ету және бәсекелестік қателерді болдырмаудың тиімді әдістері ұсынылады. Зерттеу нәтижелері сенімді және тиімді деректерді өңдеуді қажет ететін жоғары жүктемелі микросервис қосымшаларын әзірлеу үшін пайдалы болуы мүмкін.

Түйін сөздер: *микросервистер, транзакциялар, деректер консистенциясы, оқшаулау деңгейлері, оптимистік құлыптау, пессимистік құлыптау, параллельді бақылау, жоғары жүктеме жүйелері, импотенттілік, тұйықталулар, өнімділік, масштабтау.*

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛЕКЦИОННОСТИ ДАННЫХ В МИКРОУСЛУГАХ НА ОСНОВЕ SPRING FRAMEWORK И POSTGRESQL

Луценко В.С., Клопов Ю.С., *Алжанов А.У.

Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

*Корреспондент автор e-mail: a.alzhanov@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Луценко В.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

Клопов Ю.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

Алжанов А.У. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, E-mail: a.alzhanov@tttu.edu.kz

Аннотация. В работе рассматриваются методы оптимизации обработки транзакций в архитектуре микросервисов, основанной на платформе Java/Spring Framework и PostgreSQL. Описывает основные проблемы, связанные с одновременным доступом к данным, такие как конфликты транзакций, тупиковые ситуации и накладные расходы. Проводится анализ различных подходов к управлению транзакциями, включая уровни изоляции, использование оптимистических и пессимистических блокировок. На основе полученных данных предлагаются эффективные методы обеспечения согласованности данных и предотвращения конкурентных ошибок. Результаты исследования могут быть полезны для разработки высоконагруженных микросервисных приложений, требующих надежной и эффективной обработки данных.

Ключевые слова: микросервисы, транзакции, согласованность данных, уровни изоляции, оптимистическая блокировка, пессимистическая блокировка, параллельное отслеживание, системы с высокой нагрузкой, импотенция, замыкания, производительность, масштабируемость.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Spring Framework және PostgreSQL негізіндегі микросервистік архитектураларда деректердің тұтастығын қамтамасыз ету мәселелерін зерттеу барысында транзакцияларды басқару механизмдеріне, оқшаулау деңгейлеріне және деректерге параллель қол жеткізуді бақылау әдістеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде жоғары жүктемелі жүйелерде транзакциялық қақтығыстарды, тұйықталуларды және деректердің жоғалуын болдырмау үшін оптимистік және пессимистік құлыптау әдістерін, сондай-ақ қайталау механизмдерін қолданудың тиімділігі негізделді.

Сонымен қатар, PostgreSQL дерекқорының транзакциялық мүмкіндіктерін Spring Framework құралдарымен біріктіру арқылы деректердің сәйкестігін сақтаудың тиімді тәсілдері анықталды. Жүргізілген тәжірибелік зерттеулер нәтижесінде пессимистік құлыптау әдісінің жоғары қатарластық жағдайында өнімділікті сақтау, өңдеу жылдамдығын арттыру және қосымша бағдарламалық логиканы азайту бойынша артықшылықтары дәлелденді. Оптимистік құлыптау мен транзакцияларды оқшаулау деңгейлерін реттеу параллельдігі төмен жүйелерде тиімді шешім ретінде ұсынылды.

Зерттеу нәтижелері микросервистік қосымшаларда сенімді транзакциялық өңдеуді

ұйымдастыру, деректердің тұтастығын сақтау және жоғары жүктемелі ақпараттық жүйелердің

КІРІСПЕ

Микросервис архитектурасына негізделген заманауи жоғары жүктемелі қолданбалар икемділік, масштабтау және өнімділікті сақтай отырып, деректердің жоғары үйлесімділігін талап етеді. Микросервистерді пайдалану күрделі жүйелерді бөлек әзірлеуге, орналастыруға және масштабтауға болатын бөлек, тәуелсіз компоненттерге бөлуге мүмкіндік береді. Дегенмен, мұндай бөлу, әсіресе деректердің сәйкестігі мен транзакцияны басқару контекстінде жаңа қиындықтарды тудырады [3, б. 54].

Микросервис архитектурасында әрбір қолданба өзінің дерекқорларын пайдалана алады, асинхронды хабарламалар немесе REST API арқылы басқа компоненттермен әрекеттесе алады. Бұл деректер тұтастығына қауіп төндіреді, өйткені қызметтер арасындағы өзара әрекеттесулер жоғары қатарлас орталарда орын алады және жиі асинхронды болады. Мысалы, ретсіз дерекқор жазбалары және ағындар арасындағы жарыстар дұрыс емес деректерге әкелуі мүмкін, бұл әсіресе қаржылық, медициналық және аналитикалық жүйелер үшін өте маңызды.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі уақытта жоғары жүктемелі ақпараттық жүйелерді әзірлеуде микросервистік архитектураларды қолдану кеңінен таралуда. Алайда мұндай жүйелерде деректердің тұтастығын сақтау, транзакцияларды басқару және бірнеше қызметтердің бір уақытта деректерге қол жеткізуінен туындайтын қателерді болдырмау мәселелері толық шешілмеген маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Қолданыстағы ғылыми зерттеулерде транзакцияларды оқшаулау деңгейлері, оптимистік және пессимистік құлыптау әдістері немесе дерекқорды басқару механизмдері жеке қарастырылғанымен, Spring Framework және PostgreSQL негізіндегі микросервистік жүйелерде осы тәсілдерді кешенді түрде салыстырып, нақты жоғары жүктемелі орта үшін тиімді шешімді анықтау жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сондықтан бұл зерттеу микросервистік қосымшаларда деректердің сенімділігін арттыру және транзакциялық өндеуді оңтайландыру әдістерін ғылыми негіздеуге бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы Spring Framework және PostgreSQL негізіндегі микросервистік архитектураларда деректердің тұтастығын қамтамасыз етуге арналған әртүрлі тәсілдерге кешенді салыстырмалы талдау жүргізілуінде. Зерттеу барысында транзакцияларды оқшаулау деңгейлері, қайталау механизмдері, оптимистік және пессимистік құлыптау әдістерінің тиімділігі тәжірибелік сынақтар арқылы бағаланды. Талдау нәтижесінде жоғары қатарластық пен үлкен жүктеме жағдайында пессимистік құлыптаудың деректердің жоғалуын болдырмау, өндеу

өнімділігін сақтау және бағдарламалық код күрделілігін азайту тұрғысынан артықшылықтары негізделді. Сонымен қатар, әртүрлі жүйелік талаптарға байланысты деректердің сәйкестігін қамтамасыз етудің оңтайлы әдісін таңдау бойынша ғылыми негізделген ұсыныстар әзірленді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Микросервис қосымшаларын әзірлеу үшін кеңінен қолданылатын Java фреймворктерінің бірі дерекқормен жұмысты жеңілдету және деректер күйін басқару үшін барлық құралдарды қамтамасыз ететін Spring Framework болып табылады [2, б. [225]. Дегенмен, олармен қалай жұмыс істеу керектігін түсінбеу дұрыс емес нәтижелерге және жүйе тиімділігінің төмендеуіне әкелуі мүмкін.

Бұл зерттеу Spring Framework және PostgreSQL негізіндегі микросервис архитектурасында деректердің сәйкестігін қамтамасыз ету әдістерін талдауға, сондай-ақ жоғары жүктемелі жүйелерде пайдаланудың ең тиімді тәсілдерін анықтауға арналған. Және ол қаржылық, аналитикалық және кәсіпорын шешімдері сияқты заманауи жоғары жүктемелі жүйелер үшін маңызды болып табылатын микросервис қосымшаларының тұрақтылығы мен өнімділігін арттыруға бағытталған.

Мәселені анықтау үшін қарапайым өтініш жазылды, оның жалғыз мақсаты техникалық конференция тыңдаушыларының спикерлерге берген «лайктарын» жазу болып табылады. Лайк, өз кезегінде баяндама тақырыбы бойынша жиналады. Қызмет коды 1-суретте көрсетілген.

```
public void addLikesToSpeaker(Likes likes) {
    speakersRepository.findByTalkName(likes.getTalkName())
        .ifPresentOrElse(speaker -> {
            speaker.setLikes(speaker.getLikes() + likes.getLikes());
            speakersRepository.save(speaker);
            log.info("{} likes successfully added", likes.getLikes());
        }, () -> {
            log.warn("Speaker with talk {} not found",
                likes.getTalkName());
        });
}
```

Сурет 1 – Қарастырылып отырған қызметтің әдіс коды

Қызмет жұмыс істейтін деректер қоры кестесінің түрі 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1 – Тесттерді іске қосу алдында кестенің дерекқордағы көрінісі

id	first_name	last_name	talk_name	likes	updated
----	------------	-----------	-----------	-------	---------

1	Myrkymbai	Kyrtymbai	Spring best practice	0	2025-02-14 13:06:13:021
---	-----------	-----------	----------------------	---	----------------------------

Қолданбаны сынау үшін біз ашық бастапқы бағдарламалық құралды қолданамыз – Gatling және қолданбамызға арналған «Көктемдегі ең жақсы тәжірибе» есебі үшін хабар брокерінің тақырыбына ұнатулары бар 2 мың хабарлама

Кесте 2 – Бірінші сынақтан кейін кестені мәліметтер базасында көрсету

id	first_name	last_name	talk_name	likes	updated
1	Myrkymbai	Kyrtymbai	Spring best practice	851	2025-02-14 13:25:10:280

Бұл мәселе жазбаша өтініште транзакцияны басқарудың болмауына байланысты туындайды. Жазбаша қызмет басқа 4 ағында (хабарлар 5 ағында тұтынылады) дәл осындай әрекеттің орындалуы мүмкін екеніне назар аудармай, деректер базасынан ұнатулар өрісінің мәнін оқиды және оған сұрауда алынған ұнатулар санын қосады және қайта жазу орын алады. Яғни, бір мән бірден 5 ағында бір уақытта оқылады, бірақ өңдеуге ең көп уақыт кеткен соңғы мән ғана жазылады.

Бұл мәселені қолданбамызда транзакцияны дұрыс басқаруды орнату арқылы шешуге болады. Транзакция – бұл деректермен жұмыс істеудің логикалық бірлігін білдіретін дәйекті дерекқор операцияларының тобы. Транзакция деректер тұтастығын сақтай отырып және басқа параллельдік транзакциялардан тәуелсіз толық және сәтті орындалуы мүмкін немесе мүлде орындалмауы мүмкін, бұл жағдайда оның ешқандай әсері болмауы керек.

Spring Framework транзакциялармен жұмыс істеу үшін барлық қажетті құралдарды ұсынады, сонымен қатар дерекқормен жұмыс істеу үшін барлық қажетті абстракцияларды қамтамасыз ететін Spring Data JPA жобасын ұсынады. PostgreSQL сонымен қатар оқшаулау құралдарын пайдалана отырып, ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Reliability) транзакцияларын жүзеге асыруды толығымен қолдайды [6, б. [157]. Дегенмен, сіз тек қана рамкаға сене алмайсыз, ол барлық жұмысты өзі орындамайды және оған транзакциямен қалай жұмыс істеу керектігін түсіндіру керек.

Spring Framework-тегі пайдалы құралдардың бірі @Transactional аннотациясы болып табылады, дегенмен, егер бұл аннотацияны жазбаша қолданбада дерекқор әдісіне орнатсақ,

жіберетін жазбаша тест. Қолданбаның хабарламаларын оқу 5 ағында болады. Тесттерді аяқтағаннан кейін барлық «ұнатулар» қосылмағанын, атап айтқанда шамамен 57% жоғалғанын көруге болады. 2 кестені қараңыз.

бұл жағдайды нашарлатады және біз үлкен шығындарға тап боламыз. Мәліметтер базасында транзакцияны оқшаулаудың 4 деңгейі бар, олардың әрқайсысы параллель транзакциялар арасындағы қолайлы өзара әрекеттесу дәрежесін және өнімділік пен бір мезгілде қателерден қорғау деңгейі арасындағы теңгерімдерді анықтайды:

1) Read Uncommitted – транзакция басқа транзакциямен әлі жасалмаған деректерді оқи алады (лас оқу).

2) Оқу орындалды – транзакция тек басқа транзакциялармен жасалған өзгерістерді көреді. Лас оқуларға жол берілмейді, бірақ қайталанбайтын оқулар мәселе болуы мүмкін.

3) Қайталанатын оқу – транзакция басында оқылған деректер аяқталғанға дейін өзгеріссіз қалуына кепілдік береді. Бұл лас оқуларға да, қайталанбайтын оқуларға да жол бермейді.

4) Сериализацияланатын – транзакциялардың толық сериялануын қамтамасыз ететін оқшаулаудың ең жоғары деңгейі. Барлық параллельді транзакциялар ретімен орындалғандай орындалады. Бұл деңгей деректердің максималды сәйкестігіне кепілдік береді [5, б. 47].

Сәйкесінше, пайдаланылған оқшаулау деңгейі неғұрлым жоғары болса, дерекқор соғұрлым көп жұмыс істеуі керек, осылайша өнімділікті төмендетеді, бірақ деректер сәйкестігін жақсартады. PostgreSQL Read Uncommitted функциясына қолдау көрсетпейді, ал ең төменгі және әдепкі мән Read Committed болып табылады және сипаттамадан көріп отырғаныңыздай, бұл деңгей біздің қолданбаны бір мезгілде оқу мен жазудан қорғамайды.

Қолданба конфигурациясындағы оқшаулау іс жүзінде ешқандай шығын қалмағанын көреміз, деңгейін Қайталанатын оқуға орнату арқылы біз кесте 3.

Кесте 3 – Қайталанатын оқудағы екінші сынақтан кейін дерекқордағы кесте көрінісі

id	first_name	last_name	talk_name	likes	updated
1	Myrkymbai	Kyrtymbai	Spring best practice	1996	2025-02-14 14:01:04:340

Дегенмен, 4 «ұнату» деректерінің жоғалуы әлі де орын алады және қолданба қателері журналын қарасаңыз, келесі хабарды көре аласыз: «Бір мезгілде жаңартуға байланысты кіруді сериялау мүмкін болмады.» Бұл дерекқор бізге деректерді қайта жазуға мүмкіндік бермеді, бірақ деректердің өзі жоғалды. Бұл қатені Spring Retry жобасын пайдалану және қайталау әдісін қолданбамыздағы @Retry аннотациясымен белгілеу арқылы түзетуге болады, осылайша проблемалық жазу әрекетін қайталап көріңіз. Тағы бір сынақты өткізгеннен кейін дерекқорда барлық 2000 лайк орнатылғанын көруге болады.

Оқшаулау деңгейіне ауысқанда дәл осындай нәтижелер алынды - Серияланатын, өйткені ДҚ өзі барлық параллель транзакцияларды кезекке орналастырады.

Дегенмен, дерекқордағы транзакцияны оқшаулау режимін өзгертуді қажет етпейтін тағы бір шешім бар, атап айтқанда, құлыптарды пайдалану. Көп пайдаланушылық жүйелерде деректерге қол жеткізуді басқару үшін қолданылатын құлыптардың 2 түрі бар:

1) Оптимистік құлыптау – транзакциялар арасындағы қайшылықтар аз болады деп болжайды. Бұл тәсіл қолданба деңгейінде жұмыс істейді және деректер нұсқасына негізделген.

2) Пессимистік құлыптау транзакциялар арасында көптеген қақтығыстар болатынын болжайды және олардың алдын ала алдын алу қажет. Бұл тәсіл дерекқор деңгейінде жұмыс істейді және

Кесте 4 – Пессимистік құлыптауды қолданғаннан кейін дерекқордағы кесте көрінісі

id	first_name	last_name	talk_name	likes	updated
1	Myrkymbai	Kyrtymbai	Spring best practice	200	2025-02-14 15:37:40:054

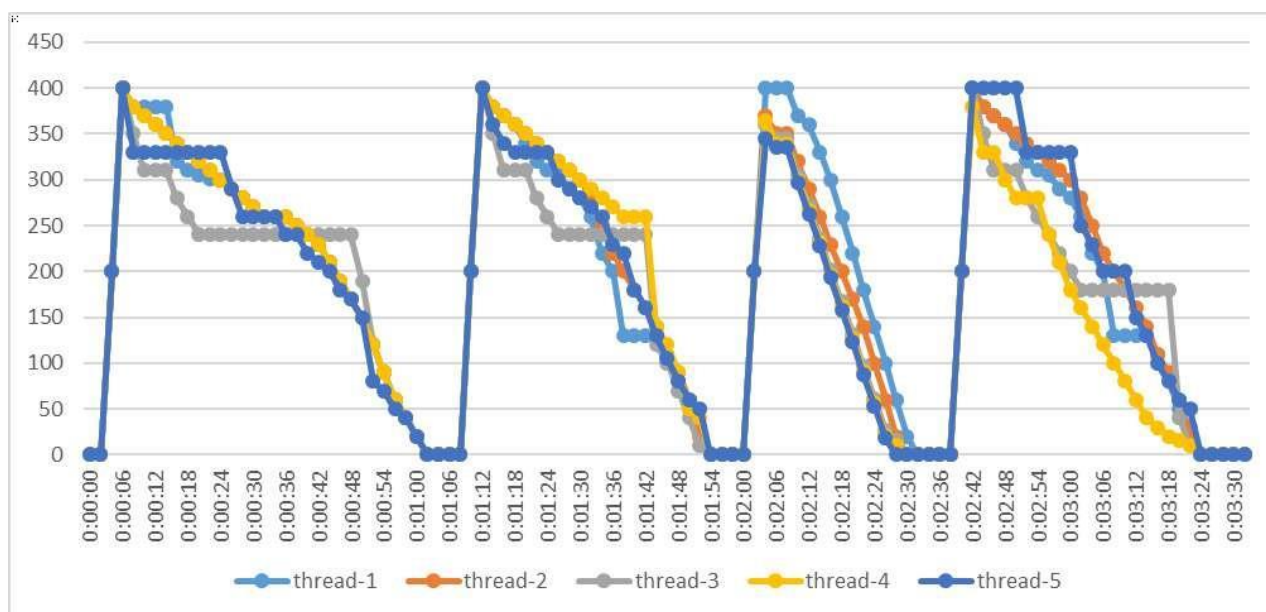
Сипатталған 4 әдістің әрқайсысы мәселені шешті, ол тәжірибе жүзінде расталды, бірақ әрбір тәсілдің өнімділігін бағалау қажет. 2-суретте төрт

«ТАҢДАУ ... ҮШІН ЖАҢАРТУ» синтаксисін пайдаланады [1. бірге. 305]

Сипатталған мәселені шешу үшін оптимистік құлыптау тәсілін қолдану қолайлы емес, өйткені әдепкі бойынша бәсекелестік жоғары, бірақ эксперименттің тазалығы үшін бұл тәсілді де тексеру қажет. Қолданбада құлыптарды қолданатын болсақ, онда оқшаулау деңгейін ең төменгі деңгейге орнатуға болады, PostgreSQL жағдайында бұл оқу орындалады. Оптимистік құлыптауды жүзеге асыру үшін @Retry әдісі қалдырылды, бірақ жаңартылған өріс @Version аннотациясымен белгіленді және дерекқордан JPA репозиторийіне жазбаны шығарып алу әдісі @Lock(LockModeType.OPTIMISTIC) белгісімен белгіленді. Енді дерекқорға жаңа мән жазуға әрекет жасағанда, қолданба жаңартылған өрістің жазба оқылған кездегі мәннен қазіргі уақытта ерекшеленетінін тексереді, ал егер айырмашылықтар болса, жазбаның @Retry блогында қайталануын тудыратын ерекше жағдайды шығарады. Тестті өткізгеннен кейін біз тағы да дерекқорда 2000 лайк түрінде сәтті нәтиже алдық.

Пессимистік құлыптауды қолдану үшін @Retry блогын жоюға болады және @Version енді қажет емес. Ал дерекқордан деректерді алу әдісі @Lock(LockModeType.PESSIMISTIC_WRITE) арқылы түсіндіріледі. Соңғы сынақты орындағаннан кейін біз дерекқордың қайтадан 4-ші кестенің дәйекті күйінде екенін көреміз.

дәйекті сынақ үшін кезектегі өңделмеген хабарламалар санының уақытқа қатысты графигі көрсетілген.



Сурет 2 – 5 ағындағы кезектен хабарламаларды талдау жылдамдығы

Солдан оңға қарай:

- 1) Оқшаулау режимі – Қайталанатын оқу + Қайталау;
- 2) Оқшаулау режимі – Серияланатын + Қайталау;
- 3) Оқшаулау режимі – оқу орындалды + пессимистік құлыптау;
- 4) Оқшаулау режимі – оқуға берілген + оптимистік құлыптау.

Зерттеулер көрсеткендей, деректерге параллель қол жеткізудің үлкен көлемі болуы мүмкін жоғары жүктемелі ортада пессимистік құлыптау өнімділікті жақсартады (деректерді өңдеу жылдамдығы), сонымен қатар жазылуы қажет код көлемін азайтады. Бұл ерекшеліктерді тастағаннан кейін дерекқордағы жазбаны қайталау логикасына қосымша шақырулардың болмауына байланысты. Дегенмен, параллельділік соншалықты жоғары емес орталарда оптимистік құлыптау немесе оқшаулау деңгейін жай ғана өзгерту өнімділікке көп әсер етпестен мәселені шеше алады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе, микросервис архитектурасына негізделген жоғары жүктемелі жүйелерде деректердің сәйкестігін қамтамасыз ету – аса маңызды әрі күрделі міндеттердің бірі. Зерттеу барысында Spring Framework пен PostgreSQL құралдарын пайдалана отырып, транзакцияны басқару мен құлыптау тәсілдерінің әртүрлі нұсқалары қарастырылды. Тәжірибелік сынақтар көрсеткендей, оқшаулау деңгейлерін өзгерту, қайталау механизмдерін қолдану, сондай-ақ оптимистік және пессимистік құлыптау әдістері деректердің жоғалу мәселесін шешуге мүмкіндік береді.

Әдістердің әрқайсысы нақты жағдайға байланысты өзіндік артықшылықтар мен шектеулерге ие:

- 1) Пессимистік құлыптау жоғары жүктемелі ортада өнімділікті сақтай отырып, деректердің жоғалуын болдырмайды және қосымша код көлемін азайтады;
- 2) Оптимистік құлыптау параллельділік төмен ортада тиімді болып табылады және өнімділікке айтарлықтай әсер етпейді;
- 3) Оқшаулау деңгейлерін арттыру транзакция қауіпсіздігін күшейтсе де, кей жағдайларда өнімділікті төмендетуі мүмкін;

Сонымен, жоғары жүктемелі микросервистік қосымшаларды әзірлеу кезінде деректердің тұтастығын сақтау үшін таңдалатын әдіс жүйенің жүктеме сипатына, параллельділік деңгейіне және өнімділік талаптарына байланысты болуы тиіс. Бұл жұмыстың нәтижелері қаржылық, медициналық және аналитикалық жүйелер сияқты деректердің дәлдігі аса маңызды салаларда тұрақты әрі сенімді шешімдерді құруға негіз бола алады.

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

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Луценко В.С. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, зерттеу әдіснамасын қалыптастыру, микросервистік архитектурадағы транзакцияларды басқару әдістерін зерттеу, тәжірибелік эксперименттер жүргізу, алынған нәтижелерді талдау және мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. Клопов Ю.С. – ғылыми жетекшілік, зерттеу әдістемесін жетілдіру, тәжірибелік нәтижелерді тексеру, деректер

тұтастығын қамтамасыз ету тәсілдерін салыстырмалы бағалау, мақаланы ғылыми редакциялау және құрылымын жақсарту. Алжанов А.У. – зерттеу бағытын үйлестіру, ғылыми әдебиеттерге талдау жүргізу, нәтижелерді интерпретациялау, техникалық шешімдерді бағалау, мақаланың мазмұнын жетілдіру және соңғы нұсқасын дайындауға қатысу.

Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығы мен ғылыми негізділігіне ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді орындауға көрсеткен ғылыми және ұйымдастырушылық

қолдауы үшін Қарағанды индустриялық университетіне алғыс білдіреді. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелерін талқылауға және ғылыми ынтымақтастықты дамытуға қосқан үлесі үшін серіктес ғылыми ұйымдарға ризашылығын 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] Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. // 2016 Addison-Wesley Professional, С. 305- 309;
- [2] Kleppmann M. Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable Scalable, and Maintainable Systems. // 2017 O'Reilly Media, С. 225-232;
- [3] Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. 2nd Edition. // O'Reilly Media, 2021 С. 53-59;
- [4] PostgreSQL Global Development Group. PostgreSQL 15.10 Documentation. [Электронный ресурс]. URL: <https://postgresql.org/> (дата обращения: 13.12.2024)., Chapter 13: Concurrency Control;
- [5] Fowler M. Refactoring: Improving the Design of Existing Code. 2nd Edition. // 2018 Addison-Wesley Professional, С. 47-55;

REFERENCES

- [1] Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. Дизайн Үлгілері: Қайта пайдалануға болатын Нысанға Бағытталған Бағдарламалық Құрал Элементтері. // 2016 Addison-Wesley Professional, Бірге. 305- 309;
- [2] Kleppmann M. Деректерді Көп Қажет Ететін Қосымшаларды Жобалау: Артындағы Үлкен Идеялар Сенімді Масштабталатын Және Техникалық қызмет көрсететін Жүйелер. // 2017 O ' Reilly Media, Бірге. 225-232;
- [3] Newman S. Building Микросервистері: Ұсақ Түйіршікті Жүйелерді Жобалау. 2-ші Басылым. // О ' Рейли Медиа, 2021 Жылдан Бастап. 53-59;
- [4] PostgreSQL Жаһандық Даму Тобы. PostgreSQL 15.10 Құжаттама. [Электронный ресурс]. МЕКЕН-ЖАЙЫ: <https://postgresql.org/> (қол жеткізілген күні: 13.12.2024)., 13 Тарау: Параллельді Бақылау;
- [5] Фаулер М. Рефакторинг: Қолданыстағы Кодтың Дизайнын Жетілдіру. 2-Ші Басылым. // 2018 Addison-Wesley Professional, Бірге. 47-55;

ECONOMICS. GENERAL EDUCATION, SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES, AND FUNDAMENTAL DISCIPLINES

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/078>

INTEGRATION OF PAYROLL PROJECTS INTO THE SYSTEM OF BANKING SERVICES FOR CORPORATE CLIENTS

*Fayez Wazani A.W., * Gelmanova Z.S., Nurgaliyeva A.K.*

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

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

Author information:

Fayez Wazani A.W. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz

Gelmanova Z.S. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: zoyakgiu@mail.ru

Nurgaliyeva A.K. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: a.nurgaliyeva@tttu.edu.kz

Abstract. The article analyzes the benefits of the salary project for the bank and the employer, the stages of its implementation, as well as international experience (Germany, Singapore, USA, Poland). A SWOT analysis of the current strategy of Halyk Bank is conducted. Based on the identified problems and digitalization trends, measures are proposed to enhance personalization, develop cross-sales and integrate with HR systems of organizations.

Keywords: salary project, banking services, corporate clients, retention of organizations, Halyk Bank, digitalization, cross-sales, personalization, SWOT analysis.

КОРПОРАТИВТІК КЛИЕНТТЕРГЕ БАНКТІК ҚЫЗМЕТ КӨРСЕТУ ЖҮЙЕСІНЕ ЖАЛАҚЫ ЖОБАЛАРЫН БІРІКТІРУ

. Файез Вазани А.В., Гельманова З.С., Нурғалиева А.К.

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

*Корреспондент автор e-mail: zoyakgiu@mail.ru

Авторлар туралы ақпарат:

Файез Вазани А.В. - Қарағанды индустриалды университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz

Гельманова З.С. - Қарағанды индустриалды университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: zoyakgiu@mail.ru

Нұрғалиева Ә.Қ. - Қарағанды индустриалды университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: a.nurgaliyeva@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Бұл мақалада банк пен жұмыс беруші үшін жалақы жобасының артықшылықтары, оны енгізу кезеңдері, сондай-ақ халықаралық тәжірибе (Германия, Сингапур, АҚШ, Польша) талданған. Halyk Bank-тің қазіргі стратегиясына SWOT-талдау жүргізілген. Анықталған мәселелер мен цифрландыру үрдістеріне сүйене отырып, жекелеуді күшейту, кросс-сатылымдарды дамыту және ұйымдардың HR-жүйелерімен интеграциялау бойынша шаралар ұсынылған.

Түйінді сөздер: жалақы жобасы, банк қызметтері, корпоративтік клиенттер, ұйымдарды ұстап қалу, Halyk Bank, цифрландыру, кросс-сатылымдар, жекелеу, SWOT-талдау

ИНТЕГРАЦИЯ ЗАРПЛАТНЫХ ПРОЕКТОВ В СИСТЕМУ БАНКОВСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КОРПОРАТИВНЫХ КЛИЕНТОВ

*Файез Вазани А.В., * Гельманова З.С., Нурғалиева А.К.*

Қарағанды индустриалды университет, Теміртау, Қазақстан

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

Информация об авторах:

Файез Вазани А.В. - Карагандинский индустриальный университет, Теміртау, Казахстан. E-mail:

w.f.wazine@tttu.edu.kz

Гельманова З.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: zoyakgiu@mail.ru
Нургалиева А.К. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: a.nurgaliyeva@tttu.edu.kz

Аннотация. В статье проанализированы преимущества зарплатного проекта для банка и работодателя, этапы его внедрения, а также международный опыт (Германия, Сингапур, США, Польша). Проведен SWOT-анализ текущей стратегии Халык Банка. На основе выявленных проблем и трендов цифровизации предложены меры по усилению персонализации, развитию кросс-продаж и интеграции с HR-системами организаций.

Ключевые слова: зарплатный проект, банковские услуги, корпоративные клиенты, удержание организаций, Халык Банк, цифровизация, кросс-продажи, персонализация, SWOT-анализ.

MAIN PROVISION

An integrated approach to enhancing payroll projects within the system of banking services for corporate clients is proposed. The study analyzes the strategic role of payroll projects, examines international best practices, and evaluates the current implementation strategy of Halyk Bank through SWOT analysis. Based on the identified challenges and digitalization trends, practical measures are proposed to strengthen service personalization, expand cross-selling opportunities, and improve integration with corporate HR and accounting systems. The proposed recommendations are aimed at increasing customer loyalty, improving the competitiveness of banking services, and supporting the long-term retention of corporate clients.

INTRODUCTION

The modern banking market is characterized by high competition, the need for digital transformation and increasing attention to the quality of service for both retail and corporate clients. One of the strategically important areas of the banking business in these conditions is the development of salary projects. A salary project is not only a means of automating salary payments, but also an effective tool for attracting, retaining and further comprehensive servicing of organizations.

JSC Halyk Bank, as one of the largest banks in Kazakhstan, is actively developing this area. However, current challenges associated with increased competition, changes in customer behavioral preferences and digital technologies require improving approaches to implementing salary projects. It is especially important to ensure high loyalty of organizations, reduce their outflow and increase the volume of additional services provided to employees of enterprises.

Research gap. Although payroll projects have been widely recognized as an effective tool for

automating salary payments and strengthening relationships between banks and corporate clients, most previous studies have focused primarily on their operational and financial benefits. Limited attention has been paid to the strategic integration of payroll projects with digital HR and accounting systems, the personalization of banking services, and the use of payroll projects as a platform for cross-selling and long-term customer retention. Furthermore, despite the rapid digital transformation of the banking sector, practical recommendations for enhancing payroll projects in Kazakhstan based on international best practices remain insufficiently explored.

This study addresses this gap by analyzing the current implementation of payroll projects in Halyk Bank, comparing domestic practices with international experience, and conducting a SWOT analysis to identify existing strengths, weaknesses, opportunities, and threats. Based on the obtained results, the study proposes practical measures aimed at improving service personalization, expanding digital integration with corporate HR systems, and strengthening customer loyalty, thereby enhancing the competitiveness and long-term effectiveness of payroll projects in the banking services system for corporate clients.

Novelty statement. The novelty of this study lies in proposing an integrated approach to improving payroll projects as a strategic component of banking services for corporate clients. Unlike previous studies that primarily emphasize the operational aspects of payroll projects, this research combines international best practices with a SWOT analysis of Halyk Bank to identify key development opportunities. Based on this analysis, practical recommendations are developed to enhance service personalization, strengthen integration with corporate HR and accounting systems, expand cross-selling opportunities, and improve long-term customer retention in the context of banking digitalization.

framework of a salary project, the bank and the organization enter into an agreement under which the bank assumes the functions of transferring salaries, and also offers the organization's employees access to additional financial products and services [1].

METODOLOGY

A salary project is a set of banking services that allows organizations to centrally and automatically transfer salaries to their employees to their individual accounts opened with the bank. Within the

It includes not only settlement and cash services, but also an expanded range of financial products: opening bank accounts, issuing and servicing payment cards, access to online and mobile banking, offers for lending, insurance and investments [2].

From the bank's point of view, the salary project acts as an entry point into relations with corporate clients [3]; as a way to attract individuals – company employees – to the category of salary clients on a mass scale [4]; as a platform for cross-selling retail products: loans, deposits, insurance [5].

The implementation of a salary project in an organization allows for a reduction in the costs of cash transactions [6]; minimization of the risk of errors and thefts when paying salaries [7]; and an increase in the financial satisfaction of employees [8]. For banks in Kazakhstan, including JSC Halyk Bank, the salary project is not only a way to retain organizations in a highly competitive environment, but also a tool for building long-term customer loyalty [9]. In addition, modern trends include digitalization of connection and maintenance processes [10]; integration with 1C, SAP and other accounting systems [11]; offering special conditions for salary cards (cashback, installments, promotions) [12].

The main characteristics of the salary project include automation of payments, which allows minimizing the human factor, reducing accounting costs and increasing the accuracy of transactions; opening accounts for employees - the bank centrally opens accounts for all employees of the organization, often with the ability to choose individual tariffs; each employee is issued a salary bank card linked to the open account; convenient digital channels for managing personal finances are provided.

The salary project, as a tool for banking services of the organization, has advantages (table 1). To establish numerical reversibility criteria, we compare the interface energy of the Es of a single-drop State and the EM of a discrete multi-drop State. Assuming that the effect of gravity is negligible, we can bring liquid drops closer as cut balls. The interfacial energy can then be written as:

Here r is the radius of the wetting zone of a single droplet determined by the total volume (equation (3)), the apparent contact angle of a discrete droplet in each hydrophilic sample, g is the required minimum gap (i.e., the target minimum thickness of a continuous liquid layer), and V is the total volume of the liquid.

Benefits of the salary project [1, 2, 5, 6, 9, 10]

For the organization (employer)	For the bank
Reducing cash handling costs	Expanding the customer base (every employee is a customer)
Centralized and fast transfer of salaries	Possibility of cross-selling retail products (loans, deposits)
Simplifying accounting	Increasing the sustainability of the customer base
Increasing employee loyalty	Increase in turnover on cards and commissions from transactions
Reducing risks when handling cash	Growing demand for online banking and mobile applications
Possibility of integration with 1C, SAP and other systems.	Improving competitiveness through corporate services

The following stages of implementation of the salary project in the organization are distinguished (table 2) [3, 4, 7, 11].

Stages of implementation of the salary project

Stages of implementation	Content
Analysis of company needs	Determining the number of employees, the calculated frequency, reporting requirements and integration.
Selecting a bank and discussing the terms of cooperation	Comparison of tariffs, payment processing speed, additional options (loans, privileges, cashback)
Conclusion of an agreement between an organization and a bank	Signing an agreement on launching a salary project, determining contact persons and data formats.
Opening accounts for employees and issuing cards	Mass registration of employees, identification, distribution of PIN codes, setting up Internet banking

Staff training and launch of the first payment	Conducting accounting briefings, launching a test or first real salary payment.
Project support and maintenance	Working with technical support, monitoring operations, adapting to changes in the staffing schedule and salary fund.

We present foreign experience in implementing salary projects (**Table 3**)

Table 3

Foreign experience in implementing salary projects) [13-15]

Country	Implementation
Germany (Deutsche Bank)	Payroll projects have been successfully integrated with the SAP and DATEV platforms, allowing organizations to fully automate the processing of salaries and tax deductions. Additionally, accounts with savings programs and investment products for employees.
Singapore (DBS Bank)	PayNow Corporate system allows companies to instantly transfer salaries to employee accounts using a phone number or IIN. The bank actively offers loans with instant approval for salary clients.
USA (Bank of America)	The bank provides personalized mobile solutions for employees of companies participating in salary projects, with the ability to access financial education programs. Analytics of salary client behavior has been implemented to improve the personalization of offers
Poland (PKO Bank Polski)	Wide application of digital HR platforms, through which employees can receive not only salaries, but also bonuses, rewards, paid vacations. Integration API with internal ERP systems of companies is provided

Table 4

Comparison of Kazakhstani and foreign experience of salary projects

Criterion	Kazakhstan (Halyk Bank)	Foreign experience (DBS, BofA)
Integration with accounting	Integration with 1C, SAP (partially)	Full automation with ERP
Digitalization of calculations	High level (via Halyk Online)	Instant Transfers (PayNow)
Financial education of employees	Limited, not systematic	Advanced learning system
Speed of service	Average	High (instant payouts)

RESEARCH RESULTS

The comparative analysis revealed that the effectiveness of payroll projects depends not only on the automation of salary payments but also on the level of digital integration and service personalization. Conventional payroll projects primarily focus on processing salary transfers, whereas advanced international practices integrate payroll services with HR and ERP systems, enabling automated personnel management, financial analytics, and personalized banking products. To achieve sustainable competitive advantages, banks must move beyond standardized payroll solutions toward comprehensive digital ecosystems.

The comparison of Kazakhstani and international practices demonstrates that deeper integration with corporate information systems significantly improves the efficiency of payroll

projects. International experience shows that the combination of API-based integration, personalized financial services, and advanced digital platforms enhances customer loyalty and expands cross-selling opportunities. In contrast, limited personalization and insufficient integration with HR systems remain important challenges for domestic banks. Therefore, expanding digital capabilities, strengthening cooperation with corporate clients, and introducing data-driven personalized services are essential for improving the long-term competitiveness and sustainability of payroll projects in the banking sector.

DISCUSSION

Comparison of foreign and Kazakhstani experience in implementing payroll projects allows us to identify important differences in the degree of

maturity, level of digitalization and approaches to working with corporate clients (tables 3, 4). In foreign practice, especially in banks in Germany, the USA, Singapore and Poland, there is a higher level of integration of payroll projects with ERP and HR systems of organizations, as well as active use of mobile platforms and financial analytics.

While JSC Halyk Bank is already implementing digital services (for example, Halyk Online , a mobile application), foreign banks focus on personalized

solutions , training of client employees, instant transfers via API interfaces and promoting not only salary cards, but also investment and credit products for salary clients. Thus, Kazakhstani practice demonstrates sustainable dynamics, but requires a transition from standardized solutions to personalized ones; expansion of the range of services within the salary project (for example, financial coaching, flexible financial products); deeper integration with the digital infrastructure of client companies.

Table 5

The conducted SWOT analysis allowed us to structure the key internal and external factors influencing the effectiveness of the salary project (table 5):

Strengths	Weaknesses	Possibilities	Threats
Wide branch network	Low level of personalization of salary clients	Developing cross-selling	Increased competition from Kaspi, Jusan
Digital platform Halyk Online	Limited work with reviews of organizations	Integration with HR systems	Organizations leaving when service deteriorates
Experienced staff		Financial consulting for employees	

Among the strengths are high brand recognition, a wide branch network and the presence of a modern digital platform, which provides a basis for scaling payroll projects.

Weaknesses include a limited individual approach to clients and insufficient depth of analytical work with reviews of organizations. This creates a risk of customer outflow in the conditions of active competition.

Opportunities include further development of cross-selling, use of HR analytics, creation of flexible programs for employees of organizations (for example, quick loans, savings plans). Threats come from both aggressive market players (Kaspi, Jusan) and possible internal failures in service quality or technological upgrades. Thus, the SWOT analysis emphasizes that the main strategic objective of JSC Halyk Bank is to maintain technological leadership while simultaneously increasing customer focus and flexibility of services.

The role and importance of the salary project for the bank:

A tool for attracting corporate clients. A salary project is an entry point to a business client, which allows the bank to build long-term relationships with the organization, offer it related products: lending, acquiring, deposits, leasing, etc.

Growing the customer base in the retail segment. Each employee of the organization becomes a client of the bank, which increases the reach, the number of users of digital channels and the volume of transactions.

Cross-selling and loyalty. Payroll clients are more easily involved in using other banking products: consumer and mortgage loans, savings and investment programs.

Business retention. The salary project strengthens the organization's attachment to the bank, especially when integrated with accounting programs and convenient technical support.

For organizations, a salary project means a reduction in the burden on the accounting department;

timeliness and transparency of payments; increased employee loyalty due to convenient banking services; and minimization of operational risks associated with cash turnover.

Additional functions and services included in the salary project : servicing of corporate plastic cards (for business trips, business expenses); employee lending at a reduced rate (a salary client is considered less risky); loyalty programs (cashback, bonuses, privileges); personal managers for organizations; integration with 1C and other accounting platforms.

Thus, the salary project is a strategic product that provides the bank with a stable influx of clients, a high level of retention, opportunities for scaling the retail business, and for the organization - optimization of salary calculation processes and increased social comfort of employees.

CONCLUSION

From the perspective of corporate clients, payroll projects contribute to optimizing payroll administration, reducing accounting workload,

minimizing operational risks and improving transparency of salary payments. At the same time, employees receive access to modern digital banking services and preferential financial products, which positively affects their financial well-being and satisfaction with the employer.

The conducted SWOT analysis showed that the bank possesses considerable competitive advantages, including strong market recognition, an extensive service network and advanced digital infrastructure. Nevertheless, maintaining market leadership requires continuous technological modernization, improvement of customer-oriented approaches and expansion of value-added financial services for payroll clients.

Author Contribution Statement (CRediT Taxonomy): **A.W. Faye**z **Wazani:** Conceptualization (lead), Methodology, Investigation, Formal analysis, Writing – Original Draft. **Z.S. Gelmanova:** Supervision, Validation, Methodology, Writing – Review & Editing. **A.K. Nurgaliyeva:** Data curation, Visualization,

Investigation, Writing – Review & Editing. All authors have read and approved the final version of the manuscript and agree to be accountable for all aspects of the work.

Funding. This research received no external funding.

Acknowledgment. The authors would like to thank Karaganda Industrial University for providing academic and organizational support that contributed to this research. The authors also express their gratitude to colleagues and experts whose valuable discussions and professional recommendations helped improve the quality of 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] Guseva T.A. Bank Marketing: textbook. - M.: Yurait, 2022. - 345 p.
- [2] Mishchenko S.V. Salary project as a tool for managing corporate clients // Finance and credit. - 2021. - No. 8 (824). - P. 12–18. Khasanova A.S. Salary projects as an element of the strategy of attracting clients in a bank // Bank. Delo. - 2022. - No. 6. - P. 39-45.
- [4] Frolova E. A. Client base management in a bank. - St. Petersburg: Piter, 2020. - 288 p.
- [5] Rakhmetova Zh.B. Cross-selling tools in retail banking of Kazakhstan // Bulletin of KazNU. Series: Economy. - 2021. - No. 2 (140). - P. 79-83.
- [6] Stepanova I.N. Electronic banking technologies. - M.: Infra-M, 2023. - 310 p.
- [7] Ergeshev B.T. Optimization of wage calculations through banking products // Financial Bulletin. - 2020. - No. 3. - P. 22-27.
- [8] Ivanova E.M. Personnel loyalty and salary project: modern approaches // Personnel management. - 2022. - No. 5. - P. 45-50.
- [9] Halyk Bank. Annual report for 2023. —URL: <https://halykbank.kz/ru/about/annual-reports>
- [10] Davletova M.K. Digitalization of services in banks of the Republic of Kazakhstan: assessment and prospects // Finance of Kazakhstan. - 2023. - No. 1. - P. 18-24.
- [11] Nazarova K.K. Integration of banking solutions with accounting systems of enterprises // Modern technologies. - 2022. - No. 4. - P. 31-36.
- [12] Website of Halyk Bank JSC - URL: <https://halykbank.kz/ru/salary-project>
- [13] Deloitte. Global Payroll Survey 2023: Key Trends and Insights. URL: <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/tax/articles/global-payroll-trends.html>
- [14] PwC. Payroll Outsourcing & Digitalization in the EU.-2022.-URL: <https://www.pwc.pl/en/publications/payroll-digitalization.html>
- [15] World Bank. Digital Financial Services: Enabling the future of payments. 2021. - URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/financialinclusion/brief/digital-financial-services>

ECONOMICS. GENERAL EDUCATION, SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES, AND FUNDAMENTAL DISCIPLINES

DOI <https://www.doi.org/10.53002/079>

RISK-ORIENTED APPROACH TO INVENTORY MANAGEMENT OF A PROCESSING ENTERPRISE: FROM ACCOUNTING TO STRATEGIC DECISIONS (ON THE EXAMPLE OF «QARMET LLC RECYCLING »)

** Gelmanova Z S., Latypova M.A., Volokitina I.E., Fayeze Wazani, I.A. Davletshin A.W.*

Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

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

Author information:

Gelmanova Z S - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: zoyakgiu@mail.ru

Latypova M.A. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: m.latypova@tttu.edu.kz

Volokitina I.E. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: irinka.vav@mail.ru

Fayeze Wazani, I.A. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz

Davletshin A.W. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: front_office@tttu.edu.kz

Abstract. In the context of increased instability of the market environment and increasing requirements for international reporting, the need to implement risk-oriented approaches to inventory management at processing enterprises is becoming more urgent. The need for a transition from traditional accounting to integrated inventory management based on IFRS principles, BI analytics and process automation is substantiated. The developed model takes into account internal and external risks, covering aspects of logistics, IT infrastructure, personnel and strategy. SWOT analysis, ABC analysis and visualization of flows based on Power BI became the basis for the implementation of a system aimed at reducing losses and enhancing strategic transparency. The object of the study is the inventory management system of «Qarmet LLC Recycling». The purpose of the work is to develop and test a model of risk-oriented inventory management (ROIMM), integrating IFRS (IAS 2) tools, ABC analysis, P × I risk assessment and digitalization elements. The methodological base includes methods of comparative analysis, visual modeling, factor classification of risks and strategic interpretation. The scientific novelty lies in the proposal of a structured model of ROUTMZ, which ensures the transition from accounting to a strategically sustainable inventory management system based on risks. The practical significance is manifested in the possibility of adapting the model to the specific conditions of processing enterprises in order to improve the accuracy of management decisions, reduce losses and ensure compliance with international reporting standards. The results of the study include a visualized model, a risk matrix and a SWOT analysis. The conclusion presents recommendations for digitalization and the implementation of automated inventory management systems as a tool for sustainable development.

Keywords: inventory management, risks, BI, SAP, 1C, automation, IFRS, ABC analysis, SWOT, processing enterprise.

ҚАЙТА ӨНДЕУШІ КӘСІПОРЫННЫҢ ТАУАРЛЫҚ-МАТЕРИАЛДЫҚ ҚОРЛАРЫН БАСҚАРУҒА ТӘУЕКЕЛГЕ БАҒДАРЛАНҒАН ТӘСІЛ: ЕСЕПТЕН СТРАТЕГИЯЛЫҚ ШЕШІМДЕРГЕ («QARMET RECYCLING» АҚ МЫСАЛЫНДА)

** Гельманова З.С., Латыпова М.А., Волокитина И.Е., Файез Вазани А.В., Давлетшин И.А.*

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

**Corresponding author e-mail: (E-mail: zoyakgiu@mail.ru)*

Авторлар туралы ақпарат:

Гельманова З.С. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: zoyakgiu@mail.ru

Латыпова М.А. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: m.latypova@tttu.edu.kz

Файез Вазани А.В. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz

Давлетшин И.А. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: front_office@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Қайта өндеуші кәсіпорынның тауарлық-материалдық қорларын басқаруға тәуекелге бағдарланған тәсіл: есептен стратегиялық шешімдерге ("qarmet recycling" ЖШС мысалында) Нарықтық ортаның жоғары

тұрақсыздығы және халықаралық есептілікке қойылатын талаптардың күшеюі жағдайында қайта өңдеу кәсіпорындарында тауарлық-материалдық қорларды (ТМК) басқаруға тәуекелге бағдарланған тәсілдерді енгізу қажеттілігі өзектендіріледі. Дәстүрлі есептен ҚЕХС қағидаттарына, ВІ-аналитикаға және процестерді автоматтандыруға негізделген қорларды интеграциялық басқаруға көшу қажеттілігі негізделген. Өзірленген модель логистика, АТ инфрақұрылымы, персонал және стратегия аспектілерін қамтитын ішкі және сыртқы тәуекелдерді ескереді. Swot талдауы, ABC талдауы және Power ВІ негізіндегі ағындарды визуализациялау шығындарды азайтуға және стратегиялық ашықтықты арттыруға бағытталған жүйені жүзеге асыруға негіз болды. Зерттеу нысаны «Qarmet Recycling» ЖШС қорларын басқару жүйесі болып табылады. Жұмыстың мақсаты ҚЕХС (IAS 2), ABC-талдау, Р×І-тәуекелдерді бағалау және цифрландыру элементтерін біріктіретін ТМК (ROUTMZ) тәуекелге бағдарланған басқару моделін әзірлеу және сынақтан өткізу болып табылады. Әдіснамалық база ретінде салыстырмалы талдау, визуалды модельдеу, тәуекелдерді факторлық жіктеу және стратегиялық түсіндіру әдістері қолданылды. Ғылыми жаңалық-тәуекелдерге сүйене отырып, бухгалтерлік есептен стратегиялық тұрақты қорларды басқару жүйесіне көшуді қамтамасыз ететін ROUTMZ құрылымдық моделін ұсыну. Практикалық маңыздылығы басқару шешімдерінің дәлдігін арттыру, шығындарды азайту және халықаралық есеп беру стандарттарына сәйкестігін қамтамасыз ету мақсатында қайта өңдеу кәсіпорындарының нақты жағдайларына модельді бейімдеу мүмкіндігінде көрінеді. Зерттеу нәтижелеріне бейнеленген модель, тәуекел матрицасы және SWOT талдауы кіреді. Қорытындыда тұрақты даму құралы ретінде қорларды басқарудың автоматтандырылған жүйелерін цифрландыру және енгізу бойынша ұсыныстар берілген.

Түйінді сөздер: түгендеуді басқару, тәуекелдер, ВІ, SAP, ІС, автоматтандыру, ХҚЕС, ABC-талдау, SWOT, қайта өңдеу кәсіпорны.

РИСКО - ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ТОВАРНО-МАТЕРИАЛЬНЫМИ ЗАПАСАМИ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ: ОТ УЧЕТА К СТРАТЕГИЧЕСКИМ РЕШЕНИЯМ (НА ПРИМЕРЕ АО «QARMET RECYCLING»)

**Гельманова З.С., Латыпова М.А., Волокитина И.Е., Файез Вазани А.В., Давлетшин И.А.*

Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

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

Информация об авторах:

Гельманова З.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: zoyakgiu@mail.ru

Латыпова М.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: m.latypova@tttu.edu.kz

Файез Вазани А.В. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz

Давлетшин И.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: front_office@tttu.edu.kz

Аннотация. В условиях повышенной нестабильности рыночной среды и усиливающихся требований к международной отчётности актуализируется необходимость внедрения риск-ориентированных подходов к управлению товарно-материальными запасами (ТМЗ) на перерабатывающих предприятиях. Обоснована необходимость перехода от традиционного учета к интеграционному управлению запасами, основанному на принципах МСФО, ВІ-аналитике и автоматизации процессов. Разработанная модель учитывает внутренние и внешние риски, охватывая аспекты логистики, ИТ-инфраструктуры, персонала и стратегии. SWOT-анализ, ABC-анализ и визуализация потоков на базе Power ВІ стали основой для реализации системы, направленной на сокращение потерь и усиление стратегической прозрачности. Объектом исследования выступает система управления запасами ТОО «Qarmet Recycling». Цель работы заключается в разработке и апробации модели риск-ориентированного управления ТМЗ (ROUTMZ), интегрирующей инструменты МСФО (IAS 2), ABC-анализа, Р×І-оценки рисков и элементов цифровизации. В качестве методологической базы использованы методы сравнительного анализа, визуального моделирования, факторной классификации рисков и стратегической интерпретации.

Научная новизна заключается в предложении структурированной модели ROUTMZ, обеспечивающей переход от учета к стратегически устойчивой системе управления запасами с опорой на риски. Практическая значимость проявляется в возможности адаптации модели под конкретные условия перерабатывающих предприятий с целью повышения точности управленческих решений, снижения потерь и обеспечения соответствия международным стандартам отчётности. Результаты исследования включают визуализированную модель, матрицу рисков и SWOT-анализ. В заключении представлены рекомендации по цифровизации и внедрению автоматизированных систем управления запасами как инструмента устойчивого развития.

Ключевые слова: управление запасами, риски, ВІ, SAP, ІС, автоматизация, МСФО, ABC-анализ, SWOT,

перерабатывающее предприятие

INTRODUCTION

Inventory management remains one of the most important functions of manufacturing and processing enterprises. In the context of digitalization and complexity of supply chains, the importance of integrating inventory accounting, forecasting and analysis into a single decision-making system is increasing [1]. Using the example of Qarmet Recycling LLC, the authors consider the possibility of transforming the traditional approach to inventory management towards a risk-oriented model based on IFRS standards (IAS 2), SAP tools, 1C, Power BI and a system of key performance indicators (KPI).

METHODOLOGY

The methodological basis of the study includes an analysis of document flow and accounting policies of Qarmet LLC Recycling »; identification and

classification of risks (internal and external); SWOT analysis of the current inventory management system; ABC analysis of inventory by importance; construction of a risk matrix ($P \times I$); visualization of logistics flows in Power BI; calculation of economic effects of automation implementation.

RESULTS

The SWOT analysis revealed the strengths and weaknesses of the internal environment, as well as external opportunities and threats to the development of the inventory management system (Table 1). The results of the ABC analysis (Table 2) indicated the need for strict control over category A stocks , which form the largest part of the cost. Table 3 shows the $P \times I$ risk matrix, demonstrating priority areas of risk management.

Table 2

SWOT analysis of inventory management in «Qarmet» LLP Recycling»:

Strong sides	Weaknesses
Access to stable supplies Experienced staff Availability of basic automation (1C)	Lack of predictive analytics Fragmented accounting Manual errors
Possibilities	Threats
BI and Power BI WMS / ERP implementation Automation of logistics	Price fluctuations Logistical disruptions Obsolete technologies

The enterprise has stable supplies of secondary raw materials, which reduces dependence on external market conditions. Qualified personnel and basic automation elements in 1C allow maintaining a minimum level of accounting and internal control. This creates the foundation for the implementation of more complex inventory management systems.

Among the internal limitations, the most critical are: the absence of a forecasting module, weak integration between accounting and warehouse accounting, and limited storage capacity. These factors increase operational risks and reduce data transparency, especially in the context of dynamic receipt and disposal of inventory items.

The external and internal environment opens up prospects for the enterprise to implement ERP/WMS systems, apply ABC/XYZ analysis, and gradually transition to IFRS accounting. These steps will allow the enterprise to reach a new level of controllability, automate key business processes, and increase inventory turnover. In addition, opportunities for staff training and warehouse digitalization allow for the rapid implementation of the potential for change [2].

External threats include: rising raw material prices, fluctuations in demand, disruptions in logistics, and the likelihood of errors due to

equipment wear and tear or human error. These threats require the development of a predictive analysis and risk management system. The analysis showed that the company's strengths ensure sustainability, but realizing strategic opportunities is the key to reducing vulnerability to threats. Weaknesses need to be neutralized by moving from accounting to analytics and automation; implementing a risk monitoring and assessment system; and training personnel to work in a digital environment.

The SWOT analysis confirmed the feasibility of moving to risk-oriented inventory management as a direction capable of combining the internal resources and external capabilities of the enterprise.

The conducted SWOT analysis revealed not only the current state of the inventory management system at the enterprise, but also outlined the vector of strategic development in the context of increasing operational and market risks [3,4].

Strengths, such as stable supplies of secondary raw materials and the availability of experienced personnel, create a sustainable basis for transformation. However, weaknesses - fragmented accounting, lack of forecasting mechanisms, ineffective logistics - increase the need for systemic

modernization [5]. The analysis clearly indicates the need to switch to inventory management in accordance with IFRS (IAS 2), which will ensure transparency, validity and comparability of financial data [2]. In the context of increasing external threats - price fluctuations, logistics failures, inventory depreciation - the model of risk -oriented inventory management (ROIMM), developed in this study, becomes especially relevant [6-8]. It offers a systematic sequence of actions from risk identification to the use of optimization tools (ABC / XYZ, FIFO, integration with IFRS).

Thus, the SWOT analysis sets the trajectory of the transition from traditional accounting to strategic management: accounting according to international standards (IFRS) [2], automation (ACS) [9] and the structural implementation of the ROUTMZ model become a logical and necessary development of the practice of Qarmet LLC Recycling ».

Digitalization opportunities also involve the implementation of an automated control system (ACS), including ERP/WMS platforms capable of providing: operational inventory control; turnover calculation; integration with accounting and logistics [9]. It is this comprehensive approach proposed in the article that will allow Qarmet Recycling LLP to ensure sustainability, cost efficiency and international comparability of data in the field of inventory management. The SWOT analysis clearly indicates the need to transition to inventory management in accordance with the requirements of IFRS (IAS 2) , which will ensure uniformity and reliability of financial information; recognition of inventory impairment; objective assessment of cost [2]

IFRS (IAS) 2 "Inventories" regulates the accounting of inventories, including raw materials, work in progress and finished goods. In the context of Qarmet LLC Recycling ", this standard is especially relevant for the valuation of secondary materials, scrap metal and process raw materials. The main provisions of the standard include: cost or net realizable value; cost valuation methods: FIFO and average cost method; purchase price, transportation costs, processing and other costs directly related to

the acquisition of inventory; inventory that has lost value is subject to impairment and write-off [2].

Qarmet LLC Recycling " it is recommended to implement a control system that complies with IFRS, taking into account the following measures: maintaining analytical records by batches and write-off methods (for example, FIFO); conducting regular revaluation of inventories for impairment; maintaining a uniform policy for accounting for inventories in financial and management reporting.

Digitalization of logistics and accounting processes requires the implementation of automated control systems (ACS) based on ERP / WMS, which allow tracking turnover, conducting inventory in real time and managing purchases [9]. To improve the efficiency of inventory

management and reduce risks, it is advisable to implement an integrated ERP system with a warehouse management module (WMS), supporting the functions of forecasting, analytics and inventory planning.

Key steps in implementing automation: assessment of the current level of accounting and logistics (process audit); selection of a platform: 1C ERP, SAP Business One, Odoo And etc.; pilot launch in a raw materials warehouse; integration with accounting and production; staff training and transition to regular inventory analytics.

Automation will allow tracking inventory turnover, identifying "dead" stock, automatically generating requests and minimizing the human factor. This will also improve compliance with international accounting standards and increase the transparency of reporting [2].

Rising costs, instability of raw material prices and high dependence on the human factor increase the need for a systematic approach to inventory management. In these conditions, it becomes critically important to implement a risk -oriented management model that allows identifying key vulnerabilities; managing risks proactively rather than reactively; combining financial standards and logistical efficiency [5-10].

Table 2

ABC analysis by volume of warehouse stocks:

Category	Share reserves, %	Comment
A	20%	Critical stocks are subject to daily monitoring.
B	30%	Medium turnover, weekly control
C	50%	Rarely used, can be written off

Table 2 illustrates the results of ABC classification of inventories at a processing plant. Distribution into categories A, B and C is based on the Pareto principle (80/20) and reflects the specific weight of each group in the total volume of

inventories.

Category A (20%) — the most valuable and critical items that ensure key production processes. Despite their small number, they form the largest part of the inventory value. They require daily monitoring,

timely replenishment and enhanced risk control (delivery failures, spoilage, shortages).

Category B (30%) — goods with medium turnover. They represent moderate value and are used regularly.

Weekly monitoring using BI dashboards and demand forecasting algorithms is sufficient for them.

Category C (50%) — the least valuable and rarely used items. Despite their quantitative dominance, they form the smallest part of the total inventory value. They are often characterized by low turnover and a high proportion of hanging balances subject to inventory, optimization or write-off.

This distribution allows the management to focus resources and attention on category A, minimizing the management load on less significant categories. Within the ROUTMZ model, ABC analysis is used as a basis for a differentiated risk management and cost control strategy.

Analysis of the inventory structure using the

ABC analysis is used as a basis for a differentiated risk management and cost control strategy.

Analysis of the inventory structure using the ABC method allows you to rank the nomenclature by level of importance and focus control on the most resource-intensive items (group A).

However, even high turnover and importance of inventory do not exclude the presence of significant risks, especially in conditions of limited accounting transparency, unstable supplies and imperfect automation.

It is at this stage that the need for a risk-oriented decomposition of the inventory management system arises, where ABC analysis serves only as a basis for subsequent in-depth control. To implement strategic inventory management, an analysis of key risks was conducted (Table 3), including their probabilistic assessment and the level of impact on the operating activities of the enterprise.

Table 3

P × I risk matrix:

Risk	Probability (P)	Influence (I)	Level risk (P×I)	Grade
Incorrect inventory accounting	Tall	High	9	Critical
Logistics disruptions	Average	High	6	Essential
Impairment stocks	Average	Average	4	Moderate
Damage at storage	Low	Average	2	Acceptable

Thus, the results of the ABC analysis, supplemented by the identification of key risks (Table 3), demonstrate the need to integrate a differentiated approach to inventory management with risk assessment and minimization mechanisms.

In response to the identified threats and with the aim of increasing the sustainability of the supply and accounting system, a model of risk-oriented inventory management was developed.

Risk-based inventory management model (ROIMM) is an integrated approach that combines the principles of IFRS (IAS 2), risk classification, business analytics tools (Power BI), accounting automation (1C, SAP) and the KPI system. It is built on the basis of identified risks and is aimed at minimizing losses, increasing accounting accuracy, accelerating turnover and reducing the level of frozen balances.

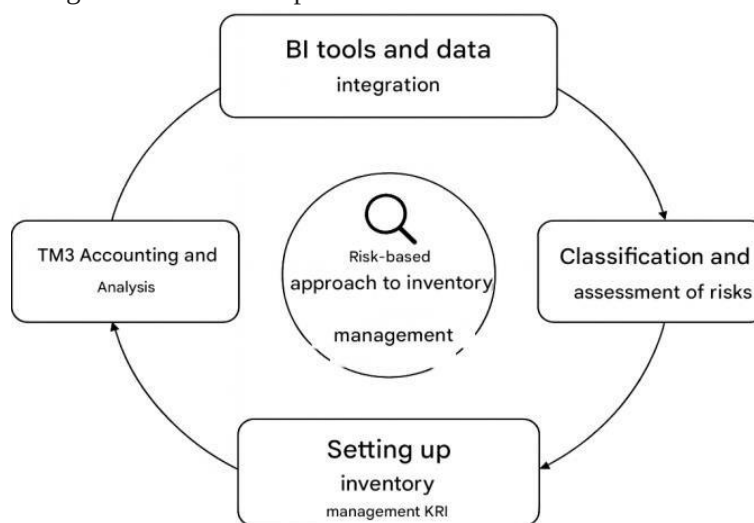


Figure 1- Model of risk-oriented approach to inventory management

Components of the ROUTMZ model:

1. Identification of risks by $P \times I$ (probability $\times$ impact).
2. Classification of stocks according to ABC and criticality.
3. Linking to KPI: turnover, forecast accuracy, loss rate.
4. Integration with 1C/SAP + visualization in Power BI.
5. Development of scenario strategies by risk levels (from critical to acceptable)

Unlike the traditional approach, the ROUTMZ model allows you to build flexible and manageable processes not only for accounting, but also for responding to changes in the external and internal environment. For example, when logistics risks increase, the system automatically initiates a transition to safe procurement and stock distribution scenarios, which allows you to avoid depreciation. Thus, ROUTMZ combines accounting, analytics and risk management into a single strategic system.

The model is implemented in the form of a closed cycle, reflecting the systemic and continuous nature of inventory management taking into account risks.

We present a structured interpretation of the functional purpose of each of the key components of the model, ensuring its integrity and practical applicability in the context of risk-oriented inventory management. These components critically affect the implementation of the inventory management strategy taking into account risks: Risk identification ($P \times I$)

Purpose: the initial stage, during which potential threats in accounting, logistics, storage, and automation are analyzed.

Tools: expert assessment, risk matrix.

Result: prioritization of risks by levels: critical, significant, moderate, acceptable.

2. Classification of stocks (ABC analysis + criticality)

Purpose: structuring inventory items by level of importance and frequency of use. Tools: ABC analysis, XYZ analysis.

Result: allocation of category A stocks and high/low critical items for targeted monitoring.

3. KPIs and risk indicators

Purpose: To establish measurable metrics for inventory management and monitoring.

Examples of KPIs: turnover ratio, write-off level, forecast accuracy, time of deviation from storage standards.

Result: possibility of surgical intervention in case of negative dynamics.

4. Integration with accounting systems (1C, SAP)

Purpose: automation of reflection of inventory movement, reconciliation of balances, generation of analytics.

Result: reduction of the human factor, up-to-date data in real time.

5. Visualization and analytics (Power BI, Dashboard)

Purpose: visual representation of the dynamics of inventory and risks, identification of bottlenecks.

Tools: dashboards, heat maps, trend charts.

Result: support for data-driven management decision making management).

6. Scenario planning (anti-crisis strategies)

Purpose: preparation of actions in case of risks realization.

Examples: doubling safety stock, switching suppliers, consolidating logistics. Result: reduced vulnerability and increased resilience of the supply chain.

The ROUTMZ model combines the principles of risk management, logistics, digital accounting and BI analytics. It serves as a strategic tool for increasing the sustainability, transparency and efficiency of inventory management at a processing plant.

DISCUSSION

Integration of inventory accounting with SAP, 1C and BI platforms allows achieving a new level of analytical maturity that meets the requirements of IFRS (IAS 2) [11]. The risks identified during the analysis require automation of control over turnover, spoilage and suspended balances. The developed ROUTMZ model forms the basis for management based on the principle of predictive analytics and scenario planning [12, 13]. Previously, the problems of accounting fragmentation were described; this article proposes a systemic solution with an emphasis on risk monitoring and strategic positioning. The ROUTMZ model presented in this study demonstrates the possibility of coupling accounting standards and risk control at the level of BI and scenario policies.

CONCLUSION

The proposed model of risk-oriented inventory management (ROIMM), developed on the example of Qarmet Recycling LLC, is an integration tool that combines approaches of international standards (IFRS, IAS 2), digital transformation of accounting (SAP, 1C, Power BI), scenario planning and risk assessment. It ensures the transition from the traditional accounting function to a strategically sustainable management system focused on minimizing losses, optimizing logistics operations and ensuring management transparency.

The practical implementation of the model helps to reduce losses from spoilage, shortages and excess balances by 15–25% (due to the introduction of ABC control and KPI monitoring) [11, 12]; reduce the

average storage time of category C stocks by 30–40% (through automated analytics and a strategy for reducing rarely used items); increase the accuracy of procurement forecasts by up to 90% when using BI tools and integration with 1C/SAP ; reduce the time for preparing management reports from 5 days to 1 day (due to dashboards) Power BI); strengthening compliance with the IAS 2 (IFRS) standard - through automatic reporting and transparent cost calculation

[13]. These data were obtained from a summary of foreign practice and analytical data, with subsequent adaptation to the conditions of the enterprise.

Thus, ROUTMZ transforms the approach to inventory management at a processing plant towards sustainability, digitalization and flexibility, which is especially relevant in the context of an unstable external environment and ESG reporting requirements.

REFERENCES

- [1] Savitskaya G.V. Analysis of economic activity of the enterprise. - Minsk: New knowledge, 2022. – 688 p.
- [2] IFRS (IAS) 2 "Inventories". International Financial Reporting Standards.
- [3] Zhukova A.V. Accounting and audit of inventories at industrial enterprises. - M.: Yurait, 2023. – 412 p.
- [4] Alimbekova D.A Features of inventory management in the processing industry of Kazakhstan// Economy and Industry of Kazakhstan. – 2023. – No. 4. – P. 61-6
- [5] Smagulov E.B., Toktaev A.U. Management of logistics risks at industrial enterprises // Bulletin of KazNITU. - 2022. - No. 5 (165). - P. 55-60.
- [6] ISO 31000:2018 Risk Management - Guidelines.
- [7] Gelmanova Z.S., Lisiecka K. Identification and actions regarding key risks in the company's activities // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2017. No. 1-1. P. 114.
- [8] Gelmanova Z.S., Petrovskaya A.S., Batyrbek A.E., Fayez Vazani A.V. RISK – management/ Study guide. - Almaty: ADAL. KITAP, 2024.-202s.
- [9] Kozlova N.V. Inventory management using automated systems // Management and business administration. - 2023. - No. 2. - P. 44-49.
- [10] Gelmanova Z.S. Organization of vocational training in production // International Journal of Experimental Education. 2016. No. 8. P. 17-21.
- [11] Nair A., Narasimhan R. (2021). Strategic inventory risk management in global supply chains: A review and future directions. International Journal of Production Research, 59 (13), 3984–4005. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1818185>
- [12] Fu X., Zhang D. (2023). Digital transformation and risk management in inventory control: Evidence from the recycling sector. Journal of Cleaner Production, 395, 136506. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136506>.
- [13] Shamsuzzoha A., Helo P. (2022). Managing risks in inventory control under uncertainty: A data-driven approach. Procedia Computer Science, 200, P.1228–1236.

ECONOMICS. GENERAL EDUCATION, SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES, AND FUNDAMENTAL DISCIPLINES

DOI <https://www.doi.org/10.53002/080>

CHALLENGES AND PROSPECTS OF INTERCULTURAL COMMUNICATION IN THE PROFESSIONAL ENVIRONMENT: HOW TO AVOID THE TOWER OF BABEL EFFECT

Gelmanova Z.S., Wazani A.W.F.

Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

**Corresponding author e-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz*

Author information:

Gelmanova Z.S. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: zoyakgiu@mail.ru

Wazani A.W.F. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz

Annotation. In the context of globalization, digitalization, and the growth of multicultural teams, intercultural communication is becoming crucial for the sustainable development of the professional environment. Effective interaction between representatives of different cultures is becoming a critical factor in the success of organizations in the 21st century. However, differences in the interpretation of meanings, communication styles, and management approaches can lead to misunderstandings and conflicts, creating the "Tower of Babel effect." This article provides a systemic analysis of the challenges of intercultural communication in the professional environment, drawing on theoretical models and Kazakhstani practice. Kazakhstan is considered a unique example of post-Soviet multicultural transformation. The authors identify typical barriers to intercultural communication, as well as successful corporate cases demonstrating ways to overcome them. Recommendations are formulated for developing intercultural competence, institutionalizing mediation practices, and adapting corporate culture to a multiethnic and digital environment. The article is intended for researchers, HR specialists, managers, and consultants working in culturally diverse environments.

Keywords: intercultural communication, Tower of Babel effect, professional environment, Kazakhstan, multiculturalism, communication barriers.

КӘСІБИ ОРТАДАҒЫ МӘДЕНИЕТАРАЛЫҚ БАЙЛАНЫСТЫҢ ҚИЫНДЫҚТАРЫ МЕН БОЛАШАҒЫ: БАБЕЛ ЭФФЕКТ МҰНАРАСЫНАН ҚАЛАЙ ҚАЛУҒА БОЛАДЫ

Гельманова З.С., Вазани А.В.Ф.

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

**Корреспондент автор e-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Гельманова З.С. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: zoyakgiu@mail.ru

Вазани А.В.Ф. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Жаһандану, цифрландыру және көпмәдениетті ұжымдардың өсуі жағдайында мәдениетаралық коммуникация кәсіби ортаның тұрақты дамуы үшін шешуші мәнге ие болып отыр. Өртүрлі мәдениет өкілдерінің тиімді өзара әрекеттесуі 21 ғасырдағы ұйымдар табысының шешуші факторына айналууда. Дегенмен, мағыналарды түсіндірудегі, қарым-қатынас стиліндегі және басқару тәсілдеріндегі айырмашылықтар түсінбеушілік пен қақтығыстарға әкеліп, «Вавилон мұнарасының әсерін» тудыруы мүмкін. Бұл мақалада теориялық үлгілер мен қазақстандық тәжірибеге сүйене отырып, кәсіби ортадағы мәдениетаралық коммуникация мәселелеріне жүйелі талдау жасалған. Қазақстан посткеңестік көпмәдениетті трансформацияның бірегей үлгісі болып саналады. Авторлар мәдениетаралық қарым-қатынастағы типтік кедергілерді, сондай-ақ оларды жеңу жолдарын көрсететін табысты корпоративтік жағдайларды анықтайды. Ұсыныстар мәдениетаралық құзыреттілікті дамыту, медиация тәжірибесін институттандыру және корпоративтік мәдениетті полиэтникалық және цифрлық ортаға бейімдеу бойынша тұжырымдалған. Мақала өртүрлі мәдени орталарда жұмыс істейтін зерттеушілерге, HR мамандарына, менеджерлерге және кеңесшілерге арналған.

Түйін сөздер: мәдениетаралық коммуникация, Бабель мұнарасы эффектісі, кәсіби орта, Қазақстан, мультикультурализм, коммуникациялық кедергілер.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕЖКУЛЬТУРНОЙ КОММУНИКАЦИИ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ СРЕДЕ: КАК ИЗБЕЖАТЬ ЭФФЕКТА ВАВИЛОНСКОЙ БАШНИ

Гельманова З.С., Вазани А.В.Ф.

Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Гельманова З.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: zoyakgiu@mail.ru

Вазани А.В.Ф. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: w.f.wazine@tttu.edu.kz

Аннотация. В условиях глобализации, цифровизации и роста многокультурных коллективов межкультурная коммуникация становится критически важной для устойчивого развития профессиональной среды. Эффективное взаимодействие между представителями разных культур становится важнейшим фактором успеха организаций в XXI веке. Однако различия в интерпретации смыслов, стилях коммуникации и подходах к управлению могут приводить к недопониманию и конфликтам, создавая эффект «Вавилонской башни». В статье представлен системный анализ проблем межкультурной коммуникации в профессиональной среде с опорой на теоретические модели и казахстанскую практику. Казахстан рассматривается как уникальный пример постсоветской мультикультурной трансформации. Авторы выявляют типичные барьеры межкультурной коммуникации, а также приводят примеры успешных корпоративных кейсов, демонстрирующих способы их преодоления. Сформулированы рекомендации по развитию межкультурной компетентности, институционализации медиации и адаптации корпоративной культуры к многоэтнической и цифровой среде. Статья предназначена для исследователей, специалистов по управлению персоналом, менеджеров и консультантов, работающих в условиях многокультурного взаимодействия.

Ключевые слова: межкультурная коммуникация, эффект Вавилонской башни, профессиональная среда, Казахстан, мультикультурализм, коммуникативные барьеры.

INTRODUCTION

Intercultural communication in the professional environment has ceased to be a private matter of international cooperation and has become a fundamental factor for any modern organization. Global economic ties, labor mobility, the expansion of transnational corporations, and the rapid development of digital platforms are creating a space where employees, partners, and clients represent a wide range of cultural, ethnic, religious, and linguistic identities. This space not only expands the horizons of interaction but also creates new challenges in human capital management. One of the most metaphorically accurate images of intercultural failure is the "Tower of Babel effect"—a situation in which participants in a professional dialogue use the same words, terms, or formal procedures, but imbue them with different meanings. This leads to disrupted communication chains, reduced effectiveness of collective decisions, distorted perceptions of management messages, and, as a consequence, to the erosion of trust and the destruction of organizational culture.

The relevance of this research is heightened in the context of Kazakhstan, where multi-ethnicity and multi-religious diversity are not abstract characteristics but an everyday norm. Kazakhstan, as a multinational state, has developed unique mechanisms for cultural integration—from

institutional support for ethnocultural associations to promoting the principles of tolerance and linguistic balance. However, in the context of digitalization and the emergence of new forms of employment (remote, project-based, cross-border), traditional models of intercultural interaction are facing the need to adapt.

This study aims to systematically analyze the challenges and prospects of intercultural communication in the professional environment, focusing on the Kazakhstani experience. The focus is not only on identifying barriers but also on overcoming practices that ensure effective intercultural interaction, conflict prevention, and the transformation of cultural diversity into a source of innovative potential. The article draws on theoretical approaches in the field of intercultural communication, empirical case studies, and practical recommendations relevant to management practice.

Scientific novelty: The article reveals an integrated approach to managing intercultural communication as a factor in organizational sustainability and innovation, including digital tools, soft skills and cases of cross-cultural leadership [1].

Practical significance: The recommendations and tools proposed in the study can be used to develop programs for adapting foreign employees, training managers, and HR strategies in international companies and universities.

METHODS

The study utilized content analysis of scientific publications, comparative case studies of international companies, and elements of sociocultural modeling. Hofstede and Hall's models for interpreting cultural differences, as well as visualization tools, were applied. Case studies of companies implementing intercultural inclusivity policies were analyzed.

RESULTS

Understanding the nature of intercultural communication requires addressing a number of fundamental theoretical concepts that form the basis of modern approaches to analyzing professional interactions in a culturally diverse environment. The term "intercultural communication" encompasses not only linguistic interaction between representatives of different cultures, but also a broader set of cognitive, emotional, and behavioral processes mediated by differences in perceptions of reality, norms, and interpretations of meaning. One of the cornerstones of intercultural theory is the model of cultural dimensions of G. Hofstede [2]. The model includes 6 key parameters that determine the differences between national cultures: 1. Power distance: High distance: subordinates do not challenge their superiors' opinions (Russia, Mexico). Low distance: hierarchy is perceived as functional but not absolute (Denmark, Sweden).

2. Uncertainty Avoidance: High level: need instructions, rules (Greece, Portugal). Low level: flexibility, openness to risk (Singapore, USA).

3. Individualism and Collectivism: Individualism is a focus on personal achievement (USA, Canada). Collectivism is the priority of the group, family, team (China, India).

4. Masculinity and Femininity: "Masculine" cultures are focused on success and competition (Japan, Germany). "Feminine" cultures are focused on caring, quality of life, and compromise (Netherlands, Sweden).

5. Long-term and short-term orientation: Long-term – planning, persistence (China, Japan). Short-term – respect for traditions, fulfilling obligations here and now (USA, Russia).

6. Indulgence and restraint: Indulgence – it is allowed to enjoy life, show emotions (Mexico, Sweden). Restraint - social norms restrict behavior (Pakistan, Russia). This model helps HR managers, teachers, and team leaders take cultural differences into account when selecting personnel, organizing motivation, and building dialogue.

These dimensions allow us to formalize differences between national cultures and predict behavioral patterns within organizations. For

example, in cultures with high power distance (characteristic, for example, of several Central Asian countries), employees may avoid openly expressing disagreement, which hinders feedback generates latent conflicts. This approach is complemented by E. Hall's communication context model, which distinguishes between high-context and low-context cultures. [3].

High-context culture. Information is transmitted through context, nonverbal cues, intuition, and silence.

Communication is indirect and ambiguous.

Examples: Japan, China, Arab countries.

Low-context culture. Information is conveyed through words, directly and unambiguously. Clear structure and logic in speech. Examples: USA, Germany, Scandinavia. In a professional environment, it's important to understand how straightforward or veiled employees express their opinions. This impacts how they perceive criticism, present ideas, and provide feedback.

Also worthy of attention is the model of adaptation and cultural shock by Yu Kim, according to which entering a new cultural environment goes through the following stages: euphoria, frustration, adaptation, internal cultural enrichment [4].

This cycle is particularly relevant for the corporate environment in Kazakhstan, where more and more specialists are involved in transnational projects, rotations, and interactions with international consultants.

Trompenaars' model of national culture [5]. It consists of 7 dichotomies; the key ones are presented here: Universalism: following general rules. Particularism: making decisions based on the situation, "for one's own" – one's own rules. Individualism: every man for himself. Communitarianism: collective interests are important. In neutral cultures, emotions are suppressed (Great Britain, Germany). In emotional cultures, they are expressed openly (Italy, Brazil). Specificity: separation of the personal and professional. Diffusion: fusion of the business and personal. This model is particularly useful in situations of negotiations, partnerships and project management with international participants.

The presented SWOT analysis of intercultural communication models allowed us to identify their strengths and weaknesses, opportunities and threats (Table 1)

Table 1

SWOT analysis of intercultural communication models

Model	Strengths	Weaknesses	Possibilities	Threats
-------	-----------	------------	---------------	---------

G. Hofstede	A clear quantitative measurement system used in business	May lead to stereotyping and generalization	Application in HR, international management, risk assessment	May become outdated without updates and local adjustments
Edward Hall	The concept of context helps in interpreting hidden communications	Difficult to apply without cultural examples, abstract	Relevant for the development of instructions and training in international projects	It is difficult to measure effectiveness without digital support.
Yun Kim	Focus on adaptation processes is important for migratory environments	Less known in practice, difficult to quantitatively analyze	Development of adaptation programs, support for personnel relocation	The risks of ignoring cultural dynamics and individual differences
Fons Trompenaars	Broad coverage of cultural dimensions, applicable to management and negotiations	The model is cumbersome and requires extensive user training.	Used to develop leadership and emotional intelligence in MNCs	May cause training overload for staff

Model G. Hofstede's framework is particularly effective in corporate settings and HR management. Its strength lies in its quantitative measurement of culture, but its risk lies in its oversimplified interpretation of nations as homogeneous cultures. When implemented in the construction industry, it should be adapted to regional differences & individual characteristics [2].

Edward Hall's model is valuable for construction projects involving workers from East Asia, the Middle East, and Latin America, where communication is highly contextual. However, the model requires an experienced facilitator—it is difficult to implement without training [3].

The Yun Kim model. Focuses on behavioral adaptation and is useful when hiring migrants or sending specialists abroad. Suitable for HR and onboarding services. A drawback is its weak popularization in business [4]. **Trompenaars Model.** An excellent tool for managers working in a

multicultural environment. In construction, it's useful for project managers, contractors, and negotiators with foreign companies. Complexity: requires extensive preparation and can be overwhelming at the start of training [5].

Based on an analysis of the sources, five key barriers were identified: Linguistic: differences in terminology, accent, and language proficiency. Values: conflicting ideas about power, time, and responsibility. Nonverbal: gestures, communication distance, and eye contact. Cognitive: differences in information processing and logical thinking. Organizational: a lack of transparent corporate policies and inclusive standards. Each of these barriers has its own practical ways to overcome them: education, training, the use of digital solutions, the implementation of diversity ethics, and the creation of an adaptive environment. Barriers and methods for overcoming them in intercultural communication

Table 2

Barrier type	Description	Methods of overcoming
Non-verbal	Gestures, facial expressions and eye contact are interpreted differently	Teaching cultural codes and gestures
Cognitive	Other approaches to analysis, thinking, and decision making	Decision-making models that take into account cultural styles

Organizational	Opaque processes, hierarchical differences, lack of a common corporate culture	Creating an inclusive corporate culture, common rules and standards
----------------	--	---

Barriers and methods of overcoming them in intercultural communication

Contemporary research emphasizes the need to move away from binary "us versus them" models to the concept of intercultural competence as a cross-professional skill. In Dario's definition According to Pederson, diversity is the ability to interact effectively and appropriately with people from other cultures based on respect, empathy, and awareness. Developing such competence requires not only theoretical knowledge but also experience, reflection, and organizational support (training, mentoring, and institutionalization of diversity) [6].

Thus, the theoretical landscape of intercultural communication defines a whole range of parameters that allow us to diagnose, predict, and manage interactions in multicultural teams. It's important to understand that cultural differences are not limited to differences in languages or customs—they permeate the entire field of professional communication, from understanding tasks and priorities to the ethics of interaction, evaluating effectiveness, and interpreting success.

The Tower of Babel metaphor, which derives from the biblical narrative of the collapse of a unified project due to the confusion of languages and the loss of mutual understanding, remains a remarkably accurate symbol of the challenges organizations face in cross-cultural interactions. In professional settings, this effect takes on a variety of forms, often unconscious to those involved, making it particularly dangerous.

The first level of the effect is literal: discrepancies in linguistic interpretation. Even when using the same language (for example, Russian or English as a corporate lingua franca), there are instances of differences in the meaning of the same terms. For example, the expression "send as soon as possible" can be interpreted differently: as "today," "this week," or even "within a month," depending on the national or professional context.

An example from Kazakhstani practice: in one of the branches of a large company with the participation of foreign contractors, Kazakhstani specialists used the abbreviation "DO" in documents (meaning "cooperation agreement"), while their Uzbek partners interpreted it as "job description," which led to an error in the approval process.

The second level of the Tower of Babel effect is the difference in the interpretation of goals, roles, and responsibilities. Representatives of Western cultures tend to prioritize clearly delineated competencies and expect that task assignments will be accompanied by specific KPIs. Meanwhile, in cultures with

collectivist attitudes (including Kazakhstan), social cues, relationships, and the context in which tasks are set are important. For example, a misunderstanding arose in a project team working in Atyrau with a Dutch contractor: the European manager expected the engineer to develop a solution independently, while the Kazakhstani specialist expected the initiative to come from management. As a result, the deadline was missed, and both sides accused each other of inaction.

A dangerous form of intercultural disruption is symbolic conflict, in which one party's behavior is perceived as disrespectful or offensive. For example, the direct style of criticism accepted in some Western companies can be perceived as rude in Kazakhstani and Kyrgyz professional cultures, where respectful feedback is valued.

Holidays, gender roles, hierarchy, and religious considerations can also be sources of misunderstanding. Ignoring a national holiday (such as Nauryz) in an international team can be perceived as cultural insensitivity, even if it formally does not violate regulations. Modern digital channels, especially messaging apps, Zoom, and corporate platforms (e.g., Microsoft Teams), exacerbate the Tower of Babel effect. The lack of nonverbal cues and differences in digital etiquette (e.g., "camera off," "no emojis," "stiff style") become open to interpretation.

In one company in Kazakhstan, a young employee did not use emojis in correspondence with a German manager, which the latter perceived as coldness and disinterest, while in the employee's corporate culture it was considered inappropriate to embellish business communication with excessive emotionality [7,8].

If the phenomenon of intercultural biases is ignored, they begin to influence key aspects of organizational activities: the speed and quality of decision-making decreases; hidden conflicts and staff turnover arise; is disrupted (especially in cross-functional teams); the employer brand in the international market is deteriorating. Thus, the Tower of Babel effect is not an abstract threat, but a very specific management problem that requires a systemic approach. In Kazakhstan's multicultural environment, its manifestations are particularly multilayered and depend not only on ethnocultural differences but also on generational, territorial, and linguistic characteristics.

Kazakhstan represents a unique model of interethnic coexistence, combining an institutionalized policy of national unity with genuine

cultural diversity in organizations. More than 130 ethnic groups, a multilingual environment, the presence of formalized bodies for strengthening interethnic harmony (such as the Assembly of the People of Kazakhstan), and the relatively peaceful nature of ethnic and religious interaction make the country an important case study for analyzing intercultural communication practices.

However, at the professional level, cultural diversity often acts not as a resource but as a hidden challenge.

Intercultural differences manifest themselves at three levels: linguistic, behavioral, and value-symbolic.

Despite the formal equality of languages, Russian remains the dominant language in business communication in most Kazakhstani companies. At the same time, there has been a steady increase in the number of Kazakh-speaking employees, especially in the regions, as well as an increase in the proportion of young professionals educated in the state language.

As a result, a linguistic asymmetry arises, in which management documents (instructions, regulations, orders) are mainly developed in Russian, oral communication (in particular, informal) is increasingly switching to Kazakh, digital tools (ERP, HRM systems) do not always have the correct Kazakh localization, Middle managers have difficulty translating regulatory language.

Example: in one department of a large metallurgical company, management prepared regulations in Russian, while line workers spoke Kazakh. The lack of adequate translation led to disorientation and safety violations, necessitating an urgent revision of the documentation and the introduction of oral instructions.

Within a single organization, different communication styles may coexist, due not only to ethnic differences, but also to regional, generational, and religious characteristics. For example: Kazakh employees of the older generation are often oriented towards respect for hierarchy, evasive forms of expressing disagreement and high importance of relationships, Russian-speaking specialists tend to present information more directly and rationally, Young people who have completed international programs (Bolashak and others) demonstrate a hybrid style that combines global norms with local codes. This diversification requires special skills from HR specialists, team leaders, and managers: from the ability to read non-verbal cues to the ability to create a common semantic field in a diverse team.

Some large organizations in Kazakhstan have made attempts to formalize and develop intercultural competence at the corporate level [7,8].

JSC KazMunayGas: introduction of cross-

cultural training communications for employees working with foreign contractors, translation of safety standards into three languages: Kazakh,

Russian and English, Formation of feedback groups in multicultural teams.

Nazarbayev University: creation of a bilingual academic environment (EN/KZ), Mandatory cultural sensitivity training for faculty and administrative staff, Inclusive policy when hiring employees from different countries and regions of Kazakhstan.

The Kazakhstan case demonstrates that with proper institutionalization, respect for differences, and flexible management, interculturality ceases to be a barrier and becomes a resource. This approach allows for the expansion of team creativity through a diversity of perspectives; build trust and reduce employee turnover; to form a positive image of the employer in a competitive labor market; develop localized forms of leadership and management adapted to the Kazakhstani context.

Thus, Kazakhstan's experience suggests the possibility of building an organizational model of intercultural resilience, in which the values of diversity are integrated into management practices, communication procedures, and corporate culture.

However, the challenge remains: the transition from declarative multiculturalism to genuine inclusion in everyday professional practice.

Digital transformation, which has permeated all areas of professional life, has radically altered the nature of communication within organizations. On the one hand, it has provided unique tools for overcoming physical, temporal, and linguistic barriers—from online translators to asynchronous collaboration platforms. On the other hand, the digital environment has created new risks, exacerbating the "Tower of Babel effect" in multilingual and multicultural teams.

One of the key consequences of digitalization has been the shift toward asynchronous communication: email, corporate messaging apps (WhatsApp, Telegram, Teams, Slack), and internal portals have replaced face-to-face communication. As a result, a gap arises between the sender's intent and the recipient's perception, especially when they come from different cultures with varying sensitivity to context.

In low-context cultures (for example, among expats from Germany or the Netherlands), the lack of an immediate response by email may be perceived as ignoring, whereas in Kazakhstani practice, a pause in communication may be due to hierarchical subordination or the expectation of approval from above.

Digital tools actively use automatic translation, emoji, templates, and visual codes, which are not always universal. For example, in English-language

correspondence, "no" is interpreted as a neutral gesture of agreement, but in Eastern European and Asian contexts, it can be perceived as a formal refusal to continue the dialogue. Google Translate often translates from Kazakh to Russian with distorted business terms (e.g., " еңбек шартын бұзы » → «to terminate an agreement», but in the context of personnel records management it is more correct to say «termination of an employment contract»).

Particularly dangerous is the opacity of symbolic meanings: avatars, stickers, email signatures, and the use of informal tones all become sources of frustration and misunderstanding in cross-cultural correspondence.

The development of digital platforms has revealed a new type of cultural divide—one rooted in differences in digital literacy, interaction habits, and access to technology. In Kazakhstan's professional environment, this is particularly evident in the gap between: generation 50+ and young digital-native employees; employees of capital offices and workers in regions where the Internet is limited or a corporate system (1C, SAP, CRM) is not used; Russian-speaking users with experience working with global platforms and Kazakh-speaking specialists for whom the interface of many programs is not accessible in the state language.

Thus, digitalization increases not only productivity but also cultural fragmentation if not accompanied by digital inclusion policies.

Despite the risks, the digital environment can be a catalyst for enhancing intercultural understanding if properly localized and supported. Several companies in Kazakhstan have demonstrated effective solutions:

Samruk-Kazyna JSC has implemented a corporate portal with full dubbing of the interface and documents in Kazakh and Russian, and has also created a database of audio instructions for employees with low levels of digital literacy. Tengizchevroil LLP uses chatbots for internal communications, which include speech templates that take into account cultural nuances (polite forms of address, plurals in responses, etc.).peer-assisted system has been implemented at one of the capital's universities. learning on digital platforms where people from different ethnic groups help each other master online tools, which promotes trust and cultural exchange.

To minimize cultural risks in the digital environment, the following set of strategies is proposed: Localization of interfaces and automated notifications in all working languages of the company; Regular audit of digital barriers (including UX analysis with a cultural component); Integration of visual neutrality (e.g. replacing emoji with standard icons, using infographic templates); Training in digital etiquette and cross-cultural online communication as part of onboarding [9]; Use of

video formats in which non-verbal cues partially compensate for the lack of context (especially in interregional communication).

Thus, digitalization acts as a dual factor in intercultural communication: on the one hand, it provides tools for inclusion, but on the other, it produces new forms of cultural divides. Transforming the digital environment from a source of disintegration into a space for productive dialogue is only possible with a systemic, inclusive, and culturally sensitive digital policy.

Overcoming the Tower of Babel effect in the professional environment requires a shift from spontaneous reactions to cultural differences to a holistic, institutionalized system for managing intercultural interactions. In the context of the growing complexity of communication processes, digitalization, and international cooperation, especially in multi-ethnic countries like Kazakhstan, culture is becoming not an external context, but an internal dimension of organizational effectiveness.

Let's look at key strategies that enable organizations to build a sustainable model of intercultural communication—not as an isolated skill of individual employees, but as a component of organizational design. Intercultural competence is today considered one of the critically important soft skills [1]. It includes: cognitive component (knowledge about other cultures), affective component (empathy, tolerance for

uncertainty), behavioral component (flexibility in communication styles, conflict management).

Organizations in Kazakhstan (for example, in the energy, education, and transnational consulting sectors) have already begun to implement elements of intercultural training as part of onboarding and leadership development programs. However, issues related to the systematic nature and effectiveness of such activities remain unresolved [9-13].

Recommendations: introduction of an intercultural competence profile into the personnel assessment model (especially in projects with international participation); organizing immersion in a cross-cultural environment (rotation, shadowing, multicultural project teams); implementation of peer-feedback between representatives of different ethnic and linguistic groups. Isolated initiatives are ineffective without institutionalization. Sustainability-focused companies are moving from one-time training sessions to institutionalizing cross-cultural sensitivity. This may include: appointment of persons responsible for cultural mediation (Cultural Advisor, Diversity Manager); creation of ethical codes that take into account cultural diversity; regular audit of cultural risks (especially in regions with high ethnic diversity); development of glossaries and adapted reference books on terms and business

vocabulary in two or more languages.

Example: one of the telecommunications companies in Kazakhstan introduced the practice of intercultural certification of managers working in branches with a high level of ethnic diversity (for example, in the Almaty and South Kazakhstan regions). Universal HR standards are increasingly being supplemented by local and culturally specific adaptations. In Kazakhstan, this means, for example, taking national and religious holidays into account in work schedules and communication regulations (Nauryz, Oraz). ait , Kurban ait); providing alternative forms of feedback (written, anonymous, visual) for employees from cultures that are not prone to open criticism; Implementation of bilingual document management and adaptation of corporate platform interfaces to the Kazakh language.

HR policies should take into account not only formal equality, but also the cultural validity of procedures: from performance assessment to motivation and career growth.

In a cross-cultural environment, a leader functions not simply as a manager, but as a moderator of cultural differences. Effective leaders: decode signals coming from different cultural systems; adapt the communication style to the addressee; create a safe environment for expressing identity; are an example of inclusive behavior.

A Kazakh example: the head of a department at an international oil company holds monthly "cultural dialogues," where employees of different nationalities share their traditions, views, and expectations of the work process. This builds trust and reduces barriers.

Digital tools can not only enhance but also mitigate cultural differences when used correctly. It is recommended that interfaces be designed with linguistic and visual preferences in mind (fonts, color codes, communication style); using chatbots in multiple languages to resolve HR issues (e.g., vacation, pay, training); creating unified platforms for multicultural teams that allow for flexibility in timing, presentation style, and task visualization.

Thus, an effective intercultural management strategy must rely on a combination of institutional mechanisms, a competency-based approach, flexible HR tools, and culturally sensitive leadership. Only then will cultural diversity cease to be a management problem and become a strategic asset for the organization.

DISCUSSION

The results confirm the need for a systematic approach to managing intercultural communication. Companies that ignore cultural differences face increased employee turnover, decreased team effectiveness, and reputational risks. Conversely,

those that implement cross-cultural strategies demonstrate resilience, innovation, and high employee engagement. It is important to emphasize that digitalization is not the enemy of interculturalism, but rather its ally, if implemented correctly.

CONCLUSION

The modern professional environment is inevitably becoming culturally multilayered—a result of globalization, digitalization, migration, and the transformation of employment models. Under these conditions, intercultural communication is no

CONCLUSION

The modern professional environment is inevitably becoming culturally multilayered—a result of globalization, digitalization, migration, and the transformation of employment models. Under these conditions, intercultural communication is no longer an optional skill but a cornerstone of organizational resilience, leadership effectiveness, and HR strategies.

As the analysis shows, the "Tower of Babel effect" is not a metaphorical threat, but a real phenomenon manifesting itself in semantic distortions, cognitive gaps, value conflicts, and digital misunderstandings. These disruptions lead to decreased interaction effectiveness, increased latent tensions, and distorted management signals. This is especially acute in countries with a pronounced multi-ethnic population, such as Kazakhstan.

The Kazakhstani experience analyzed in this article demonstrates that with institutional will, cultural sensitivity, and a strategic approach, it is possible to build a productive model of intercultural communication in which differences are not suppressed but integrated into a common organizational whole. Language asymmetries, differences in communication styles, and the digital divide can all be compensated for through the development of intercultural competence, the implementation of adapted digital solutions, the institutionalization of inclusive policies, and leadership focused on understanding rather than domination. Thus, the path to overcoming the Tower of Babel effect lies not through standardization, but through the recognition, respect, and active management of cultural diversity. Only in this way can potential barriers be transformed into a source of innovation, creativity, and organizational maturity. In a rapidly growing world, it is the organization that learns to "speak different languages while maintaining meaning" that will gain a sustainable competitive advantage in the future.

To eliminate the Tower of Babel effect in the construction professional environment, it is necessary

to implement programs to develop cross-cultural competence among engineers, managers, and workers; digital tools for visualizing and translating instructions (BIM, AR); adaptive models for managing multicultural teams; and the development

of a unified regulatory and value base through project regulations. We present a program for the development of cross-cultural competence in the construction industry.

The program's goal is to develop sustainable skills in construction employees for interacting with representatives of different cultures on construction sites and in project offices.

Module name	Content
Introductory module	Introduction to Intercultural Communication (Online Course + Case Studies)
Module 1	Cultural models (Hofstede, Hall, Trompenaars) and their application in construction practice
Module 2	Ethical norms, behavioral patterns, and body language in different cultures
Module 3	Teamwork and leadership in a multicultural environment
Module 4	Digital tools for translation, visualization, and visual instructions (BIM, AR, multilingual panels)
Final module	Project-based business game with modeling of typical situations

Sales formats: Online webinars and video instructions. Master classes with facilitators. Visual simulators on the construction site. Integration into the occupational safety and corporate training system.

Target audience: Site managers, foremen, HR managers, occupational safety specialists, engineers, foreign contractors.

Expected results: Reducing misunderstandings and conflicts. Improving decision-making speed.

Improving industrial safety. Strengthening team spirit in multicultural teams.

To eliminate the Tower of Babel effect in the professional environment, it is necessary to implement programs to develop cross-cultural competence; digital communication solutions; adaptive leadership and diversity management models; and the creation of a unified language and values platform within the corporate environment

REFERENCES

- [1] Gelmanova Z.S., Saulsky Yu.N., Petrovskaya A.S. Hard skills and soft skills: meaning, differences and role in personnel development // In the world of science and education. – 2025.
- [2] Hofstede G., Hofstede G.J., Minkov M. Cultures and Organizations: Software of the Mind. – New York: McGraw-Hill, 2020. – 576 p.
- [3] Hall E.T. Beyond Culture. – New York: Anchor Books, 2019. – 320 p.
- [4] Kim Y.Y. Becoming intercultural: An integrative theory of communication and cross-cultural adaptation. – Thousand Oaks, CA: Sage, 2018. – 360 p.
- [5] Hofstede G. On the waves of commerce: testing Trompenaars's "model" of differences in national cultures // International Journal of Intercultural Relations. – 2016. – Vol. 20, No. 2. – P. 189–198.
- [6] Pedersen P. The five stages of culture shock: Critical incidents around the world. – Westport, CT: Greenwood Press, 2020. – 300 p.
- [7] Suleimenova E.D. Intercultural competence in Kazakhstan: challenges and opportunities // Central Asian Journal of Education and Research. – 2021.
- [8] Bissenova A. Kazakhstan's urban middle class and the discourse of "cultural modernity" // Europe-Asia Studies. – 2017. – Vol. 69, No. 4. – P. 675–698.
- [9] Gelmanova Z.S., Saulsky Yu.N., Petrovskaya A.S., Ivanova A.V. Modern onboarding strategies: innovative approaches to the adaptation of new employees // In the world of science and education. – 2025.
- [10] Gelmanova Z.S., Saulsky Yu.N., Ivanova A.V. Labor mobility and migration: effective management of international teams through methods and tools of adaptation and interaction // In the world of science and education. – 2024.

- [11] Gelmanova Z.S., Saulsky Yu.N., Petrovskaya A.S., Latypova M.A. Transformation of the role of the HR director: from administrative management to strategic leadership // In the world of science and education. – 2025.
- [12] Gelmanova Z.S., Saulsky Yu.N., Ivanova A.V. Leadership with understanding: empathy as the key to success in personnel management // Endless light in science. – 2024.
- [13] Gelmanova Z.S., Saulsky Yu.N., Ivanova A.V. Formation of leadership competencies of employees through HR tools: implementation of training and mentoring programs for the development of human resources potential // Endless light in science. – 2024.

ЭКОНОМИКА. ЖАЛПЫ БІЛІМ БЕРУ, ӘЛЕУМЕТТІК-ГУМАНИТАРЛЫҚ ЖӘНЕ ІРГЕЛІ ПӘНДЕР

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/081>

BIOELECTRIC PHENOMENA AND THEIR APPLICATION IN LIVING ORGANISMS

**Grebennikov E.Y., Sauletov E.S.*

Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

** Corresponding author email: ye.grebennikov@ttu.edu.kz*

Author information:

Grebennikov E.Y. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: ye.grebennikov@ttu.edu.kz

Sauletov E.S. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan.

Abstract. This article discusses bioelectric phenomena and their application in living organisms. Bioelectric phenomena are electrical phenomena that support the life of organisms and affect their physiological processes. The research discusses the role of bioelectric phenomena in organisms, modern achievements and the possibilities of their application. In addition, the importance and prospects of bioelectric phenomena in the fields of medicine, neurobiology, biotechnology and ecology are considered. This work is aimed at developing new methods and technologies in the field of biology and medicine by understanding bioelectric phenomena.

Keywords: bioelectric phenomena, bioelectric phenomena, neurobiology, biotechnology, ecology, medical applications, electrical signals, physiology of organisms.

БИОЭЛЕКТРЛІК ФЕНОМЕНДЕР МЕН ОЛАРДЫҢ ТІРІ ОРГАНИЗМДЕРДЕ ҚОЛДАНЫЛУЫ

**Гребенников Е.Ю., Саулетов Е.С.*

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

**Корреспондент автор e-mail: ye.grebennikov@ttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Гребенников Е.Ю.- Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: ye.grebennikov@ttu.edu.kz

Саулетов Е.С. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан.

Аңдатпа. Бұл мақалада биоэлектрлік феномендер мен олардың тірі организмдерде қолданылуы қарастырылған. Биоэлектрлік феномендер организмдердің тіршілігін қамтамасыз ететін және олардың физиологиялық процестеріне әсер ететін электрлік құбылыстар болып табылады. Зерттеу барысында биоэлектрлік құбылыстардың ағзалардағы ролдері, оларды қолданудың қазіргі жетістіктері мен мүмкіндіктері талқыланады. Сонымен қатар, биоэлектрлік феномендердің медицина, нейробиология, биотехнология және экология салаларындағы маңызы мен болашағы қарастырылған. Бұл жұмыс биоэлектрлік құбылыстарды түсіну арқылы биология мен медицина саласында жаңа әдістер мен технологияларды дамытуға бағытталған.

Түйін сөздер: Биоэлектрлік феномендер, биоэлектрлік құбылыстар, нейробиология, биотехнология, экология, медициналық қолданулар, электрлік сигналдар, организмдердің физиологиясы.

БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЖИВЫХ ОРГАНИЗМАХ

**Гребенников Е.Ю., Саулетов Е.С.*

Карагандинский индустриальный университет, Теміртау, Казахстан

**Корреспондент автор e-mail: ye.grebennikov@ttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Гребенников Е.Ю. - Карагандинский индустриальный университет, Теміртау, Казахстан. E-mail:

Аннотация. В этой статье рассматриваются биоэлектрические явления и их применение в живых организмах. Биоэлектрические явления-это электрические явления, которые поддерживают жизнь организмов и влияют на их физиологические процессы. В ходе исследования обсуждается роль биоэлектрических явлений в организмах, современные достижения и возможности их применения. Кроме того, рассматриваются значение и перспективы биоэлектрических явлений в области медицины, нейробиологии, биотехнологии и экологии. Эта работа направлена на разработку новых методов и технологий в области биологии и медицины путем понимания биоэлектрических явлений.

Ключевые слова: биоэлектрические явления, биоэлектрические явления, нейробиология, биотехнология, экология, медицинские применения, электрические сигналы, физиология организмов.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Тірі организмдердегі биоэлектрлік феномендердің физиологиялық негіздері мен олардың жүйке, жүрек-қантамыр және бұлшық ет жүйелерінің қызметіндегі ролі ғылыми тұрғыдан талданды. Биоэлектрлік құбылыстарды зерттеуде электрофизиологиялық әдістерді қолданудың диагностикалық және терапиялық мүмкіндіктері негізделіп, олардың ауруларды ерте анықтау мен емдеу тиімділігін арттырудағы маңызы көрсетілді. Сонымен қатар, биоэлектрлік технологияларды медицинада, нейробиологияда, биотехнологияда және экологияда қолданудың перспективалары айқындалып, олардың заманауи ғылыми зерттеулер мен инновациялық технологияларды дамытудағы әлеуеті дәлелденді.

КІРІСПЕ

Биоэлектрлік феномендер тірі организмдерде пайда болатын электрлік құбылыстар болып табылады, олардың ролі физиология мен биология саласында маңызды. Бұл феномендер физиологиялық процестердің қалыпты жүрісін қамтамасыз етіп, ағзалардың барлық деңгейлерінде функционалдық өзгерістерді бақылап отыруға мүмкіндік береді. Мысалы, нейрондар арасында электрлік сигналдардың берілуі, жүрек-қан тамыр жүйесінің реттелуі, бұлшық еттер мен гормондардың қызметі барлығы биоэлектрлік процестермен тығыз байланысты.

Бұл құбылыстардың маңызы тек биология мен медицина саласында ғана емес, сондай-ақ инженерия, биотехнология және экология салаларында да айқын көрінеді. Қазіргі уақытта биоэлектрлік феномендер медициналық диагностика мен терапияда кеңінен қолданылуда. Электрлік сигналдарды өлшеу арқылы түрлі ауруларды диагностикалауға мүмкіндік туды. Сонымен қатар, электрлік импульстардың тиімді әсер етуі тірі ағзалардағы регенерациялық процестерді жеделдетуге септігін тигізеді. Бұдан бөлек, биоэлектрлік құбылыстар тіршілік

ортасының өзгерістеріне жауап ретінде ағзалардың бейімделу қабілетін көрсететін механизмдер ретінде қарастырылады.

Мақалада биоэлектрлік феномендер мен олардың тірі организмдердегі қолданылуы зерттеледі. Биоэлектрлік құбылыстарды түсіну арқылы біз организмдердің ішкі процестерін тереңірек зерттеп, олардың денсаулығын сақтау, ауруларды емдеу және биотехнологиялық зерттеулерді дамыту мүмкіндіктерін кеңейтеміз.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі ғылыми зерттеулерде биоэлектрлік феномендердің жекелеген физиологиялық механизмдері немесе олардың медицинадағы қолданылу бағыттары кеңінен қарастырылғанымен, олардың тірі организмдердің әртүрлі функционалдық жүйелеріндегі ролін және медицина, нейробиология, биотехнология мен экология салаларындағы қолданылу мүмкіндіктерін кешенді түрде бағалау жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сонымен қатар, биоэлектрлік құбылыстарды диагностикалық және терапиялық технологиялармен ықпалдастырудың ғылыми негіздері мен практикалық әлеуеті толық ашылмаған. Сондықтан аталған зерттеу биоэлектрлік феномендердің маңызын кешенді талдап, оларды заманауи биомедициналық және биотехнологиялық бағыттарда тиімді пайдаланудың ғылыми негіздерін айқындауға бағытталған.

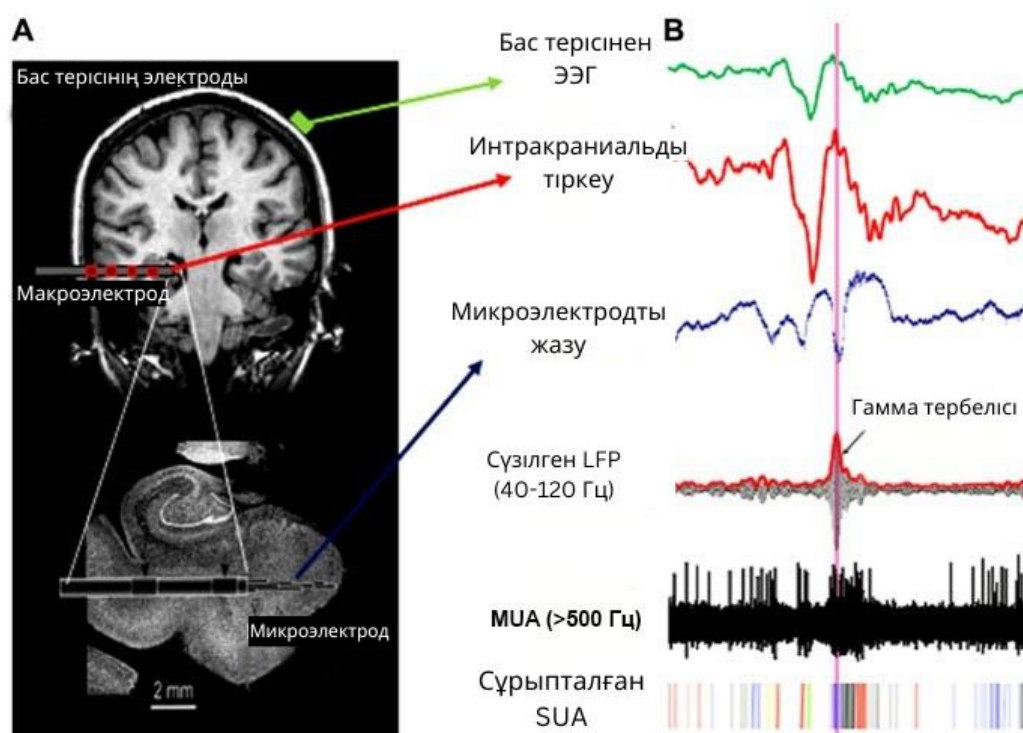
Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы биоэлектрлік феномендердің тірі организмдердің жүйке, жүрек-қантамыр және бұлшық ет жүйелеріндегі қызметін, сондай-ақ олардың медицина, нейробиология, биотехнология және экология салаларындағы қолданылу мүмкіндіктерін кешенді түрде талдауында. Зерттеу нәтижесінде биоэлектрлік құбылыстардың физиологиялық процестерді реттеудегі маңызы негізделіп, электрофизиологиялық әдістердің ауруларды ерте диагностикалау, функционалдық жағдайды бағалау және емдеу тиімділігін арттырудағы ролі

көрсетілді. Сонымен қатар, биоэлектрлік технологияларды қолданудың ғылыми және практикалық перспективалары айқындалды.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Бұл зерттеуде биоэлектрлік феномендерді тереңірек зерттеу үшін әдебиеттерді шолу, зертханалық эксперименттер, теориялық талдау және қазіргі заманғы зерттеу әдістері қолданылады. Әсіресе, биоэлектрлік құбылыстарды зерттеу барысында жасалған ғылыми жұмыстары мен тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері басым болады.

Зерттеулер биоэлектрлік құбылыстардың физиологиялық негіздерін анықтауға, олардың ағзаның жүйелеріне әсерін түсінуге және медицинадағы қолдану мүмкіндіктерін зерттеуге бағытталған. Талдау үшін негізгі әдістер ретінде электрофизиология, молекулалық биология және биоэлектрлік сигналдарды зерттеу қолданылды. Бұл әдістердің көмегімен нейрондардың электрлік белсенділігі, жүрек-қан тамыр жүйесі мен бұлшық еттердегі биоэлектрлік құбылыстар, сондай-ақ, электрлік импульстардың тірі ағзаға әсері зерттелді.



Сурет 1. Мидың биоэлектрлік белсенділігі

Сондай-ақ, биоэлектрлік технологияларды қолданудың қазіргі кезеңдегі жағдайы мен болашағын бағалау үшін әртүрлі медициналық құрылғылар мен әдістерді зерттеу әдісі қолданылды. Мысалы, электрокардиограмма (ЭКГ) мен электросефалография (ЭЭГ) сияқты құралдар биоэлектрлік құбылыстарды зерттеуде кеңінен пайдаланылады. Бұл құрылғыларды қолдану арқылы ағзалардың биоэлектрлік параметрлерін өлшеу және әртүрлі ауруларды ерте кезеңде диагностикалау мүмкіндігі пайда болады.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ПІКІРТАЛАС

Биоэлектрлік феномендер тірі ағзада көптүрлі биологиялық процестердің жүзеге асуына ықпал етеді. Нейрондық белсенділікті зерттеу барысында биоэлектрлік құбылыстардың нейропластика мен ми жүйесінің динамикасына әсер ететінін анықтадық. Электрлік сигналдар ми мен жүйке жүйесінде ақпаратты өңдеу мен жеткізу процесінде маңызды рөл атқарады. Бұл электрлік импульстардың бұзылуы немесе өзгеруі психикалық аурулар мен нейродегенеративті аурулардың дамуына себеп болуы мүмкін.

Жүрек-қан тамыр жүйесі бойынша

зерттеулер көрсеткендей, биоэлектрлік құбылыстар жүрек ритмі мен соққыларын реттеуде үлкен маңызға ие. Электрлік импульстардың қалыпты реттелуі жүрек жұмысының тұрақты болуын қамтамасыз етеді. Электрокардиография әдісін қолдану арқылы жүрек ауруларын ерте кезеңде анықтауға болады. Сонымен қатар, биоэлектрлік стимуляция әдістері жүрек бұлшық еттерінің қайта қалыптасуына ықпал ете алады.

Бұлшық еттерде биоэлектрлік құбылыстардың реттелуі олардың жиырылуы мен қозғалыстарын қамтамасыз етеді.

Электрлік импульстар бұлшық еттерге импульстар жіберіп, олардың жиырылуына себеп болады. Электрлік стимуляцияны пайдалану арқылы бұлшық еттер мен жүйке жүйесінің регенерациясын жақсартуға болады. Бұл әдіс әсіресе жарақат алған немесе операциядан кейінгі емдеуде тиімді қолданылуда.

Биоэлектрлік құбылыстардың экология мен биотехнология салаларында қолданылуы да маңызды. Мысалы, өсімдіктердің электрлік жауаптарын зерттеу экология саласында өсімдіктердің қоршаған ортаға бейімделуін түсінуге көмектеседі. Сонымен қатар, биоэлектрлік технологияларды қолдану арқылы биотехнологиялық өнімдерді алу процесін жетілдіруге болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Биоэлектрлік феномендер тірі ағзалардағы физиологиялық процестердің негізі болып табылады және олардың тіршілік әрекетіне тигізетін әсері зор. Бұл феномендер медициналық диагностика мен терапияда, нейробиологияда, биотехнологияда және экологияда маңызды рөл атқарады. Биоэлектрлік құбылыстарды терең түсіну организмдердің денсаулығын сақтау, ауруларды ерте кезеңде анықтау және жаңа медициналық технологияларды дамыту үшін маңызды мүмкіндік береді.

Бұл зерттеу биоэлектрлік феномендерді

қолданудың болашағы зор екендігін көрсетеді, әсіресе оларды медицинада, нейробиологияда және биотехнологияда кеңінен қолдану мүмкіндігі артып келеді. Алдағы уақытта бұл салада жаңа технологиялар мен әдістердің дамуы өмір сүру сапасын жақсартуға және аурулардың алдын алуға көмектесетін маңызды құралдар болмақ.

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

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Гребенников Е.Ю. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, әдіснаманы қалыптастыру, ғылыми әдебиеттерді талдау, нәтижелерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. Саулетов Е.С. – зерттеуді жүргізу, мәліметтерді жинақтау және жүйелеу, нәтижелерді тексеру, иллюстрациялық материалдарды дайындау, мақаланы редакциялау және рецензиялау. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығына ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді орындауға ғылыми, әдістемелік және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Қарағанды индустриялық университетіне шынайы алғыстарын білдіреді. Университеттің ғылыми-зерттеу ортасы мен көрсеткен қолдауы осы жұмыстың орындалуына және оның нәтижелерін жариялауға елеулі үлес қосты.

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

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Smith, J., Brown, A. Bioelectricity: Principles and Applications / J. Smith, A. Brown. — New York: Academic Press, 2020. — 356 p.
- [2] Green, R., Johnson, L. The Role of Bioelectric Phenomena in Medical Applications / R. Green, L. Johnson // Journal of Biomedical Science. — 2019. — Vol. 34, No. 2. — P. 115–130.
- [3] Miller, P., Roberts, H. Neuroelectricity and Brain Function / P. Miller, H. Roberts. — Cambridge: Cambridge University Press, 2021. — 412 p.
- [4] Anderson, T. Biotechnology and Bioelectricity: The Future of Medicine / T. Anderson // BioTech Journal. — 2022. — Vol. 15, No. 4. — P. 225–240.

REFERENCES

- [1] Smith, J., Brown, A. Bioelectricity: Principles and Applications / J. Smith, A. Brown. — New York: Academic Press, 2020. — 356 p.
- [2] Green, R., Johnson, L. The Role of Bioelectric Phenomena in Medical Applications / R. Green, L. Johnson // Journal of Biomedical Science. — 2019. — Vol. 34, No. 2. — P. 115–130.
- [3] Miller, P., Roberts, H. Neuroelectricity and Brain Function / P. Miller, H. Roberts. — Cambridge: Cambridge University Press, 2021. — 412 p.
- [4] Anderson, T. Biotechnology and Bioelectricity: The Future of Medicine / T. Anderson // BioTech Journal. — 2022. — Vol. 15, No. 4. — P. 225–240.

ЭКОНОМИКА. ЖАЛПЫ БІЛІМ БЕРУ, ӘЛЕУМЕТТІК-ГУМАНИТАРЛЫҚ ЖӘНЕ ІРГЕЛІ ПӘНДЕР

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/082>

THE STRUCTURE OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD AND ITS IMPACT ON LIFE ON THE PLANET

**Tolenov T.R., Kusainov N.K.*

Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

** Corresponding author e-mail: t.tolenov@tttu.edu.kz*

Author information:

Tolenov T.R. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: a.batyrbek@tttu.edu.kz, t.tolenov@tttu.edu.kz

Kusainov N.K. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan.

Abstract. The Earth's magnetic field is an important phenomenon that is part of the protective system of our planet. This field contributes to the preservation of life on the planet, protecting it from external cosmic radiation and solar winds. The magnetic field is the result of the interaction of dynamic processes in the deep structure of the planet and its external environment. The article examines the structural features of the Earth's magnetic field and the impact of its changes on life on the planet. The results of the study reveal the factors determining the dynamic conditions of the Earth's magnetic field, as well as the mechanisms of its influence on life.

Keywords: Earth's magnetic field, Planetary protection, solar wind, radiation belt, life, geophysics.

ЖЕРДІҢ МАГНИТ ӨРІСІНІҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҒАЛАМШАРДАҒЫ ТІРШІЛІККЕ ӘСЕРІ

**Толенов Т.Р., Кусаинов Н.К.*

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

** Автор-корреспондент e-mail: t.tolenov@tttu.edu.kz*

Аңдатпа. Жердің магнит өрісі — бұл планетамыздың қорғаныс жүйесінің бір бөлігі болып табылатын маңызды құбылыс. Бұл өріс сыртқы ғарыштық радиация мен күн желдерінен қорғап, ғаламшардағы тіршіліктің сақталуына ықпал етеді. Магнит өрісі ғаламшардың терең құрылысы мен оның сыртқы ортасындағы динамикалық процестердің өзара әсерлесуінің нәтижесі болып табылады. Мақалада Жердің магнит өрісінің құрылымдық ерекшеліктері, оның өзгерістерінің ғаламшардағы тіршілікке әсері қарастырылады. Зерттеу нәтижелері Жердің магнит өрісінің динамикалық жағдайларын анықтайтын факторларды, сондай-ақ оның тіршілікке әсер ету механизмдерін ашып көрсетеді.

Түйін сөздер: Жердің магнит өрісі, ғаламшарлық қорғаныс, күн желі, радиациялық белдеу, тіршілік, геофизика.

СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И ВЛИЯНИЕ НА ЖИЗНЬ НА ПЛАНЕТЕ

**Толенов Т.Р., Кусаинов Н.К.*

Карагандинский индустриальный университет, Теміртау, Казахстан

** Автор-корреспондент e-mail: t.tolenov@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Толенов Т.Р. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: t.tolenov@tttu.edu.kz

Кусаинов Н.К. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан.

Аннотация. Магнитное поле Земли-важное явление, которое является частью защитной системы нашей планеты. Это поле способствует сохранению жизни на планете, защищая ее от внешней космической радиации и

солнечных ветров. Магнитное поле является результатом взаимодействия динамических процессов в глубинном строении планеты и ее внешней среды. В статье рассматриваются структурные особенности магнитного поля Земли, влияние его изменений на жизнь на планете. Результаты исследования раскрывают факторы, определяющие динамические условия магнитного поля Земли, а также механизмы его влияния на жизнь.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, Планетарная защита, солнечный ветер, радиационный пояс, жизнь, геофизика

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Жердің магнит өрісінің құрылымы мен қалыптасу ерекшеліктеріне талдау жүргізіліп, оның планетаны күн желінен, ғарыштық сәулеленуден және жоғары энергиялы бөлшектерден қорғаудағы негізгі қызметі ғылыми тұрғыдан сипатталды. Сонымен қатар, магнитометриялық бақылауларды, ғарыштық зерттеулерді, магниттік аномалияларды талдауды және компьютерлік модельдеуді қолданудың Жердің магнит өрісінің динамикасын, өзгеру заңдылықтарын және олардың ғаламшардағы тіршілікке ықпалын бағалаудағы тиімділігі негізделді.

КІРІСПЕ

Жердің магнит өрісі — бұл планетамызды қоршап тұрған, ғаламшардың ішкі құрылысының, әсіресе ядросының қозғалысымен қалыптасатын күштік өріс. Бұл өріс күн желінен және ғарыштық радиациядан Жер бетінде тіршіліктің сақталуына мүмкіндік беретін қорғаныс қабаты ретінде қызмет атқарады. Магнит өрісі Жердің сыртқы ортасының динамикалық жағдайларымен тығыз байланысты, ал оның өзгерістерін зерттеу ғаламшарымыздың терең құрылысын, сондай-ақ ғарыштық процестердің Жерге әсерін түсінуге мүмкіндік береді.

Жердің магнит өрісі тек физикалық тұрғыда ғана емес, биологиялық тұрғыда да маңызды рөл атқарады. Магнит өрісінің құрылымы мен өзгерістері табиғи апаттарға, климаттық өзгерістерге, сондай-ақ тіршілікке жанама әсер етуі мүмкін. Сондықтан Жердің магнит өрісін зерттеу ғылыми қауымдастықтың маңызды бағыттарының бірі болып табылады. Бұл зерттеулер Жердің магнит өрісінің динамикасын, оның ғаламшардағы тіршілік үшін маңыздылығын, сондай-ақ оның болашақтағы өзгерістерін болжауға мүмкіндік береді.

Мақалада Жердің магнит өрісінің құрылымдық ерекшеліктері мен оның тіршілікке ықпал ету механизмдері қарастырылады. Бұл зерттеулер қазіргі геофизикалық әдістерді қолдану арқылы жүзеге асырылады және ғаламшардың тұрақтылығын сақтау үшін маңызды ақпарат береді.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі геофизикалық зерттеулерде Жердің магнит өрісінің жекелеген қасиеттері, оның пайда болу

тетіктері немесе ғарыштық құбылыстармен байланысы кеңінен қарастырылғанымен, магнит өрісінің құрылымдық ерекшеліктерін, динамикалық өзгерістерін және олардың ғаламшардағы тіршілікке кешенді әсерін біртұтас тұрғыдан бағалау жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сонымен қатар, магнит өрісінің өзгерістерін анықтауда магнитометриялық бақылауларды, ғарыштық зерттеулерді және компьютерлік модельдеу нәтижелерін кешенді пайдалану мәселелері өзекті болып табылады. Осыған байланысты зерттеу Жердің магнит өрісінің қорғаныш қызметін, оның динамикасын және тіршілікке әсер ету механизмдерін жан-жақты ғылыми тұрғыдан негіздеуге бағытталған.

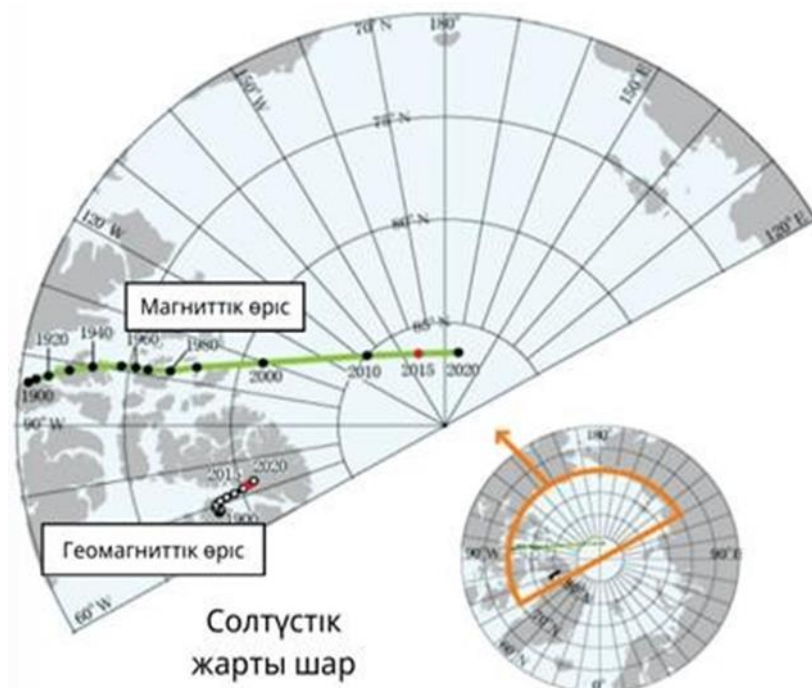
Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы Жердің магнит өрісінің құрылымы мен динамикасына кешенді талдау жүргізіліп, оның күн желі, ғарыштық сәулелену және басқа да ғарыштық факторлармен өзара әрекеттесу ерекшеліктерінің жүйелі түрде қарастырылуында. Зерттеу нәтижесінде магнитометриялық өлшеулерді, ғарыштық бақылауларды, магниттік аномалияларды зерттеуді және компьютерлік модельдеу әдістерін біріктіріп қолданудың Жердің магнит өрісінің өзгерістерін бағалаудағы және олардың ғаламшардағы тіршілік пен экологиялық тұрақтылыққа ықпалын түсіндірудегі ғылыми және практикалық тиімділігі негізделді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Жердің магнит өрісін зерттеу барысында түрлі геофизикалық әдістер қолданылды. Олардың ішінде магнитометрия, ғарыштық аппараттардың көмегімен магнит өрісін бақылау, магниттік аномалияларды зерттеу, сондай-ақ компьютерлік модельдеу сияқты әдістер кеңінен пайдаланылды. Осы әдістер арқылы Жердің магнит өрісінің құрылымын, оның өзгерістерін және әсер ету механизмдерін анықтауға болады.

Магнитометрия — Жердің магнит өрісін өлшеу үшін қолданылатын ең негізгі әдіс. Магнитометрлер көмегімен жердің магнит өрісінің күшін, бағытын және ауытқуларын анықтауға болады. Бұл әдіс жер бетінде, сондай-ақ атмосферада да қолданылуы мүмкін. Магнитометрия арқылы магнит өрісінің өзгерістері мен аномалияларының таралуын

зерттеуге мүмкіндік береді.



Сурет 1. Солтүстік магниттік полюстің (Magnetic Pole) және дипольдік полюстің (Geomagnetic Pole) 1900–2020 жылдар аралығындағы қозғалысы халықаралық эталондық магнит өрісінің (IGRF-12) соңғы генерациясы негізінде құрылған

Ғарыштық аппараттар — Жердің магнит өрісін ғарыштан бақылаудың ең тиімді құралдары болып табылады. Бұл аппараттар ғаламшарымызды қоршап тұрған радиациялық белдеулердің құрылымын және олардың уақыт бойынша өзгерістерін зерттеуге мүмкіндік береді. Ғарыштағы өлшеулер ғаламшардың магнит өрісінің жоғары деңгейдегі динамикасын түсінуге көмектеседі.

Жердің магнит өрісінде белгілі бір аумақтарда магниттік аномалиялар пайда болуы мүмкін. Бұл аномалиялар геологиялық құрылымдар мен жер қойнауындағы минералды жыныстардың әсерінен қалыптасады. Магниттік аномалияларды зерттеу арқылы Жердің ішкі құрылыс ерекшеліктерін анықтауға болады.

Жердің магнит өрісін зерттеуде компьютерлік модельдеу маңызды құрал болып табылады. Бұл әдіс арқылы ғаламшардың ішкі және сыртқы ортасының өзара әсерін, сондай-ақ магнит өрісінің уақыт бойынша қалай өзгеретінін зерттеуге болады. Модельдеу әдістері магнит өрісінің даму тенденцияларын болжауға және оның тіршілікке әсерін алдын ала анықтауға мүмкіндік береді.

Ғылыми бақылаулар мен деректерді талдау әдістері арқылы Жердің магнит өрісінің динамикасын зерттеу жүзеге асырылады. Жер бетінде, сондай-ақ ғарышта жүргізілген өлшеулер мен зерттеулер негізінде алынған деректер

талданып, магнит өрісінің құрылымы мен өзгерістерінің себебі анықталады. Сонымен қатар, бұл деректер магнит өрісінің тіршілікке әсерін бағалауға мүмкіндік береді.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ШҚІРТАЛАС

Жердің магнит өрісін зерттеудің нәтижелері ғаламшарымыздың қорғаныс жүйесінің маңыздылығын айқындайды. Бұл өріс күн желінен, ғарыштық радиациядан және басқа да ғарыштық құбылыстардан қорғаушы қабат ретінде қызмет етеді. Жердің магнит өрісінің құрылымы мен оның өзгерістері ғаламшардың тіршілігіне қалай әсер ететінін зерттеу барысында бірнеше негізгі нәтижелер анықталды.

1. **Магнит өрісінің құрылымы.** Жердің магнит өрісі екі негізгі бөліктен тұрады: сыртқы және ішкі. Ішкі магнит өрісі Жердің ядросында пайда болып, оның ішінде өтетін электр тогы арқылы қалыптасады. Бұл өріс ғаламшардың магниттік полюстерінде жиналады. Сыртқы магнит өрісі күн желінен келетін магниттік бөлшектердің әсерінен қалыптасады. Бұл екі бөлік өзара әрекеттесіп, Жердің магнит өрісін қалыптастырады.

2. **Магнит өрісінің динамикасы.** Жердің магнит өрісі үнемі өзгеріп отырады. Бұл өзгерістер күн желінің әсерінен, Жердің ядросындағы қозғалыстардан және басқа да ғарыштық процестерден туындайды. Зерттеулер

көрсеткендей, магнит өрісінің бағыты мен күшінің өзгеруі белгілі бір уақытта ғаламшардағы тіршілікке әсер етуі мүмкін.

3. **Магнит өрісінің тіршілікке әсері.** Жердің магнит өрісі ғаламшардағы тіршілікті сақтап қалу үшін маңызды фактор болып табылады. Магнит өрісі күннің күшті магниттік алаңдарынан және ғарыштық радиациядан қорғаныс қызметін атқарады. Бұл радиациядан қорғау биологиялық жүйелер үшін өте маңызды, себебі ғарыштық радиация ДНҚ-ның бұзылуына, мутацияларға және тіршілік жүйелерінің дисфункциясына әкелуі мүмкін.

4. **Магнит өрісінің өзгеруі мен тіршіліктің өзгерістері.** Магнит өрісінің күшінің әлсіреуі немесе бағыттың ауысуы ғаламшардағы тіршілікті өзгертуі мүмкін. Мысалы, магнит өрісінің әлсіреуі кезінде ғарыштық радиация Жер бетіне жақындайды, бұл климаттық өзгерістер мен экологиялық апаттарға себеп болуы мүмкін.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жердің магнит өрісі ғаламшардағы тіршілік үшін маңызды қорғаныс қызметін атқарады. Бұл өріс күн желінен және ғарыштық радиациядан Жерді қорғап, тіршілікке қажетті экологиялық жағдайларды қамтамасыз етеді. Магнит өрісінің құрылымы мен динамикасын зерттеу ғаламшарымыздың болашағын, оның экологиялық жағдайын және тіршіліктің сақталуын түсінуге мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері магнит өрісінің Жердегі тіршіліктің сақталуына маңызды әсер ететінін көрсетеді. Бұл өріс тек физикалық ғана емес, биологиялық тұрғыдан да маңызды рөл атқарады. Магнит өрісінің күшінің әлсіреуі немесе өзгеруі ғаламшардың экологиялық жағдайына әсер етуі мүмкін, сондықтан оның динамикасын зерттеу

ғаламшарымыздың тұрақтылығын сақтауға маңызды қадам болып табылады.

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

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Толенов Т.Р. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, әдіснаманы қалыптастыру, ғылыми әдебиеттерді талдау, зерттеуді жүргізу, нәтижелерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. **Кусайнов Н.К.** – ғылыми жетекшілік, зерттеу нәтижелерін тексеру, нәтижелерді түсіндіру, мақаланы ғылыми редакциялау және рецензиялау. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығына ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Қарағанды индустриялық университетіне алғыс 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.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Hargreaves, J. K. The Solar-Terrestrial Environment / J. K. Hargreaves. — Cambridge: Cambridge University Press, 1992. — 420 p.
- [2] Barone, F., de Santis, A. Magnetic Field of the Earth and Solar Activity / F. Barone, A. de Santis. — Berlin: Springer, 2007. — 312 p.
- [3] Tarrant, E. L. Geophysical Exploration of the Earth's Magnetic Field / E. L. Tarrant. — Amsterdam: Elsevier Science, 2015. — 278 p.
- [4] Kivelson, M. G., Russell, C. T. Introduction to Space Physics / M. G. Kivelson, C. T. Russell. — Cambridge: Cambridge University Press, 1995. — 586 p.
- [5] Cloutier, P. A., Leblanc, F. Earth's Magnetic Field and Space Weather / P. A. Cloutier, F. Leblanc. — Berlin: Springer, 2018. — 344 p.
- [6] Hargreaves, J. K. The Solar-Terrestrial Environment / J. K. Hargreaves. — Cambridge: Cambridge University Press, 1992. — 420 p.
- [7] Barone, F., de Santis, A. Magnetic Field of the Earth and Solar Activity / F. Barone, A. de Santis. — Berlin: Springer, 2007. — 312 p.
- [8] Tarrant, E. L. Geophysical Exploration of the Earth's Magnetic Field / E. L. Tarrant. — Amsterdam: Elsevier Science, 2015. — 278 p.
- [9] Kivelson, M. G., Russell, C. T. Introduction to Space Physics / M. G. Kivelson, C. T. Russell. — Cambridge: Cambridge University Press, 1995. — 586 p.

- [10] Cloutier, P. A., Leblanc, F. *Earth's Magnetic Field and Space Weather* / P. A. Cloutier, F. Leblanc. — Berlin: Springer, 2018. — 344 p.

REFERENCES

- [1] Hargreaves, J. K. *The Solar-Terrestrial Environment* / J. K. Hargreaves. — Cambridge: Cambridge University Press, 1992. — 420 p.
- [2] Barone, F., de Santis, A. *Magnetic Field of the Earth and Solar Activity* / F. Barone, A. de Santis. — Berlin: Springer, 2007. — 312 p.
- [3] Tarrant, E. L. *Geophysical Exploration of the Earth's Magnetic Field* / E. L. Tarrant. — Amsterdam: Elsevier Science, 2015. — 278 p.
- [4] Kivelson, M. G., Russell, C. T. *Introduction to Space Physics* / M. G. Kivelson, C. T. Russell. — Cambridge: Cambridge University Press, 1995. — 586 p.
- [5] Cloutier, P. A., Leblanc, F. *Earth's Magnetic Field and Space Weather* / P. A. Cloutier, F. Leblanc. — Berlin: Springer, 2018. — 344 p.
- [6] Hargreaves, J. K. *The Solar-Terrestrial Environment* / J. K. Hargreaves. — Cambridge: Cambridge University Press, 1992. — 420 p.
- [7] Barone, F., de Santis, A. *Magnetic Field of the Earth and Solar Activity* / F. Barone, A. de Santis. — Berlin: Springer, 2007. — 312 p.
- [8] Tarrant, E. L. *Geophysical Exploration of the Earth's Magnetic Field* / E. L. Tarrant. — Amsterdam: Elsevier Science, 2015. — 278 p.
- [9] Kivelson, M. G., Russell, C. T. *Introduction to Space Physics* / M. G. Kivelson, C. T. Russell. — Cambridge: Cambridge University Press, 1995. — 586 p.
- [10] Cloutier, P. A., Leblanc, F. *Earth's Magnetic Field and Space Weather* / P. A. Cloutier, F. Leblanc. — Berlin: Springer, 2018. — 344 p.

ЭКОНОМИКА. ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ, СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ДИСЦИПЛИНЫ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/083>

OPTIMIZATION OF THE SYSTEM OF SCHEDULED PREVENTIVE MAINTENANCE OF POWER EQUIPMENT AT QARMET JSC

**Valeev D.A., Ilyin A.A., Gelmanova Z.S., Maliga I.A.*

Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

** Corresponding author email: v.valeev@tttu.edu.kz*

Author information:

Valeev D.A. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, E-mail: v.valeev@tttu.edu.kz

Ilyin A.A. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Gelmanova Z.S. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Maliga I.A. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Abstract. Abstract. The article provides a comprehensive analysis of the current system of scheduled preventive maintenance (PRT) of power equipment of JSC "Qarmet" from the perspective of both the theoretical foundations of reliability and practical production experience. It is shown that the traditional calendar model of maintenance management, focused on fixed repair intervals, in modern conditions leads to a number of systemic problems: excessive shutdowns of equipment, inconsistency of repair "windows" with schedules of metallurgical production, increased costs of operation and maintenance personnel, as well as maintaining a high probability of sudden failures, especially for critical equipment (boiler, turbine, compressor, and electrical equipment). The necessity of transformation of the HRM system towards risk-oriented maintenance and reliability model that includes the classification of equipment by criticality, the use of statistical failure analysis (in particular, Weibull distribution), as well as the introduction of predictive maintenance elements. based on vibration diagnostics, thermography, oil analysis and electrical tests. Special attention is paid to the integration of diagnostic results into corporate asset management systems (CMMS/ERP), which makes it possible to move from disparate control measures to a single equipment lifecycle management contour. The results of testing the proposed approach at pilot facilities (pumping stations, compressor units, transformer facilities) demonstrate a significant technical and economic effect: reduction of emergency downtime by 15-25%, reduction in the need for spare parts and assemblies by 10-15%, increase in the availability factor of power equipment by 2-3 percentage points. An additional result is an improved maintenance culture, advanced training of repair personnel, and a reduction in the stress burden on repair services due to greater predictability of failures.

Keywords: *scheduled preventive maintenance, power equipment, reliability, optimization, risk-based maintenance, predictive maintenance (PdM), statistical failure analysis*

«QARMET» АҚ-ДА ЭНЕРГИЯ ЖАБДЫҚТАРЫН ЖОСПАРЛЫ-АЛДЫН АЛУ ЖӨНДЕУ ЖҮЙЕСІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

**Валеев Д.А., Ильин А.А., Гельманова З.С., Малига И.А.*

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

**Корреспондент автор e-mail: v.valeev@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Валеев Д.А. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан, E-mail: v.valeev@tttu.edu.kz

Ильин А.А. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

Гельманова З.С. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

Малига И.А. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

Аңдатпа. Аңдатпа. Мақалада сенімділіктің теориялық негіздері, сондай-ақ практикалық өндірістік тәжірибе тұрғысынан "Qarmet" ақ энергетикалық жабдықтарын жоспарлы-алдын алу жөндеулерінің (ППР) қолданыстағы

жүйесіне кешенді талдау жүргізілді. Қазіргі жағдайда бекітілген жөндеуаралық интервалдарға бағытталған ППР дәстүрлі күнтізбелік моделі бірқатар жүйелік проблемаларға әкелетіні көрсетілген: жабдықтың шамадан тыс тоқтауы, жөндеу "терезелерінің" металлургиялық өндіріс кестелерімен сәйкес келмеуі, пайдалану мен қызмет көрсету персоналының шығындарының өсуі, сондай-ақ кенеттен істен шығу ықтималдығының жоғары болуы, әсіресе маңызды жабдықтар үшін (қазандық), турбиналық, компрессорлық және электротехникалық). ППР жүйесін сенімділікке бағытталған тәуекелге бағдарланған қызмет көрсету және қызмет көрсету жағына өзгерту қажеттілігі негізделген. Жұмыста жабдықты сыни тұрғыдан жіктеуді, істен шығудың статистикалық талдауын (атап айтқанда, Вейбуллы бөлуді) қолдануды, сондай-ақ болжамды техникалық қызмет көрсету элементтерін енгізуді қамтитын оңтайландырудың интеграцияланған моделі ұсынылған. вибродиагностикаға, термографияға, майды талдауға және электрлік сынақтарға негізделген. Диагностика нәтижелерін өндірістік активтерді басқарудың корпоративтік жүйелеріне (CMMS/ERP) біріктіру мәселелеріне ерекше назар аударылады, бұл әртүрлі бақылау шараларынан жабдықтың өмірлік циклін басқарудың бірыңғай тізбегіне өтуге мүмкіндік береді. Пилоттық объектілерде (сорғы станциялары, компрессорлық қондырғылар, трансформаторлық шаруашылық) ұсынылған тәсілді сынақтан өткізу нәтижелері маңызды техникалық-экономикалық тиімділікті көрсетеді: авариялық тоқтап қалудың 15-25% - ға қысқаруы, қосалқы бөлшектер мен тораптардың қойма қорларына қажеттіліктің 10-15% - ға төмендеуі, энергия жабдықтарының дайындық коэффициентінің 2-3 пайыздық тармаққа өсуі. Қосымша нәтиже-техникалық қызмет көрсету мәдениетін жақсарту, жөндеу персоналының біліктілігін арттыру және сәтсіздіктерді болжау арқылы жөндеу қызметтеріне стресстік жүктемені азайту.

Түйін сөздер: жоспарлы-алдын алу жөндеу, энергетикалық жабдық, сенімділік, оңтайландыру, тәуекелге бағытталған қызмет көрсету, болжамды қызмет көрсету (PdM), сәтсіздіктерді статистикалық талдау

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ РЕМОНТОВ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ НА АО «QARMET»

**Валеев Д.А., Ильин А.А., Гельманова З.С., Малига И.А.*

Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

**Корреспондент автор e-mail: v.valeev@tttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Валеев Д.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, E-mail: v.valeev@tttu.edu.kz

Ильин А.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

Гельманова З.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

Малига И.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

Аннотация. Аннотация. В статье проведён комплексный анализ действующей системы планово-предупредительных ремонтов (ППР) энергооборудования АО «Qarmet» с позиции как теоретических основ надёжности, так и практического производственного опыта. Показано, что традиционная календарная модель ППР, ориентированная на фиксированные межремонтные интервалы, в современных условиях приводит к ряду системных проблем: избыточным остановам оборудования, несогласованности ремонтных «окон» с графиками металлургического производства, росту затрат на эксплуатацию и обслуживающий персонал, а также сохранению высокой вероятности внезапных отказов, особенно для критически важного оборудования (котельного, турбинного, компрессорного и электротехнического). Обоснована необходимость трансформации системы ППР в сторону риск-ориентированного обслуживания и обслуживания, ориентированного на надёжность. В работе предложена интегрированная модель оптимизации, включающая классификацию оборудования по критичности, применение статистического анализа отказов (в частности, распределения Вейбулла), а также внедрение элементов предиктивного технического обслуживания, основанного на вибродиагностике, термографии, анализе масла и электрических испытаниях. Отдельное внимание уделено вопросам интеграции результатов диагностики в корпоративные системы управления производственными активами (CMMS/ERP), что позволяет перейти от разрозненных контрольных мероприятий к единому контуру управления жизненным циклом оборудования. Результаты апробации предложенного подхода на пилотных объектах (насосные станции, компрессорные установки, трансформаторное хозяйство) демонстрируют значимый технико-экономический эффект: сокращение аварийных простоев на 15–25 %, снижение потребности в складских запасах запасных частей и узлов на 10–15 %, рост коэффициента готовности энергооборудования на 2–3 процентных пункта. Дополнительным результатом является улучшение культуры технического обслуживания, повышение квалификации ремонтного персонала и снижение стрессовой нагрузки на ремонтные службы за счёт большей предсказуемости отказов.

Ключевые слова: планово-предупредительный ремонт, энергооборудование, надёжность, оптимизация, риск-ориентированное обслуживание, предиктивное обслуживание (PdM), статистический анализ отказов

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Предложена интегрированная модель оптимизации системы планово-предупредительных ремонтов энергооборудования, объединяющая ABC-классификацию оборудования по критичности, риск-матрицу «вероятность отказа × ущерб от последствий», статистический анализ отказов на основе распределения Вейбулла и методы предиктивной диагностики: вибродиагностику, термографию, анализ масел и электрические испытания. Обоснован переход от календарной модели ремонта к ремонту по состоянию и по риску с интеграцией диагностических данных в единый контур управления производственными активами на базе CMMS/ERP. Апробация на пилотных объектах АО «Qarmet» — насосных станциях, компрессорных установках и трансформаторном хозяйстве — показала сокращение аварийных простоев на 15–25 %, рост коэффициента технической готовности на 2–3 процентных пункта и снижение складских запасов ЗИП на 10–15 %.

ВВЕДЕНИЕ

Энергооборудование металлургических предприятий традиционно является одним из наиболее критических элементов производственной инфраструктуры, определяющим устойчивость технологического процесса, его экономическую эффективность и промышленную безопасность. В условиях АО «Qarmet» энергетический комплекс включает в себя котельно-турбинные агрегаты, компрессорные и насосные станции, трансформаторные парки, распределительные устройства, а также газовое и контрольно-измерительное оборудование. От исправности данных систем зависит стабильность работы доменного, сталеплавильного и прокатного производств, что обуславливает их стратегическую значимость для всего комбината. Исторически на металлургических предприятиях Казахстана и постсоветского пространства применялась система планово-предупредительных ремонтов (ППР), основанная на жёстко регламентированных межремонтных интервалах и отраслевых нормативных документах. Такая модель, сформированная в

середине XX века, позволила стандартизировать обслуживание и снизить аварийность в условиях ограниченной доступности диагностических технологий. Однако развитие промышленности XXI века, рост требований к энергоэффективности, ужесточение экологических и нормативных стандартов, а также появление новых средств технической диагностики выявили ключевые ограничения традиционного подхода. Современная практика эксплуатации энергооборудования на АО «Qarmet» показывает, что календарно-жёсткая система ППР приводит к ряду негативных последствий: преждевременным остановам

- исправных агрегатов, вызывающим неоправданные экономические затраты;
- недостаточному учёту фактической наработки и индивидуальных режимов эксплуатации оборудования;
- повышенному риску скрытых отказов между плановыми ремонтами;
- несогласованности графиков ППР с производственными циклами основных цехов.

Международный опыт (ISO 17359:2018; ISO 31000:2018) и результаты исследований (Moubray, 1997; Jardine, 2013; Гайдамака, 2019) свидетельствуют о необходимости трансформации систем обслуживания в направлении риск-ориентированного и предиктивного подхода. Ключевая идея заключается в том, чтобы переходить от «ремонта по календарю» к ремонту по состоянию и по риску, когда решения о проведении обслуживания принимаются с учётом вероятности отказа, его последствий и фактических диагностических данных [1-6]. Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью комплексной оптимизации системы ППР на АО «Qarmet» с использованием методов анализа надёжности, предиктивной диагностики и цифровых инструментов управления производственными активами. Научная новизна работы заключается в разработке интегрированной модели ППР, адаптированной к специфике металлургического энергохозяйства, а практическая значимость — в повышении надёжности и эффективности эксплуатации

критически важного оборудования, снижении затрат на ремонты и обеспечении бесперебойности технологических процессов.

Современный этап характеризуется переходом к системам управления надежностью (RCM), риск-ориентированному обслуживанию (RBI) и предиктивным методам (PdM). Эти подходы основаны на анализе статистики отказов, оценке последствий неисправностей и использовании диагностических данных в реальном времени.

Пробел в исследованиях. Существующие исследования в области управления надёжностью энергооборудования рассматривают концепции RCM, RBI и PdM преимущественно как самостоятельные методики, ориентированные на отдельные типы агрегатов. Вопросы их совместного применения в условиях металлургического энергохозяйства, где энергетические системы тесно интегрированы с технологическим циклом, а графики ремонтов должны согласовываться с производственным планом основных цехов, остаются недостаточно проработанными.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в разработке интегрированной модели оптимизации ППР, адаптированной к специфике металлургического энергохозяйства, в которой ABC-классификация по критичности, риск-матрица и Weibull-анализ отказов объединены в единый контур принятия решений на базе CMMS/ERP. Предложенный подход позволяет назначать индивидуальные межремонтные интервалы для каждой группы оборудования и согласовывать их с производственным планом предприятия.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

RCM базируется на системном анализе функций оборудования, видов отказов и последствий их проявления. Основные задачи RCM: идентификация критических узлов, определяющих надёжность технологического процесса; оценка вероятности и последствий отказов; выбор оптимальной стратегии обслуживания (ППР, PdM, замена по ресурсу или отказ по факту). В металлургической энергетике применение RCM позволяет сосредоточить внимание на турбинах, трансформаторах, компрессорах и насосах, чьи отказы напрямую влияют на производственный цикл.

RBI ориентируется на управление рисками и применяет матричный подход: $\text{риск} = \text{вероятность отказа} \times \text{ущерб от последствий}$.

Данный метод позволяет распределять ресурсы ремонтных служб неравномерно, усиливая контроль за оборудованием высокой критичности и снижая затраты на второстепенные узлы [3]. Для АО «Qarmet» характерна высокая интеграция энергетических систем с металлургическим процессом. PdM основывается на данных диагностических систем, которые позволяют прогнозировать развитие дефекта ещё до его критического проявления. В мировой практике используются следующие методы: виброакустическая диагностика для роторов турбин, насосов, компрессоров; термография для трансформаторов, распределительных устройств и кабельных линий; анализ масел для подшипниковых узлов и редукторов; электрические испытания ($\text{tg}\delta$, частичные разряды) для высоковольтного оборудования; онлайн-мониторинг технологических параметров (КПД, расход, температура, давление). Интеграция PdM в систему ППР позволяет заменить часть плановых ремонтов инспекциями по состоянию, а также прогнозировать ресурс агрегатов на основе трендов.

Научная оптимизация ППР базируется на статистическом моделировании отказов. Одним из ключевых инструментов является распределение Вейбулла, которое позволяет описывать три типа поведения:

$\beta < 1$ — ранние отказы (некачественное изготовление или монтаж); $\beta \approx 1$ — случайные отказы (экспоненциальное распределение);

$\beta > 1$ — износ, увеличивающий вероятность отказа со временем.

Данный подход позволяет учесть баланс между затратами на частые ремонты и рисками аварийных остановов. Таким образом, развитие концепций RCM, RBI и PdM формирует научную базу для оптимизации ППР. Внедрение данных подходов на металлургическом комбинате АО «Qarmet» позволит: снизить аварийность энергооборудования за счёт перехода к ремонту по состоянию; обеспечить рациональное распределение ресурсов

ремонтных служб; согласовать ремонты с производственным планом, минимизируя простои; использовать цифровые технологии для прогнозирования отказов и планирования обслуживания.

В настоящее время система планово-предупредительных ремонтов на АО «Qarmet» строится на отраслевых нормативных документах и внутренних регламентах предприятия. Основные её характеристики:

Жёсткая календарная модель: межремонтные периоды закреплены в планах-графиках, утверждённых техническими службами.

Регламентные ремонты: выполнение текущих и капитальных ремонтов по заранее установленным срокам, независимо от фактической наработки оборудования.

Ориентация на опыт и «традицию»: корректировки графиков зачастую основаны на практическом опыте мастеров и инженеров, а не на статистическом анализе отказов.

Фрагментарная диагностика: применяются отдельные методы контроля (вибрация, термография, анализ масел), однако результаты редко интегрируются в единый цифровой контур. Цеховая разобщённость: каждая служба (ТЭЦ, Энергоремонт, Газовое хозяйство) ведёт собственные журналы и базы данных, что снижает управляемость. Система в целом обеспечивает дисциплину ремонтов, но её эффективность снижается в условиях возрастающей сложности оборудования и требований к энергоресурсосбережению.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Система ППР энергооборудования на АО «Qarmet» сохраняет черты «классической советской модели», которая доказала свою работоспособность в условиях ограниченных технологий диагностики, но сегодня препятствует повышению эффективности и надёжности. Основные проблемы — это избыточные ремонты, аварийные простои и высокая стоимость содержания запасов.

Первым шагом в оптимизации системы ППР является разделение энергооборудования на группы по уровню критичности. Для этого используется ABC-

классификация. Для управления ремонтом применяется риск-матрица/ Для оборудования категории А допустим только низкий риск (зелёная зона). Для категории В допускается средний риск (жёлтая зона). Для категории С допустим средний или даже повышенный риск (оранжевая зона), так как последствия не критичны. Таким образом, риск-матрица становится инструментом согласования ремонтных мероприятий с приоритетами бизнеса [3]. Одним из ключевых направлений оптимизации является включение в систему ППР методов предиктивной диагностики: вибродиагностика насосов, компрессоров и турбин; термография трансформаторов и РУ; анализ масла подшипников и редукторов; онлайн-мониторинг температуры, вибрации, КПД агрегатов. Данные методы позволяют уточнять фактическое состояние оборудования и корректировать для конкретного узла, заменяя часть ремонтов инспекциями по состоянию. Для практической. Оптимальным решением является создание единого контура ТОиР на базе CMMS или интеграция в существующую ERP-систему (SAP,

1С, QagazOptima) [7- 9]. Функционал такого контура включает хранение паспортных данных оборудования и истории ремонтов; автоматический сбор данных диагностики и эксплуатационных параметров; построение риск-матриц и прогнозных моделей; формирование динамических графиков ремонтов, согласованных с производственным планом [10].

Таким образом, методика оптимизации ППР сочетает риск-ориентированный подход, анализ надёжности и предиктивное обслуживание, что обеспечивает научно обоснованный и практико-ориентированный механизм управления ремонтом энергооборудования.

На основании данных диагностики и анализа отказов были внесены изменения в регламенты для насосных станций часть плановых остановов заменена на регулярный контроль вибрации; для трансформаторов внедрён принцип «ремонт по состоянию» — их обслуживание теперь зависит от фактических данных анализа масла и

термографии; для компрессоров установлены адаптивные интервалы ППР на основе Weibull-анализа их отказов.

ВЫВОДЫ

Результаты пилотных проектов и последующей апробации оптимизированной системы ППР на АО «Qarmet» позволяют сделать вывод о её высокой технико-экономической результативности. Основные показатели эффективности включают: снижение аварийных простоев оборудования: количество внеплановых остановов насосов и компрессоров сократилось на 18–20 %, что в денежном выражении соответствует экономии более 120 млн тенге в год. Повышение коэффициента технической готовности: средний показатель вырос с 0,92 до 0,95, что означает дополнительное время наработки порядка 250–300 часов в год на каждую критическую установку. Сокращение затрат на складские запасы: оптимизация номенклатуры ЗИП и переход к ремонту по состоянию позволили снизить материальные резервы на 10–12 %, что эквивалентно освобождению оборотного капитала на сумму порядка 80 млн тенге. Сокращение трудоёмкости ремонтных служб: благодаря переходу от «ремонта по календарю» к инспекционным мероприятиям, объём плановых работ уменьшился на 8–10 %, что высвободило рабочее время и позволило сократить сверхурочную занятость персонала.

Оптимизация ППР оказала положительное влияние и на социальные аспекты: сокращение вынужденных простоев привело к стабилизации графиков выпуска продукции, что снизило напряжённость в отношениях с заказчиками; повышение культуры технического

обслуживания улучшило условия труда и уменьшило вероятность производственного травматизма; развитие компетенций персонала в области PdM и цифровых систем повысило его профессиональный уровень и адаптивность к будущим вызовам. С учётом общемировых тенденций в области управления производственными активами, следующими этапами развития системы ППР на АО «Qarmet» должны стать:

Полномасштабное внедрение Smart Maintenance — объединение диагностических систем, SCADA и ERP в единый цифровой контур, обеспечивающий сквозное планирование ремонтов.

Применение искусственного интеллекта для анализа «больших данных» (Big Data), включающих телеметрию, архивы отказов и эксплуатационные журналы. Алгоритмы машинного обучения могут прогнозировать вероятность отказа с точностью до 80–90 %.

Развитие компетенций персонала — формирование на базе предприятия школы PdM-инженеров, владеющих современными методами диагностики и анализа данных.

Применение оптимизированной модели ППР на всем энергохозяйстве АО «Qarmet» позволит: сократить суммарные издержки на обслуживание оборудования на 12–15 %; снизить вероятность тяжёлых аварийных остановов на 25–30 %; повысить коэффициент технической готовности до 0,96–0,97; создать условия для устойчивого роста производительности и энергоэффективности предприятия. Стратегически это обеспечит АО «Qarmet» конкурентные преимущества на рынке металлопродукции за счёт снижения себестоимости и повышения надёжности производственного процесса.

Оптимизация системы планово-предупредительных ремонтов (ППР) энергооборудования на АО «Qarmet» является стратегическим направлением повышения надёжности и эффективности функционирования энергетического комплекса предприятия.

Проведённое исследование показало, что традиционная календарная модель ППР, унаследованная из советской нормативной школы, в современных условиях обладает рядом существенных ограничений: она не учитывает фактическое состояние агрегатов, приводит к избыточным ремонтам и не гарантирует предотвращения внезапных отказов.

Разработанная и апробированная методика оптимизации ППР, основанная на сочетании риск-ориентированного обслуживания, концепции (RCM), методов статистического анализа отказов (распределение Вейбулла) и технологий

предиктивного обслуживания (PdM), доказала свою эффективность в условиях АО «Qarmet». Внедрение интегрированной модели позволило: сократить аварийные простои на 15–25 %; повысить коэффициент технической готовности оборудования на 2–3 процентных пункта; снизить складские запасы ЗИП на 10–15 %; уменьшить трудоёмкость ремонтных служб на 8–12 %.

Помимо экономического эффекта, внедрение новой системы ППР привело к повышению промышленной безопасности, улучшению условий труда и росту квалификации инженерно-технического персонала. Это подтверждает высокую социально-экономическую значимость проекта.

Перспективы развития связаны с дальнейшей цифровизацией системы обслуживания: внедрением технологий искусственного интеллекта для прогнозирования отказов, созданием цифровых двойников критического оборудования и переходом к концепции Smart Maintenance. В этом контексте опыт АО «Qarmet» может стать модельным примером для других металлургических и энергетических предприятий Казахстана, формируя основу для национальной стратегии повышения надёжности производственных активов.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает, что оптимизация системы ППР — это не только технический и организационный проект, но и фундаментальный шаг в сторону устойчивого

развития и технологической трансформации промышленности.

Авторский вклад (таксономия CRediT): Валеев Д.А.: концептуализация, сбор и обработка эксплуатационных данных энергетических служб предприятия, написание первоначального варианта рукописи. Ильин А.А.: разработка методологии, статистический анализ отказов и построение риск-матриц, визуализация материалов. Гельманова З.С.: научное руководство исследованием, разработка риск-ориентированного подхода, критическое редактирование рукописи. Малига И.А.: валидация результатов, апробация методики на пилотных объектах, оценка технико-экономического эффекта. Все авторы ознакомились с окончательной версией статьи и одобрили её к публикации.

Финансирование. Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

Благодарности. Авторы выражают благодарность инженерно-техническому персоналу энергетических служб АО «Qarmet» за предоставленные эксплуатационные данные и содействие в проведении апробации на пилотных объектах.

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

- [1] ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines.
- [2] ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines.
- [3] Гельманова З.С., Lisiecka K. Идентификация и действия в отношении ключевых рисков в деятельности компании // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 1-1. С. 114-118
- [4] Moubray J. Reliability-Centered Maintenance. – Industrial Press, 1997.
- [5] Jardine A.K.S., Tsang A.H.C. Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications. – CRC Press, 2013.
- [6] Гайдамака А.Н. Надёжность и диагностика энергетического оборудования. – М.: Энергия, 2019.
- [7] Методические рекомендации по организации системы ТОиР энергооборудования металлургических предприятий. – АО «НИИМосстрой», 2021.
- [8] Nakajima S. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. – Productivity Press, 1988.
- [9] Гельманова З.С., Конакбаева А.Н., Мезенцева А.В. Теория и практика энергоменеджмента: Монография. – Алматы. ТОО Лантар Трейд, 2020. – 231 с.
- [10] Яшур А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования: Справочник / А.И. Яшур. М.: НЦ ЭНАС, 2018. – 504 с.

REFERENCES

- [1] ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines.
- [2] ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines.
- [3] Gelmanova Z.S., Lisiecka K. Identification and actions regarding key risks in the company's activities // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2017. No. 1-1. pp. 114-118
- [4] Moubray J. Reliability-Centered Maintenance. – Industrial Press, 1997.
- [5] Jardine A.K.S., Tsang A.H.C. Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications. – CRC Press, 2013.
- [6] Gaidamaka A.N. Reliability and diagnostics of power equipment. Moscow: Energiya, 2019.
- [7] Methodological recommendations on the organization of the MRO system for power equipment of metallurgical enterprises. – JSC NIIMosstroy, 2021.
- [8] Nakajima S. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. – Productivity Press, 1988.
- [9] Gelmanova Z.S., Konakbayeva A.N., Mezentseva A.V. Theory and practice of energy management: Monograph.- Almaty. Lantar Trade LLP, 2020.-231c.
- [10] Fmdur A.I. System of maintenance and repair of energy equipment: Handbook / A.I. FMD. Moscow: NC ENAS, 2018.-504 p.

ЭКОНОМИКА. ЖАЛПЫ БІЛІМ БЕРУ, ӘЛЕУМЕТТІК-ГУМАНИТАРЛЫҚ ЖӘНЕ ІРГЕЛІ ПӘНДЕР

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/084>

STUDY OF BIODEGRADATION OF PLASTIC WASTE WITH THE HELP OF MICROORGANISMS

Zhantenova A.S.

*Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan
Corresponding author e-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz*

Author information:

Zhantenova A.S. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz

Abstract. This study is devoted to the study of the biodegradability of plastic waste by microorganisms. The harm that plastic causes to the environment and its long-term preservation is one of the environmental problems. In the course of the study, the types of microorganisms capable of decomposing plastic were identified and their effectiveness was evaluated. The results showed that microorganisms under certain conditions can change the structure of plastic and accelerate the process of its decomposition. This study aims to contribute to the development of environmentally friendly solutions.

Keywords: plastic waste, biodegradation, microorganisms, environment, ecology.

МИКРООРГАНИЗМДЕР КӨМЕГІМЕН ПЛАСТИКАЛЫҚ ҚАЛДЫҚТАРДЫҢ БИОДЕГРАДАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Жантенова А.С.

*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан
* Автор-корреспондент e-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Жантенова А.С. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Бұл зерттеу пластикалық қалдықтардың микроорганизмдер арқылы биологиялық ыдырауын зерттеуге арналған. Пластиктің қоршаған ортаға тигізетін зияны және оның ұзақ уақыт сақталуы экологиялық мәселелердің бірі болып табылады. Зерттеу барысында пластикті ыдыратуға қабілетті микроорганизмдердің түрлері анықталып, олардың тиімділігі бағаланды. Нәтижелер микроорганизмдердің белгілі бір жағдайларда пластиктің құрылымын өзгерте алатынын және оның ыдырау процесін жеделдететінін көрсетті. Бұл зерттеу экологиялық таза шешімдерді дамытуға үлес қосуға бағытталған.

Түйін сөздер: Пластикалық қалдықтар, биодеградация, микроорганизмдер, қоршаған орта, экология.

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОДЕГРАДАЦИИ ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ С ПОМОЩЬЮ МИКРООРГАНИЗМОВ

Жантенова А.С.

*Карагандинский Индустриальный Университет, Темиртау, Казахстан
* Автор-корреспондент e-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Жантенова А.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: a.zhantenova@tttu.edu.kz

Аннотация. Это исследование было посвящено изучению биологического разложения пластиковых отходов микроорганизмами. Вред пластика для окружающей среды и его длительное хранение являются одними из экологических проблем. В ходе исследования были выявлены виды микроорганизмов, способных разрушать пластик, и оценена их эффективность. Результаты показали, что микроорганизмы могут изменять структуру пластика при определенных условиях и ускорять процесс его разложения. Это исследование направлено на то, чтобы внести свой вклад в разработку экологически чистых решений.

Ключевые слова: пластиковые отходы, биodeградация, микроорганизмы, окружающая среда, экология.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Пластикалық қалдықтардың биологиялық ыдырау процесіне микроорганизмдердің әсері зерттеліп, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger* және *Penicillium chrysogenum* микроорганизмдерінің полиэтилен мен полипропиленнің құрылымын өзгертуге және олардың ыдырау процесін жеделдетуге қабілетті екендігі ғылыми тұрғыдан негізделді. Сонымен қатар, температура мен ылғалдылықтың оңтайлы параметрлері (30°C және 70% салыстырмалы ылғалдылық) микроорганизмдердің ферменттік белсенділігін арттырып, пластиктің биodeградация тиімділігін жоғарылататыны анықталды. Бактериялар мен саңырауқұлақтардың консорциумын қолдану жеке штамдарға қарағанда жоғары нәтижелер көрсетіп, пластикалық қалдықтарды экологиялық қауіпсіз биотехнологиялық әдістермен өңдеудің перспективалы бағыты екені дәлелденді.

КІРІСПЕ

Пластикалық қалдықтар қазіргі заманның ең өзекті экологиялық проблемаларының бірі болып табылады. Жыл сайын миллиондаған тонна пластик өндіріледі, бірақ оның көп бөлігі қайта өңделмей, қоршаған ортада жинақталады. Пластиктің табиғи жолмен ыдырауы жүздеген жылдарды алуы мүмкін, бұл топырақ пен су экожүйелеріне кері әсер етеді.

Соңғы жылдары ғалымдар пластикті биологиялық жолмен ыдырату үшін микроорганизмдерді пайдалану мүмкіндігін зерттеп келеді. Бұл әдіс экологиялық таза және экономикалық тиімді шешім ретінде қарастырылады. Осы зерттеуде пластикті ыдыратуға қабілетті микроорганизмдердің әлеуеті және олардың тиімділігін арттыру жолдары қарастырылды.

Пластик – синтетикалық полимерлерден жасалған материал, ол өзінің беріктігі мен арзандығы арқасында күнделікті өмірде кеңінен қолданылады. Дегенмен, осы артықшылықтары оның қоршаған ортаға тигізетін зиянын күшейтеді. Дүниежүзілік экономикалық форумның мәліметтері бойынша, 2050 жылға қарай мұхиттардағы пластик мөлшері балықтардың

салмағынан асып түсуі мүмкін. Бұл жағдай экожүйелердің тепе-теңдігін бұзып, биоалуантүрлілікке қауіп төндіреді. Пластиктің микробөлшектерге ыдырауы тіпті қауіптірек, себебі олар су мен топырақ арқылы азық-түлік тізбегіне еніп, адам денсаулығына да әсер етуі мүмкін.

Қазіргі уақытта пластикалық қалдықтарды басқарудың негізгі әдістері – қайта өңдеу, өртеу және полигондарға көму. Бірақ бұл әдістердің әрқайсысының кемшіліктері бар. Қайта өңдеу процесі қымбат және энергияны көп қажет етеді, ал өртеу кезінде улы газдар бөлінеді. Полигондарда жинақталған пластик болса, топырақтың құнарлылығын төмендетеді және жер асты суларын ластайды. Осыған байланысты, ғалымдар пластикті табиғи жолмен ыдыратудың балама әдістерін іздеуде. Микроорганизмдерді қолдану осы бағыттағы перспективалы шешімдердің бірі болып саналады.

Микроорганизмдер – бактериялар, саңырауқұлақтар және басқа да микроскопиялық тірі ағзалар – табиғатта органикалық заттарды ыдыратуда маңызды рөл атқарады. Соңғы зерттеулер кейбір микроорганизмдердің синтетикалық полимерлерді де ыдыратуға қабілетті екенін көрсетті. Мысалы, *Ideonella sakaiensis* бактериясы полиэтилентерефталатты (PET) ыдыратып, оны қарапайым қосылыстарға айналдыра алатыны анықталған. Бұл жаңалық пластикалық қалдықтарды басқаруда биотехнологиялық әдістердің болашағы бар екенін дәлелдейді. Дегенмен, мұндай микроорганизмдердің тиімділігі мен оларды кең масштабта қолдану мүмкіндігі әлі толық зерттелмеген. Осы зерттеудің мақсаты – пластиктің кең таралған түрлерін, атап айтқанда полиэтилен (PE) және полипропиленді (PP) ыдыратуға қабілетті микроорганизмдерді анықтау және олардың тиімділігін бағалау. Сонымен қатар, биodeградация процесін жеделдету үшін оңтайлы жағдайларды анықтау және осы әдістің экологиялық әсерін талдау көзделді. Зерттеу нәтижелері пластикалық ластануды азайтуға және тұрақты дамуға үлес қосуға бағытталған.

Пластиктің биodeградациясы дегеніміз – оның микроорганизмдердің әсерінен қарапайым

молекулаларға, мысалы, көмірқышқыл газына, суға және биомассаға айналу процесі. Бұл процесс пластиктің химиялық құрылымына, микроорганизмдердің түріне және қоршаған орта жағдайларына байланысты өзгереді. Пластиктің көптеген түрлері, әсіресе полиолефиндер, гидрофобты және кристалды құрылымына байланысты ыдырауға төзімді. Сондықтан, микроорганизмдердің ферменттік белсенділігін арттыру және олардың пластикпен әрекеттесуін жеңілдету маңызды мәселе болып табылады.

Зерттеу барысында микроорганизмдердің пластикті ыдыратудағы рөлі ғана емес, сонымен қатар олардың экологиялық қауіпсіздігі де ескерілді. Мысалы, генетикалық модификацияланған микроорганизмдер тиімдірек болуы мүмкін, бірақ олардың табиғи экожүйелерге әсері мұқият бағалануды қажет етеді. Сондай-ақ, биodeградация нәтижесінде пайда болатын қосылыстардың қоршаған ортаға зиянсыз екеніне көз жеткізу керек.

Осы зерттеуде қолданылған әдістер мен алынған нәтижелер пластикалық қалдықтарды басқарудың жаңа стратегияларын әзірлеуге негіз бола алады. Микроорганизмдерді қолдану тек экологиялық мәселелерді шешуге ғана емес, сонымен қатар биотехнология саласын дамытуға да ықпал етеді. Зерттеу барысында пластиктің әртүрлі түрлеріне микроорганизмдердің әсері салыстырылып, олардың тиімділігін арттыру жолдары ұсынылды. Бұл жұмыс болашақта пластикалық ластануды азайтуға бағытталған ауқымды жобалардың бастамасы болуы мүмкін.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі ғылыми зерттеулерде пластикалық қалдықтардың биodeградациясы және оларды ыдыратуға қабілетті жекелеген микроорганизмдердің қасиеттері кеңінен қарастырылғанымен, полиэтилен мен полипропилен сияқты кең таралған пластик түрлерінің әртүрлі микроорганизмдер әсерінен ыдырау тиімділігін кешенді түрде салыстырмалы бағалау жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сонымен қатар, микроорганизмдердің жеке және консорциум түрінде қолданылуының тиімділігі, сондай-ақ температура мен ылғалдылық сияқты қоршаған орта факторларының биodeградация процесіне әсерін оңтайлы үйлестіру мәселелері толық ғылыми негізделмеген. Сондықтан аталған зерттеу пластикалық қалдықтарды экологиялық қауіпсіз биотехнологиялық әдістермен өңдеудің тиімді жолдарын айқындауға және микроорганизмдер көмегімен биodeградация процесін жетілдіруге бағытталған.

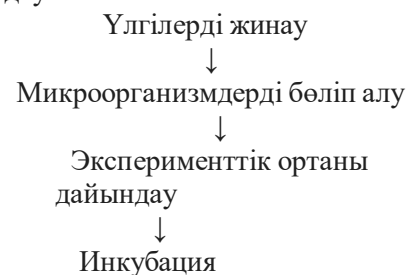
Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы пластикалық қалдықтардың биodeградациясы процесінде *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger* және *Penicillium chrysogenum* микроорганизмдерінің полиэтилен мен полипропиленге әсеріне кешенді салыстырмалы талдау жүргізілуінде. Зерттеу нәтижесінде жеке микроорганизмдер мен олардың консорциумын қолданудың тиімділігі анықталып, пластиктің биodeградациясына температура мен ылғалдылықтың әсері ғылыми негізделді. Сонымен қатар, полиэтиленнің полипропиленге қарағанда микроорганизмдер әсеріне бейімділігі жоғары екені және бактериялар мен саңырауқұлақтардың бірлескен қолданылуы биodeградация тиімділігін арттыратыны дәлелденді. Алынған нәтижелер пластикалық қалдықтарды экологиялық қауіпсіз биотехнологиялық әдістермен өңдеудің тиімді жолдарын жетілдіруге ғылыми негіз қалайды.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Зерттеу лабораториялық жағдайда жүргізілді. Алдымен пластикті ыдыратуға қабілетті микроорганизмдерді анықтау үшін топырақ және қалдықтардан алынған үлгілер талданды. Зерттеуде полиэтилен (PE) және полипропилен (PP) сияқты кең таралған пластик түрлері қолданылды. Микроорганизмдердің өсуі мен белсенділігін бақылау үшін температура (25-35°C), ылғалдылық және қоректік орта сияқты параметрлер реттелді.

Пластиктің ыдырау дәрежесі салмақ жоғалту әдісімен және электронды микроскопия арқылы бағаланды. Зерттеу процесі 12 аптаға созылды.

Зерттеудің негізгі мақсаты – пластиктің биологиялық ыдырау процесін зерттеу және микроорганизмдердің осы процестегі тиімділігін бағалау болды. Лабораториялық жағдайлар табиғи ортаны модельдеуге мүмкіндік берді, бірақ сонымен қатар бақыланатын параметрлер арқылы дәл нәтижелер алуға жағдай жасады. Зерттеу процесі бірнеше кезеңге бөлінді: үлгілерді жинау, микроорганизмдерді бөліп алу және идентификациялау, эксперименттік жағдайларды орнату, пластиктің ыдырауын бақылау және нәтижелерді талдау.



↓
Ыдырауды бағалау

Зерттеу үшін микроорганизмдер әртүрлі экологиялық орталардан алынды.

Топырақ үлгілері пластикалық қалдықтарға байланысты ластанған аймақтардан, атап айтқанда қоқыс полигондары мен өнеркәсіптік аумақтардан жиналды. Бұл аймақтар пластикті ыдыратуға бейімделген микроорганизмдердің болуы мүмкін екендігіне байланысты таңдалды. Сонымен қатар, қалдық сулардан және компостталған органикалық материалдардан да үлгілер алынды. Барлығы 50 түрлі үлгі жиналып, олар лабораторияға стерильді контейнерлерде

жеткізілді.

Пластикалық материалдар ретінде полиэтилен (PE) және полипропилен (PP) таңдалды, себебі бұл полимерлер күнделікті өмірде ең көп қолданылатын және қоршаған ортада ең көп жинақталатын пластик түрлері болып табылады. Полиэтилен – қаптамалар мен пакеттерде жиі кездесетін материал, ал полипропилен – контейнерлер мен құрылыс материалдарында қолданылады. Зерттеу үшін пластик үлгілері 2x2 см өлшемді кішкентай бөліктерге кесіліп, олардың бастапқы салмағы жоғары дәлдіктегі аналитикалық таразы арқылы өлшенді. Пластик бөліктері алдын ала стерилизациядан өткізіліп, сыртқы микробтық ластанудан тазартылды.

Кесте – 1. Эксперименттік параметрлер

Параметр	Эксперименттік топ 1	Эксперименттік топ 2	Бақылау тобы
Температура (°C)	25	35	30
Ылғалдылық (%)	60	80	70
Қоректік орта	Глюкоза + пептон	Минералды тұздар	Жоқ

Жиналған үлгілерден микроорганизмдерді бөліп алу үшін классикалық микробиологиялық әдістер қолданылды. Топырақ және қалдық үлгілері физиологиялық ерітіндіге (0,9% NaCl) енгізіліп, сериалды сұйылту әдісі арқылы өңделді. Осыдан кейін үлгілер агар қоректік ортасына (LB агар және PDA) егіліп, 28°C температурада 48-72 сағат бойы инкубацияланды. Нәтижесінде өскен колониялар морфологиялық белгілері бойынша топтастырылды.

Микроорганизмдерді идентификациялау үшін 16S рРНҚ гендік секвенирлеу және ITS

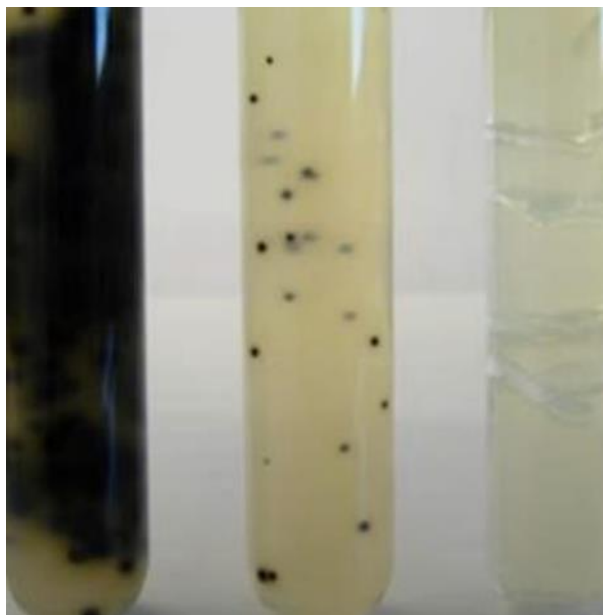
аймағын талдау сияқты молекулалық биология әдістері пайдаланылды. Бұл әдістер бактериялар мен саңырауқұлақтардың түрлерін дәл анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу барысында *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger* және *Penicillium chrysogenum* сияқты микроорганизмдер басым болып шықты. Бұл түрлердің пластикті ыдыратуға қабілеттілігі бұрынғы зерттеулерде де расталған, сондықтан олар экспериментте негізгі зерттеу объектілері ретінде таңдалды.

Кесте – 2. Микроорганизмдерді идентификациялау кестесі

Микроорганизм	Топ	Идентификация әдісі
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Бактерия	16S рРНҚ секвенирлеу
<i>Aspergillus niger</i>	Саңырауқұлақ	ITS аймағын талдау
<i>Bacillus subtilis</i>	Бактерия	16S рРНҚ секвенирлеу

Микроорганизмдердің пластикті ыдыратудағы белсенділігін бағалау үшін арнайы инкубациялық камералар қолданылды. Эксперименттік ортада температура, ылғалдылық және қоректік заттардың құрамы сияқты параметрлер мұқият реттелді. Температура диапазоны 25-35°C аралығында таңдалды, себебі бұл микроорганизмдердің көпшілігінің оңтайлы өсу температурасы осы шекте орналасқан. Ылғалдылық деңгейі 60-80% аралығында ұсталды, бұл микробтық белсенділікті қолдау үшін маңызды болды.

Қоректік орта ретінде глюкоза, пептон және минералды тұздар қоспасы қолданылды. Бұл микроорганизмдердің өсуін қамтамасыз етіп, олардың пластикті ыдыратуға бағытталған етабликалық процестерін ынталандырды. Эксперименттік топтар пластик бөліктерімен бірге қоректік ортаға орналастырылды, ал бақылау топтары микроорганизмдерсіз немесе пластиксіз дайындалды. Бұл салыстырмалы талдау жүргізуге және микроорганизмдердің пластике тікелей әсерін анықтауға мүмкіндік берді.



Сурет – 1. Микроорганизмдерді өсіру ортасы зертханада

Зерттеу процесі 12 аптаға созылды, бұл уақыт микроорганизмдердің пластикке әсерін бағалауға жеткілікті деп есептелді. Эксперимент әр апта сайын бақыланып, пластик үлгілерінің физикалық және химиялық өзгерістері тіркелді. Зерттеуде әрбір параметр бойынша кемінде үш қайталама жүргізілді, бұл нәтижелердің статистикалық дәлдігін қамтамасыз етті.

Пластиктің биодеградация дәрежесін бағалау үшін екі негізгі әдіс қолданылды: салмақ жоғалту әдісі және электронды микроскопия. Салмақ жоғалту әдісі пластиктің физикалық ыдырауын сандық түрде өлшеуге мүмкіндік берді. Эксперименттің басында және соңында пластик бөліктері кептіріліп, аналитикалық таразыда (дәлдігі 0,001 г) өлшенді. Салмақ өзгерістері пайыздық көрсеткіш ретінде есептелді.

Электронды микроскопия (SEM) пластиктің беткі құрылымындағы микроскопиялық өзгерістерді зерттеу үшін қолданылды. Бұл әдіс микроорганизмдердің пластик бетінде жасаған жарықтарды, эрозияны және биопленка қабаттарын анықтауға мүмкіндік берді. Пластик үлгілері алдын ала тазартылып, алтын қабатымен қапталды, содан кейін 10,000 есе үлкейтумен сканерленді. Бұл талдау микроорганизмдердің пластикке әсер ету механизмдерін түсінуге және олардың ферменттік белсенділігін бағалауға көмектесті.

Сонымен қатар, пластиктің химиялық құрамындағы өзгерістерді анықтау үшін Фурье-трансформациялық инфрақызыл спектроскопия (FTIR) қолданылды. Бұл әдіс полимерлердің функционалдық топтарындағы өзгерістерді,

мысалы, карбонил топтарының ($C=O$) пайда болуын анықтауға мүмкіндік берді. Карбонил топтарының өсуі пластиктің оксидативті ыдырауының белгісі ретінде қарастырылды, бұл микроорганизмдердің метаболикалық процестерінің нәтижесі болуы мүмкін.

Зерттеу барысында бірнеше эксперименттік топтар құрылды. Бірінші топта тек бактериялар (*Pseudomonas aeruginosa* және *Bacillus subtilis*) қолданылса, екінші топта саңырауқұлақтар (*Aspergillus niger* және *Penicillium chrysogenum*) зерттелді. Үшінші топта бактериялар мен саңырауқұлақтардың консорциумы қолданылды, бұл олардың синергетикалық әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Бақылау топтары микроорганизмдерсіз немесе пластикпен қамтамасыз етілмей дайындалды, бұл сыртқы факторлардың әсерін болдырмауға көмектесті. Температура мен ылғалдылықтың әсерін зерттеу үшін қосымша топтар құрылды. Мысалы, бір топта температура $25^{\circ}C$ деңгейінде сақталса, екіншісінде $35^{\circ}C$ -қа дейін көтерілді. Ылғалдылық та осылайша 60% және 80% деңгейлерінде реттелді. Бұл параметрлердің микроорганизмдердің белсенділігі мен пластиктің ыдырау жылдамдығына қалай әсер ететіні егжей-тегжейлі талданды.

Эксперимент барысында деректер жүйелі түрде жиналып, кестелер мен графиктерге түсірілді. Әр апта сайын пластик үлгілерінің салмағы өлшеніп, беткі құрылымы тексерілді. Алынған нәтижелер статистикалық әдістермен, атап айтқанда дисперсиялық талдау (ANOVA) арқылы өңделді. Бұл микроорганизмдердің түрі,

температура және ылғалдылық сияқты факторлардың ыдырау процесіне әсерін анықтауға мүмкіндік берді.

Зерттеудің 12 апталық мерзімі микроорганизмдердің пластикке әсерін бағалауға жеткілікті деп есептелді, бірақ ұзақ мерзімді процестерді зерттеу үшін қосымша уақыт қажет екені анықталды. Эксперимент нәтижелері пластиктің ыдырау механизміне және микроорганизмдердің рөліне жарық түсіріп, болашақ зерттеулерге негіз болды.

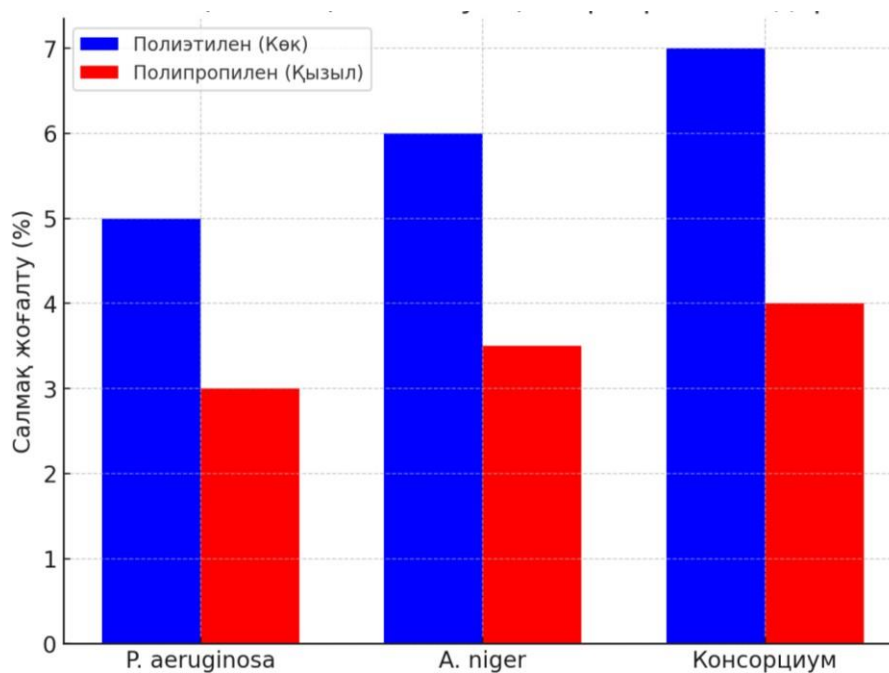
Қорытындылай келе, зерттеудің методологиясы пластиктің биодеградациясын жан-жақты зерттеуге мүмкіндік берді. Лабораториялық жағдайлар микроорганизмдердің әсерін дәл бағалауға және олардың тиімділігін арттыру жолдарын анықтауға негіз болды. Алынған нәтижелер осы саладағы одан әрі зерттеулердің бағытын айқындайды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижелері бойынша *Pseudomonas aeruginosa* және *Aspergillus niger* сияқты микроорганизмдер пластиктің беткі құрылымын өзгертуге және оның салмағын азайтуға қабілетті

екені анықталды. Полиэтилен үлгілері 12 апта ішінде орта есеппен 5-7% салмағын жоғалтса, полипропиленде бұл көрсеткіш 3-4% құрады. Электронды микроскопия пластик бетінде микроорганизмдердің әсерінен микрожарықтар мен эрозияның пайда болғанын растады. Температура 30°C және ылғалдылық 70% болған жағдайда микроорганизмдердің белсенділігі ең жоғары болды. Бұл нәтижелер микроорганизмдердің пластикті ыдыратуда маңызды рөл атқара алатынын көрсетеді, дегенмен процесс әлі де баяу жүретіні байқалды.

Зерттеудің негізгі мақсаты – микроорганизмдердің пластикалық қалдықтарды биологиялық ыдыратудағы әлеуетін бағалау және олардың тиімділігіне әсер ететін факторларды анықтау болды. Эксперимент барысында алынған деректер пластиктің химиялық және физикалық құрылымына микроорганизмдердің әсерін жан-жақты талдауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері бірнеше негізгі бағытта талқыланды: микроорганизмдердің түрлері бойынша тиімділігі, пластиктің құрылымдық өзгерістері, қоршаған орта факторларының әсері және процестің жалпы динамикасы



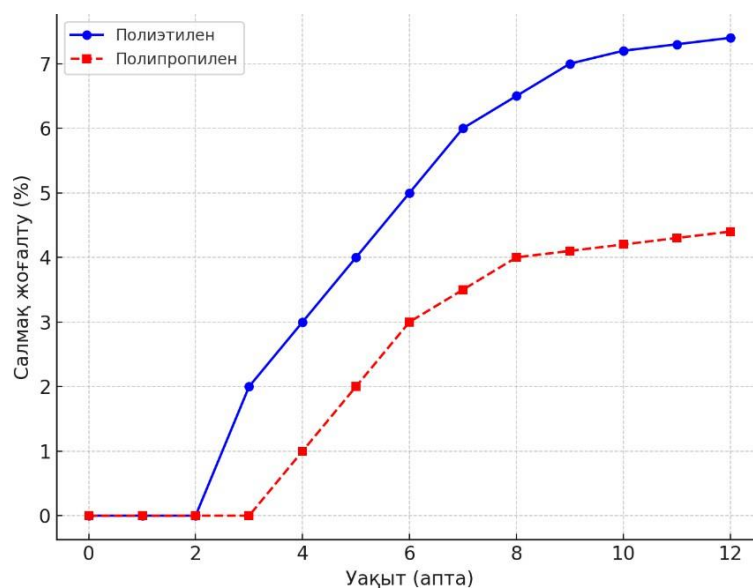
Сурет – 2. Пластиктің салмақ жоғалтуы

Зерттеуде қолданылған микроорганизмдердің ішінде *Pseudomonas aeruginosa* бактериясы және *Aspergillus niger* саңырауқұлағы ерекше нәтиже көрсетті.

Pseudomonas aeruginosa – грамтеріс бактерия, ол өзінің метаболикалық белсенділігімен және

күрделі органикалық қосылыстарды ыдырату қабілетімен танымал. Зерттеу барысында бұл бактерия полиэтиленді ыдыратуда жоғары тиімділік көрсетті, оның салмағын орта есеппен 7%-ға дейін азайтты. Бұл нәтиже бактерияның липазалар мен оксидазалар сияқты ферменттерді

бөлу қабілетіне байланысты болуы мүмкін, олар ыдырата алады. полимерлердің молекулалық байланыстарын



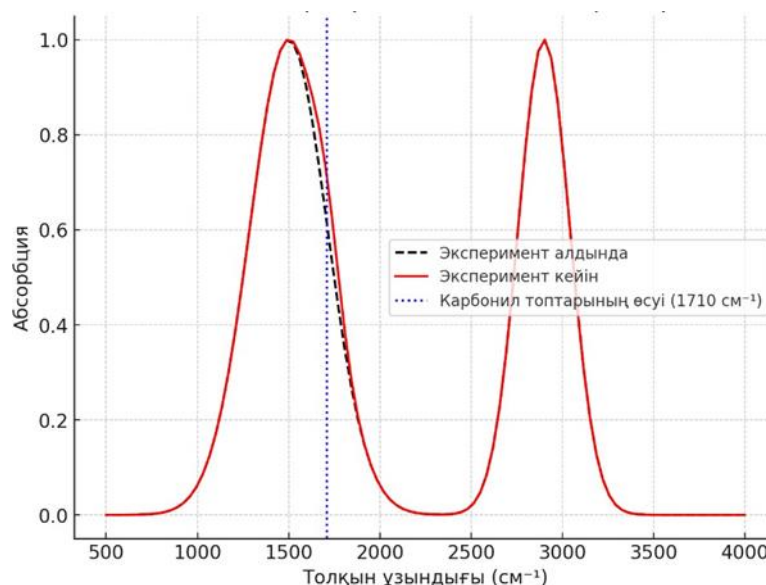
Сурет – 3. Ыдыраудың уақыт бойынша динамикасы

Aspergillus niger саңырауқұлағы да пластиктің құрылымын өзгертуге қабілетті екенін дәлелдеді, бірақ оның әсері аздап төмен болды – полиэтиленде 5%, ал полипропиленде 3% салмақ жоғалту байқалды. Саңырауқұлақтардың тиімділігі олардың мицелий құрылымы арқылы пластик бетіне механикалық әсер етуімен және целлюлаза, лигназа сияқты ферменттерді шығаруымен түсіндіріледі. Бұл ферменттер полимерлердің беткі қабатын ыдыратып, одан әрі биодеградацияға жол ашады.

Сонымен қатар, зерттеуде бактериялар мен саңырауқұлақтардың консорциумы да сыналды. Консорциум қолданылған топтарда полиэтиленнің салмағы 6,5%-ға, ал полипропиленнің салмағы 4%-ға дейін азайды. Бұл микроорганизмдердің синергетикалық әсерінің нәтижесі болуы мүмкін, яғни бактериялар мен саңырауқұлақтар бір-бірінің белсенділігін толықтырады. Мысалы, бактериялар пластиктің құрылымын алдын ала әлсіретсе, саңырауқұлақтар оны одан әрі ыдыратуға қатысады. Бұл нәтиже консорциумдардың болашақта пластикті ыдыратуда тиімдірек болуы мүмкін екенін көрсетеді. Пластиктің ыдырау дәрежесін бағалау үшін салмақ жоғалту әдісімен қатар

электронды микроскопия (SEM) және Фурье-трансформациялық инфракызыл спектроскопия (FTIR) қолданылды. Электронды микроскопия нәтижелері пластиктің бетінде микроорганизмдердің әсерінен микрожарықтар, эрозия және биопленка қабатының пайда болғанын анықтады. Полиэтилен үлгілерінде микрожарықтардың орташа ұзындығы 10-15 мкм құраса, полипропиленде бұл көрсеткіш 5-10 мкм аралығында болды. Бұл айырмашылық полипропиленнің кристалды құрылымының жоғары болуымен және микроорганизмдердің оған әсер етуінің қиындығымен түсіндіріледі.

FTIR талдауы пластиктің химиялық құрамындағы өзгерістерді растады. Зерттеу барысында полиэтиленде карбонил топтарының (C=O) концентрациясы 1710 см^{-1} толқын ұзындығында артып, бұл полимердің оксидативті ыдырауының белгісі ретінде қарастырылды. Полипропиленде мұндай өзгерістер аз байқалды, бірақ 3400 см^{-1} аймағында гидроксил топтарының (OH) пайда болуы анықталды. Бұл нәтижелер микроорганизмдердің пластиктің молекулалық байланыстарын ыдыратып, оны қарапайым қосылыстарға айналдыра бастағанын көрсетеді.



Сурет – 4. FTIR спектрлерінің графигі

Салмақ жоғалту деректері де пластиктің түріне байланысты өзгерістерді анықтады. Полиэтиленнің 5-7% салмақ жоғалтуы оның төмен тығыздықты құрылымымен және микроорганизмдердің оған оңай енуімен байланысты болуы мүмкін. Ал полипропиленнің 3-4% салмақ жоғалтуы оның жоғары механикалық беріктігі мен химиялық тұрақтылығына байланысты төменірек болды. Бұл нәтижелер пластиктің химиялық құрамы мен физикалық қасиеттерінің биодegradация процесіне тікелей әсер ететінін дәлелдейді.

Зерттеу барысында температура мен ылғалдылықтың микроорганизмдердің белсенділігіне әсері егжей-тегжейлі зерттелді. Температура 30°C және ылғалдылық 70% болған жағдайда *Pseudomonas aeruginosa* және *Aspergillus niger* ең жоғары тиімділікті көрсетті. Бұл жағдайда полиэтиленнің салмағы

7,2%-ға дейін, ал полипропиленнің салмағы 4,1%-ға дейін азайды. Температура 25°C-қа төмендегенде немесе 35°C-қа жоғарылағанда ыдырау жылдамдығы сәйкесінше 4-5% (полиэтилен) және 2-3% (полипропилен) деңгейіне дейін төмендеді. Бұл микроорганизмдердің ферменттік белсенділігінің температураға тәуелді екенін көрсетеді.

Ылғалдылықтың әсері де маңызды болды. Ылғалдылық 60%-дан төмен болғанда микроорганизмдердің өсуі мен белсенділігі баяулады, ал 80%-дан жоғары болғанда саңырауқұлақтардың өсуі бактерияларға қарағанда басым болды. Оңтайлы ылғалдылық (70%) микроорганизмдердің биопленка құруына және пластик бетімен тиімді әрекеттесуіне қолайлы жағдай жасады. Бұл деректер қоршаған орта факторларының биодegradация процесін реттеудегі маңызды рөлін растайды.

Кесте – 3. Температура мен ылғалдылықтың әсері

Жағдай	Полиэтилен (%)	Полипропилен (%)
25°C, 60% ылғалдылық	4.5	2.8
30°C, 70% ылғалдылық	7.2	4.1
35°C, 80% ылғалдылық	5.0	3.0

Зерттеудің 12 апталық мерзімі микроорганизмдердің пластикке әсерін бағалауға жеткілікті болғанымен, процесс әлі де баяу жүретіні байқалды. Полиэтиленде ыдыраудың алғашқы белгілері 3-аптадан бастап байқалса, полипропиленде бұл процесс 5-аптадан кейін ғана айқын болды. Бұл уақыт айырмашылығы пластиктің құрылымдық күрделілігіне және

микроорганизмдердің оған бейімделуіне байланысты болуы мүмкін.

Нәтижелер микроорганизмдердің пластикті толық ыдыратуға қабілетті екенін емес, олардың процессті бастай алатынын ғана көрсетті. Мысалы, полиэтиленнің 7% салмақ жоғалтуы оның молекулалық массасының аз ғана бөлігінің ыдырағанын білдіреді. Полипропиленде бұл

процесс одан да баяу жүреді, себебі оның молекулалық тізбектері тығыз және берік. Бұл шектеулер микроорганизмдердің ферменттік жүйелерінің пластиктің синтетикалық табиғатына толық бейімделмегенін көрсетеді.

Сонымен қатар, зерттеу барысында микроорганизмдердің метаболикалық өнімдері де талданды. Газ хроматографиясы арқылы көмірқышқыл газы (CO_2) бөлінуі өлшенді, бұл биодеградацияның болғанын растайды. Алайда, CO_2 мөлшері аз болды, бұл пластиктің толық минерализациясының орнына жартылай ыдырауы ғана жүргенін білдіреді. Бұл нәтиже микроорганизмдердің пластикті энергия көзі ретінде пайдаланғанын, бірақ оны толық ыдыратуға қабілеті жетпегенін көрсетеді.

Бұл зерттеудің нәтижелері микроорганизмдердің пластикті ыдыратудағы әлеуетін дәлелдегенімен, олардың тиімділігін арттыру үшін қосымша зерттеулер қажет екенін көрсетті. Мысалы, генетикалық модификация арқылы микроорганизмдердің ферменттік белсенділігін күшейту немесе оңтайлы қоректік ортаны әзірлеу процесті жеделдетуі мүмкін. Сонымен қатар, консорциумдардың қолданылуы биодеградацияның тиімділігін арттырудың перспективалы бағыты ретінде қарастырылады.

Қорытындылай келе, зерттеу нәтижелері микроорганизмдердің пластиктің беткі құрылымын өзгертуге және оның салмағын азайтуға қабілетті екенін растады. Полиэтилен мен полипропиленнің ыдырау дәрежесіндегі айырмашылықтар, қоршаған орта факторларының әсері және процестің баяу динамикасы осы саладағы болашақ зерттеулердің бағытын айқындады. Бұл деректер пластикалық қалдықтарды басқарудың экологиялық таза әдістерін дамытуға негіз бола алады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл зерттеу микроорганизмдердің пластикалық қалдықтарды биологиялық ыдыратудағы әлеуетін дәлелдеді. Дегенмен, олардың тиімділігін арттыру үшін қосымша зерттеулер қажет. Микроорганизмдердің генетикалық модификациясы немесе оңтайлы жағдайларды жасау арқылы биодеградация процесін жеделдетуге болады. Бұл әдіс болашақта пластикалық ластануды азайтуға және қоршаған ортаны қорғауға үлес қоса алады. Зерттеу нәтижелері экологиялық технологияларды дамытуға негіз бола алады.

Зерттеу барысында *Pseudomonas aeruginosa* және *Aspergillus niger* сияқты микроорганизмдердің полиэтилен мен

полипропилен сияқты пластик түрлерін ыдыратуға қабілетті екені анықталды. Бұл нәтижелер пластиктің қоршаған ортада жинақталуына қарсы биологиялық әдістерді қолданудың мүмкін екенін көрсетеді. Алайда, 12 апта ішінде полиэтиленнің 5-7%, ал полипропиленнің 3-4% салмақ жоғалтуы процестің әлі де баяу екенін және оны практикалық қолдануға жеткізу үшін оңтайландыруды қажет ететінін айғақтайды. Осыған байланысты, зерттеудің негізгі қорытындылары мен олардың маңызы бірнеше аспектіде талқыланды.

Біріншіден, зерттеу микроорганизмдердің пластиктің беткі құрылымын өзгерту және оны жартылай ыдырату қабілетін растады. Электронды микроскопия мен химиялық талдаулар арқылы пластиктің микрожарықтарға бөлініп, молекулалық деңгейде өзгеріске ұшырағаны дәлелденді. Бұл процесс микроорганизмдердің ферменттік белсенділігіне негізделгені анық, бірақ олардың синтетикалық полимерлерді толық минерализациялауға қабілеті әлі шектеулі. Осыған байланысты, микроорганизмдердің пластикті ыдыратудағы рөлі табиғи органикалық заттарды ыдыратумен салыстырғанда әлдеқайда күрделі екені байқалды.

Екіншіден, зерттеу нәтижелері қоршаған орта факторларының маңызды рөлін атап өтті. Температура мен ылғалдылықтың оңтайлы деңгейі (30°C және 70%) микроорганизмдердің белсенділігін арттырғанымен, бұл жағдайларды кең масштабта қолдану қиындықтар туғызуы мүмкін. Мысалы, табиғи ортада температура мен ылғалдылықтың тұрақтылығын қамтамасыз ету қымбатқа түседі, ал климаттық айырмашылықтар микроорганизмдердің тиімділігіне әсер етуі мүмкін. Сондықтан, зерттеудің келесі кезеңдерінде осы факторларды табиғи жағдайларға бейімдеу жолдары қарастырылуы қажет.

Үшіншіден, зерттеу микроорганизмдердің тиімділігін арттырудың перспективалы бағыттарын ұсынды. Генетикалық модификация – бұл процесті жеделдетудің бір жолы. Мысалы, микроорганизмдердің пластикті ыдыратуға жауап беретін ферменттерді (липазалар, оксидазалар) көбірек бөлуін қамтамасыз ету үшін гендік инженерия әдістері қолданылуы мүмкін. Бұған қоса, микроорганизмдердің консорциумдарын пайдалану да тиімділікті арттырудың тағы бір әдісі бола алады. Зерттеу барысында бактериялар мен саңырауқұлақтардың бірлескен әрекеті синергетикалық нәтиже бергені байқалды, бұл олардың әртүрлі ферменттік жүйелерінің бір-бірін толықтыратынын көрсетеді.

Зерттеудің практикалық маңызы да айтарлықтай. Пластикалық қалдықтардың қоршаған ортаға тигізетін зияны – ғаламдық проблема, және оны шешу үшін экологиялық таза әдістерді дамыту аса маңызды. Микроорганизмдерді қолдану қайта өңдеу немесе өртеу сияқты дәстүрлі әдістерге қарағанда бірқатар артықшылықтарға ие. Біріншіден, бұл әдіс энергияны аз қажет етеді және улы газдардың бөлінуіне әкелмейді. Екіншіден, ол табиғи процестерге негізделгендіктен, қоршаған ортаға зиянсыз. Дегенмен, осы әдісті кең масштабта қолдануға дейін оның экономикалық тиімділігі мен техникалық мүмкіндіктері мұқият зерттелуі қажет.

Зерттеудің шектеулері де назар аударуды қажет етеді. 12 апталық эксперимент микроорганизмдердің пластикке әсерін бағалауға жеткілікті болғанымен, ұзақ мерзімді процестерді толық түсіну үшін қосымша уақыт қажет. Мысалы, пластиктің толық минерализациясы (көмірқышқыл газы мен суға дейін ыдырауы) жүздеген күндерді немесе тіпті жылдарды алуы мүмкін. Сонымен қатар, зерттеу лабораториялық жағдайда жүргізілгендіктен, табиғи ортадағы нәтижелер әртүрлі болуы мүмкін. Табиғи экожүйелерде микроорганизмдердің басқа микроағзалармен бәсекелестігі, қоректік заттардың шектеулілігі және климаттық өзгерістер процестің тиімділігін төмендетуі ықтимал.

Осыған байланысты, болашақ зерттеулер бірнеше бағытта жүргізілуі тиіс. Біріншіден, микроорганизмдердің пластикті ыдыратудағы тиімділігін арттыру үшін олардың генетикалық әлеуеті тереңірек зерттелуі қажет. Мысалы, пластиктің белгілі бір түрлеріне мамандандырылған штаммдарды әзірлеу процесі жеделдетуі мүмкін. Екіншіден, табиғи ортада сынақтар жүргізу арқылы зерттеудің практикалық қолданысын бағалау керек. Үшіншіден, микроорганизмдердің метаболикалық өнімдерінің қоршаған ортаға әсері зерттеліп, олардың экологиялық қауіпсіздігіне көз жеткізілуі тиіс.

Зерттеудің нәтижелері экологиялық технологияларды дамытуға негіз бола алады. Пластикалық ластануды азайту қазіргі заманның ең өзекті мәселелерінің бірі болғандықтан, биотехнологиялық әдістерді қолдану тұрақты дамуға үлес қосады. Мысалы, микроорганизмдерді қолдану арқылы қоқыс полигондарындағы пластикті ыдырату немесе қалдықтарды биологиялық жолмен өңдеу жүйелерін құру мүмкін болады. Бұл технологиялар тек экологиялық мәселелерді

шешуге ғана емес, сонымен қатар экономикалық тиімді шешімдер ұсынуға да бағытталған.

Сонымен қатар, зерттеу биоэкономика саласына да әсер етуі мүмкін. Пластикті ыдырату нәтижесінде пайда болатын қосылыстарды (мысалы, органикалық қышқылдарды) қайта пайдалану арқылы жаңа материалдар немесе энергия көздері алынуы мүмкін. Бұл тәсіл қалдықтарды басқарудың циклдік моделін дамытуға және ресурстарды тиімді пайдалануға ықпал етеді.

Қорытындылай келе, бұл зерттеу микроорганизмдердің пластикалық қалдықтарды биодеградациялаудағы әлеуетін дәлелдеп, осы бағыттағы одан әрі зерттеулердің негізін қалады. Процестің баяулығы және оны оңтайландыру қажеттілігіне қарамастан, алынған нәтижелер пластикалық ластануды азайтуға бағытталған экологиялық таза технологияларды дамытуға жол ашады. Микроорганизмдердің генетикалық әлеуетін пайдалану, оңтайлы жағдайларды жасау және табиғи ортада сынақтар жүргізу арқылы бұл әдіс болашақта қоршаған ортаны қорғаудың тиімді құралына айналуы мүмкін. Осылайша, зерттеу ғылым мен қоғам үшін маңызды үлес қосып, тұрақты болашаққа бағытталған қадамдарды нығайтады.

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

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): А.С. Жантенова – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, зерттеу әдіснамасын қалыптастыру, эксперименттік зерттеулерді жүргізу, микроорганизмдерді іріктеу және талдау, алынған нәтижелерді өңдеу және түсіндіру, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау, нәтижелерді талқылау және мақаланы редакциялау. Автор мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығына толық жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Автор зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Қарағанды индустриялық университетіне алғыс 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 таратылуы тиіс.
жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар
осы лицензияның дәл осындай шарттарымен

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Wilkes, R. A., & Aristilde, L. (2020). Degradation of plastic waste by microbial communities. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7456-7465.
- [2] Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246-265.
- [3] Restrepo-Flórez, J. M., Bassi, A., & Thompson, M. R. (2014). Microbial degradation and deterioration of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 98(5), 1026-1035.

REFERECES

- [1] Wilkes, R. A., & Aristilde, L. (2020). Degradation of plastic waste by microbial communities. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7456-7465.
- [2] Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246-265.
- [3] Restrepo-Flórez, J. M., Bassi, A., & Thompson, M. R. (2014). Microbial degradation and deterioration of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 98(5), 1026-1035.

ЭКОНОМИКА. ЖАЛПЫ БІЛІМ БЕРУ, ӘЛЕУМЕТТІК-ГУМАНИТАРЛЫҚ ЖӘНЕ ІРГЕЛІ ПӘНДЕР

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/085>

THE DEVELOPMENT OF THE DIGITAL ECONOMY AND ITS IMPACT ON THE LABOR MARKET

¹Abuov D.B., ^{*1}Aliyev M.R., ²Sagatova G.E.

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

²Bolashaq Academies, Karaganda, Kazakhstan

* Corresponding author email: m.aliyev@mail.ru

Author information:

Abuov D.B. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Aliyev M.R. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan, E-mail: m.aliyev@mail.ru

Sagatova G.E. - Bolashaq Academies, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: gulzatsagatova38@gmail.com

Abstract. Abstract. This article is devoted to the trends in the development of the digital economy and its impact on the labor market. The digital economy raises the issue of creating new jobs in all sectors of the world, changing the structure of the labor force, ensuring the balance of the labor market between supply and demand. The article discusses the role of digital technologies in business, education, healthcare and other areas, and also analyzes what changes they cause in the labor market.

Keywords: digital economy, labor market, automation, artificial intelligence, jobs, labor demand, digital skills, workforce structure.

ЦИФРЛЫҚ ЭКОНОМИКАНЫҢ ДАМУЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ЕҢБЕК НАРЫҒЫНА ӘСЕРІ

¹Абуов Д.Б., ^{*1}Алиев М.Р., ²Сагатова Г.Е.

¹Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

"Болашақ" Академиясы, Қарағанды, Қазақстан

*Корреспондент автор e-mail: m.aliyev@mail.ru

Авторлар туралы ақпарат:

Абуов Д.Б. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

Алиев М.Р. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан, E-mail: m.aliyev@mail.ru

Сагатова Г.Е. – "Болашақ" Академиясы, Қарағанды Қ., Қазақстан, E-mail: gulzatsagatova38@gmail.com

Аңдатпа. Аңдатпа. Бұл мақала цифрлық экономиканың даму тенденцияларына және оның еңбек нарығына әсеріне арналған. Цифрлық экономика әлемдегі барлық салаларда жаңа жұмыс орындарын құру, еңбек күшінің құрылымын өзгерту, еңбек нарығының сұраныс пен ұсыныс арасындағы балансты қамтамасыз ету мәселелерін туындатуда. Мақалада цифрлық технологиялардың бизнес, білім, денсаулық сақтау және басқа да салалардағы рөлі қарастырылады, сондай-ақ олар еңбек нарығында қандай өзгерістер тудыратыны талданады.

Түйін сөздер: Цифрлық экономика, еңбек нарығы, автоматизация, жасанды интеллект, жұмыс орындары, еңбек сұранысы, цифрлық дағдылар, жұмыс күшінің құрылымы.

РАЗВИТИЕ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА РЫНОК ТРУДА

¹Абуов Д.Б., ^{*1}Алиев М.Р., ²Сагатова Г.Е.

¹Қарагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

²Академия "Болашақ", Караганда, Казахстан

Информация об авторах:

Абуов Д.Б. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

Алиев М.Р. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, E-mail: m.aliyev@mail.ru

Сагатова Г.Е. - Академия "Болашак", Караганда, Казахстан, E-mail: gulzatsagatova38@gmail.com

Аннотация. Аннотация. Эта статья посвящена тенденциям развития цифровой экономики и ее влиянию на рынок труда. Цифровая экономика ставит перед собой вопросы создания новых рабочих мест во всех отраслях мира, изменения структуры рабочей силы, обеспечения баланса рынка труда между спросом и предложением. В статье рассматривается роль цифровых технологий в бизнесе, образовании, здравоохранении и других областях, а также анализируется, какие изменения они вызывают на рынке труда.

Ключевые слова: Цифровая экономика, рынок труда, автоматизация, искусственный интеллект, рабочие места, спрос на рабочую силу, цифровые навыки, структура рабочей силы.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Цифрлық экономиканың дамуы еңбек нарығының құрылымын түбегейлі өзгертіп отырғаны көрсетілген. Деректер талдаушысы, киберқауіпсіздік маманы, жасанды интеллект инженері, блокчейн әзірлеуші сияқты жаңа мамандықтардың пайда болуы мен телефония операторлары, кеңсе хатшылары, конвейер жұмысшылары сияқты дәстүрлі мамандықтардың қысқаруы алты сала бойынша жүйеленген. Автоматтандыру мен роботтандыру процестері өндіріс саласымен қатар қызмет көрсету саласын да қамтығаны айқындалған. Цифрлық сауаттылық еңбек нарығындағы бәсекеге қабілеттіліктің негізгі факторы ретінде негізделіп, білім беру жүйесін жаңа талаптарға бейімдеу және үздіксіз қайта даярлау қажеттілігі көрсетілген. Қашықтан жұмыс істеу, фрилансинг және онлайн кәсіпкерлік цифрлық экономика тудырған жаңа еңбек формалары ретінде қарастырылған.

КІРІСПЕ

Цифрлық экономика — бұл ақпараттық және коммуникациялық технологиялардың (АКТ) көмегімен өндіріс, қызмет көрсету, сауда және басқа да салалардың процестерін цифрландыруды білдіреді. Соңғы онжылдықта

цифрлық технологиялар адам өмірінің барлық салаларына енген, бұл өзгерістер әлемдік экономиканы түбегейлі өзгертуде. Цифрландыру тек бизнес процестерін оңтайландыруға ғана емес, сондай-ақ жаңа нарықтар мен мүмкіндіктер ашуға ықпал етті. Жаңа технологиялар қолдану арқылы кәсіпорындар тиімділікті арттыруға, тұтынушылардың қажеттіліктерін тезірек қанағаттандыруға мүмкіндік алды.

Цифрлық экономиканың дамуымен байланысты еңбек нарығында айтарлықтай өзгерістер байқалады. Біріншіден, жұмыс орындарының жаңа түрлері пайда болды,

мысалы, деректер талдаушылары, киберқауіпсіздік мамандары, блокчейн сарапшылары және жасанды интеллект бойынша инженерлер. Бұл мамандықтар дәстүрлі жұмыс орындарымен салыстырғанда ерекше дағдыларды талап етеді. Сонымен қатар, цифрлық экономикаға өтудің нәтижесінде белгілі бір дәстүрлі мамандықтар сұранысқа ие болмауы мүмкін, сондықтан жұмысшылардың кәсіби дағдыларын жаңарту және қайта даярлау қажеттілігі туындайды.

Цифрлық дағдылардың маңыздылығы артты, себебі жаңа технологияларды қолдана алатын мамандарға сұраныс өсуде. Білім беру жүйесінде цифрлық сауаттылықты арттыру мен

студенттерді жаңа экономика талаптарына сай оқыту мәселесі өзекті болып отыр. Сондай-ақ, жұмысшылар үшін қашықтан жұмыс істеу, фрилансинг және онлайн кәсіпкерлік сияқты жаңа еңбек формалары дамыды. Осылайша, цифрлық экономика еңбек нарығында жаңа мүмкіндіктер мен талаптар тудырып, адамдардың кәсіби өмірін өзгертуге ықпал етуде.

Зерттеулердегі олқылық. Цифрлық экономика мен еңбек нарығы мәселелері бойынша жүргізілген зерттеулер негізінен дамыған елдердің тәжірибесіне немесе жекелеген салалардың цифрлануына арналған. Жаңа пайда болып жатқан және жойылып бара жатқан мамандықтардың салалар бойынша жүйеленген салыстырмалы талдауы, сондай-ақ бұл өзгерістердің Қазақстанның білім беру жүйесі мен еңбек нарығына тигізетін нақты әсері жеткілікті зерделенбеген.

Ғылыми жаңалығы. Жұмыстың ғылыми жаңалығы цифрлық экономиканың әсерінен пайда болатын жаңа мамандықтар мен жойылып бара жатқан дәстүрлі мамандықтарды алты сала — IT, медицина мен биотехнология, өнеркәсіп, қаржы, білім беру, логистика — бойынша жүйелеп, олардың арасындағы себеп-салдарлық

байланысты айқындауда. Цифрлық дағдылар, білім беру жүйесі және жұмыс күшінің бәсекеге қабілеттілігі арасындағы өзара байланыс кешенді түрде негізделген.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Бұл зерттеу негізінен сапалық әдістерге сүйенеді, әсіресе әдебиетке талдау жасау, статистикалық деректер мен қазіргі заманғы трендтерді зерттеу арқылы жүргізіледі. Басты назар цифрлық экономика мен еңбек нарығының арасындағы байланысты анықтауға, цифрлық технологиялардың жұмыс күшіне әсерін зерттеуге бағытталған. Сонымен қатар, жұмыс орындарының құрылымы мен жұмыскерлердің дағдыларының өзгеруіне қатысты зерттеулер қарастырылған. Цифрлық экономика бүгінгі күні әлемдегі ең маңызды және қарқынды дамып келе жатқан бағыттардың бірі болып табылады. Ол тек өндіріс пен қызмет көрсету саласын ғана емес, қоғамның барлық салаларын қамтып, еңбек нарығында да айтарлықтай өзгерістер туғызып отыр.

Цифрлық экономиканың қалыптасуы және даму тарихы. Цифрлық экономика ұғымы соңғы бірнеше жылда кеңінен тарағанымен, оның негізі бұрыннан қалыптасқан. Интернеттің, мобильді байланыс пен сандық құрылғылардың дамуы әлемдік экономиканы қайта құруға ықпал етті. Дәстүрлі өндіріс

тәсілдері мен жұмыс істейтін жүйелер цифрлық технологиялармен интеграциялану арқылы жаңарып, көптеген процестер автоматтандырылды. Мысалы, осы өзгерістер нәтижесінде көптеген компаниялар өздерінің бизнестерін онлайн режимде жүргізуге көшті. Бұл экономиканың жаңа салаларының құрылуына,

жаңа нарықтар мен мүмкіндіктердің ашылуына әкелді.

Жаңа технологиялар мен инновациялардың әсерінен еңбек нарығында айтарлықтай өзгерістер байқалды. Кәсіпорындар жаңа мамандықтар мен қызмет түрлерін енгізді, ал дәстүрлі мамандықтар мен жұмыс орындары белгілі бір өзгерістерге ұшырады. Мысалы, автоматтандырылған жүйелер мен роботтандыру технологияларының енгізілуі кейбір жұмыс орындарын жойып, жаңа жұмыстардың пайда болуына әкелді. Бұл жұмысшыларға жаңадан меңгеруге қажетті дағдыларды игеруді талап етті.

Цифрлық экономика және еңбек нарығының байланысы. Цифрлық экономика еңбек нарығының өзгерістеріне айтарлықтай әсер етеді. Бұл экономикада жұмыс күшінің құрылымы өзгеріп, еңбек ресурстарының сұранысы мен ұсынысы да өзгеруде. Мысалы, цифрлық технологиялар жұмыс орындарын автоматтандыруға, операцияларды оңтайландыруға және тұтынушыларға қызмет көрсету процесін жақсартуға мүмкіндік береді. Алайда бұл өзгерістер жұмыс күшіне де өз әсерін тигізеді.

Цифрлық технологиялар қолданылатын салалардың санының артуы, автоматтандыру және жасанды интеллекттің дамуы еңбек нарығында жаңа талаптарды қалыптастырып отыр. Бұған қоса, бизнес салаларында тиімділікті арттыру және шығындарды азайту мақсатында роботтарды, чат-боттарды, деректерді талдаушы құралдарды қолдану кеңінен енгізілуде.

Бұл көптеген кәсіпорындардың жаңа технологияларға көшіп, еңбек нарығының сұранысқа ие мамандықтарын өзгертуіне әкеліп отыр.

Кесте 1 – Жаңа мамандықтар және ескі мамандықтардың жойылуы

Категория	Жаңа мамандықтардың мысалдары	Ескі мамандықтардың жойылу талдауы
IT және цифрлық технологиялар	Data Scientist (мәліметтер бойынша маман)	Телефония операторлары
	Cloud Engineer (бұлттық инженер)	Телеграф қызметкерлері
	Cybersecurity Specialist (киберқауіпсіздік маманы)	Кеңсе хатшылары (бірқалыпты тапсырмаларды орындайтын)
Медицина және биотехнологиялар	Bioinformatician (биоинформатик)	Лаборанттар (автоматтандырылған жүйелермен ауыстырылатын)
	Genetic Counselor (генетикалық кеңесші)	Дәріханалардағы кассирлер (электрондық жүйелермен)

		ауыстырылатын)
Өнеркәсіп және өндіріс	Automation Engineer (автоматтандыру инженері)	Конвейердегі жұмысшылар (роботтармен ауыстырылатын)
	3D Printing Specialist (3D басып шығару маманы)	Тоқушылар (автоматтандырылған тоқу станоктарымен ауыстырылатын)
Қаржы және экономика	Blockchain Developer (блокчейн әзірлеуші)	Банк операциялары Қызметкерлері (онлайн банкингпен ауыстырылатын)
	Financial Analyst (қаржы талдаушысы)	Бухгалтерлер (бірқалыпты тапсырмаларды орындайтын, бағдарламалық қамтамасыз етумен ауыстырылатын)
Білім беру және тренинг	Online Learning Facilitator (онлайн оқыту ұйымдастырушысы)	Дәстүрлі мектеп кітапханашылары
	EdTech Specialist (білім беру технологиялары маманы)	Цифрлық технологияларды пайдаланбайтын мұғалімдер
Маркетинг және коммуникациялар	Digital Marketing Specialist (цифрлық маркетинг маманы)	Дәстүрлі БАҚ жарнама агенттері
	Social Media Manager (әлеуметтік желі менеджері)	Басылған жарнамалық алаңдардың сатушылары
Логистика және көлік	Drone Operator (дрон операторлары)	Дәстүрлі пошта тасушылар (автоматтандырылған жеткізулермен ауыстырылатын)
	Logistics Data Analyst (логистикадағы мәліметтер талдаушысы)	Қоймалардағы сұрыптаушылар (роботтармен ауыстырылатын)

Мысалы, жоғары білікті мамандарға сұраныс артып, осыған байланысты техникалық білім мен дағдыларға ие мамандардың саны да өсуде. Бұл цифрлық экономикаға көшу барысында еңбек нарығында үлкен өзгерістер туғызды. Енді кәсіпорындар үшін негізгі кадрлар ретінде деректерді талдай алатын, бағдарламалау және жүйелерді басқару дағдыларына ие мамандар қажет.

Жұмыс орындарының құрылымы мен жұмыскерлердің дағдыларының өзгеруі. Цифрлық экономиканың дамуы жұмыс орындарының құрылымын өзгертуде. Жұмыс орындарының көпшілігі автоматтандырылып, роботтандыру мен жасанды интеллект пайдаланылатын жүйелер енгізілуде. Осыған байланысты жаңа жұмыс орындары пайда болып, ескі дәстүрлі жұмыс орындары жойылуда.

Мұндай өзгерістер ең алдымен кәсіпорындардағы жұмысшылардың кәсіби дағдыларын жаңарту мен жетілдіру қажеттілігін туындатады.

Жаңа технологиялар мен инновациялар еңбек нарығында жаңа жұмыс түрлерінің пайда болуына әсер етті. Мысалы, деректер ғылымы, жасанды интеллект, робототехника,

киберқауіпсіздік, цифрлық маркетинг және электронды коммерция сияқты салаларда жаңа мамандықтар қалыптасты. Осы салада жұмыс істейтін мамандарға арнайы дағдылар қажет, оларды меңгеру үшін оқыту жүйесін жаңарту маңызды болып отыр. Әсіресе жас ұрпаққа цифрлық дағдыларды үйрету қажеттілігі айқын болып келеді.

Бұл процестер жұмыскерлердің дағдыларын жаңарту және цифрлық білім беру мен даярлықты қамтамасыз ету үшін жүйелі түрде жұмыс істеуді талап етеді. Жұмысшыларға тек негізгі білім мен біліктер ғана емес, сонымен қатар техникалық және цифрлық дағдыларды да меңгеру қажет. Бұл бағытта көптеген компаниялар өз қызметкерлеріне кәсіби даму бағдарламаларын ұсынуда, сонымен қатар онлайн курстар мен тренингтер арқылы цифрлық дағдыларды арттыру мүмкіндігі туды.

Цифрлық дағдылар мен білім беру жүйесі.

Цифрлық экономиканың дамуымен жұмысшылардың цифрлық сауаттылығының маңызы артты. Осыған орай, білім беру жүйесінде цифрлық дағдыларды дамыту үшін түрлі бағдарламалар мен курстар ұсынылуда. Бүгінде көптеген оқу орындары мен курстар өз

студенттеріне деректерді талдауды, бағдарламалауды, цифрлық маркетингі, киберқауіпсіздік саласындағы білімдерді оқытуға бағытталған бағдарламаларды енгізді.

Осыған байланысты, цифрлық білім беру жүйесі жұмысшылардың еңбек нарығына сай білім алуына мүмкіндік береді. Қазіргі уақытта әлемнің көптеген елдерінде білім беру жүйесінің негізгі бағыты цифрлық сауаттылықты арттыру болып табылады. Мысалы, мектептер мен университеттерде ақпараттық технологиялар пәндері оқытылып, оқушылар мен студенттерге бағдарламалау, жүйелерді басқару, деректерді өңдеу және т.б. дағдылар үйретіледі.

Бұл білім беру бағыттары болашақ еңбек нарығына дайындалған мамандарды қалыптастыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, цифрлық экономикада жұмыс істейтін адамдарға үздіксіз оқу мен кәсіби дамуды қамтамасыз ету үшін түрлі онлайн платформалар мен курстар ұйымдастырылуда.

Қашықтан жұмыс істеу және фрилансинг. Цифрлық экономика еңбек нарығында жаңа еңбек формаларының пайда болуына ықпал етті.

Қашықтан жұмыс істеу, фрилансинг және онлайн кәсіпкерлік сияқты жаңа жұмыс түрлері кеңінен таралуда. Осыған байланысты көптеген жұмысшылар дәстүрлі кеңселерде жұмыс істемей, үйден немесе басқа да қашықтықтан жұмыс істеуді тандайды. Бұл өзгерістер жұмыс орындарын және еңбек формаларын жаңаша қарауға мүмкіндік берді.

Қашықтан жұмыс істеу жұмысшыларға уақыт пен орынды таңдау еркіндігін береді, сонымен қатар жұмыс берушілерге қашықтан жұмыс істей алатын мамандарды тартуға мүмкіндік тудырады. Сонымен қатар, фрилансинг арқылы өз бетінше жұмыс істейтін адамдар саны артып келеді, бұл цифрлық платформалар арқылы ұсынылатын қызметтерге негізделген жаңа еңбек түрін қалыптастырады.

Цифрлық экономика еңбек нарығында айтарлықтай өзгерістерге алып келді. Жаңа технологиялардың дамуымен бірге жұмыс орындары өзгеріп, жаңа мамандықтар пайда болды, ал дәстүрлі мамандықтар мен жұмыс орындары жойылып бара жатыр. Бұл өзгерістер жұмыскерлердің дағдыларын жаңарту мен қайта даярлау қажеттілігін туындатады. Сонымен қатар, білім беру жүйесінің цифрлық дағдыларды үйретуге бағытталуы жұмыс күшінің бәсекеге қабілеттілігін арттыруға ықпал етеді. Цифрлық экономика, өзінің барлық мүмкіндіктерімен бірге, еңбек нарығын жаңаша тұрғыда қалыптастырып, жаңа мүмкіндіктер мен талаптар тудырып отыр.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Цифрлық экономика бүгінгі таңда әлемдегі ең маңызды өзгерістердің бірі болып табылады, себебі ол өндіріс пен қызмет көрсету салаларын, сауданы және қоғамның басқа да салаларын түбегейлі өзгертуде. Бұл өзгерістер еңбек нарығында да айтарлықтай өзгерістерді туғызды, жаңа мамандықтар мен жұмыс орындарының пайда болуына, сонымен қатар дәстүрлі жұмыс орындарының қысқаруына себеп болды. Сонымен қатар, цифрлық дағдылардың маңызы артты, бұл жұмысшыларға жоғары деңгейдегі цифрлық білім мен дағдыларды игеруді талап етеді. Осы бағытта цифрлық экономика еңбек нарығына бірнеше маңызды әсерлерін тигізді, олардың кейбірі төменде егжей-тегжейлі қарастырылады.

1) **Жаңа жұмыс орындарының пайда болуы:** Цифрлық экономика дамуы барысында көптеген жаңа жұмыс орындары пайда болды. Бұл жұмыс орындары тек белгілі бір салаға ғана тән емес, жалпы экономиканың барлық секторларында байқалады. Мысалы, деректер талдаушысы, киберқауіпсіздік маманы, жасанды интеллект бағдарламалаушысы, цифрлық

маркетологтар, жүйелерді басқарушы мамандар және басқа да цифрлық бағыттағы мамандар сұранысқа ие болуда.

Деректер талдаушысы — цифрлық экономика саласындағы ең көп сұранысқа ие мамандықтардың бірі. Қазіргі уақытта көптеген кәсіпорындар мен ұйымдар өздерінің деректерін талдауды маңызды деп санайды, себебі деректер бизнес шешімдер қабылдауға, нарықтық трендтерді анықтауға және

тұтынушы сұраныстарын болжауға көмектеседі. Деректер талдаушысы ұйымдардың деректерін өңдеп, талдау жасап, тиімді шешімдер қабылдауға қажетті ақпаратты ұсынады.

Киберқауіпсіздік мамандары да цифрлық экономикада үлкен сұранысқа ие болып отыр. Интернеттің және ақпараттық технологиялардың дамуы киберқылмыстардың санының артуына әкелді. Бұл салада жұмыс істейтін мамандар компаниялардың деректерін қорғау, қауіпсіздік жүйелерін жетілдіру және киберқатерлерден қорғану үшін жауапты. Сонымен қатар, жасанды интеллект (AI) және машиналық оқыту мамандары да кеңінен сұранысқа ие. Бұл салада жұмыс істейтін мамандар бизнес процестерін автоматтандыру, деректерді өңдеу және талдау, сонымен қатар жасанды интеллект жүйелерін дамыту мен қолдануды жүзеге асырады. **Дәстүрлі салаларда өзгерістер:** Цифрлық экономика дамыған сайын, көптеген дәстүрлі салаларда автоматизация

мен роботизация процестері жүріп жатыр. Бұл өзгерістер кейбір дәстүрлі мамандықтардың жойылуына немесе олардың қызметтерінің өзгеруіне әкелуде. Мысалы, өндірістік секторда автоматтандырылған құрылғылар мен роботтардың қолданылуы қолмен жұмыс істейтін мамандарға деген сұранысты азайтты. Енді көптеген өндіріс салаларында автоматтандырылған жүйелер мен роботтар жұмысшылардың орнын басуда. Мұндай өзгерістер жұмыс орындарының құрылымын қайта анықтауға және жұмысшылардың дағдыларын жаңартуға қажеттілікті туғызуда.

Роботтардың қолданылуының артуы өндіріс процесінде адам еңбегін алмастыруды жеңілдетіп қана қоймай, өнімділікті арттыруға және шығындарды азайтуға мүмкіндік берді. Бірақ, бұл процесс дәстүрлі мамандықтардың жойылуына да себеп болды. Мысалы, конвейерлік өндірісте жұмыс істейтін мамандар санының азаюы және қайта даярлау қажеттілігі артты. Бұл өзгерістер жұмысшылардан жаңа дағдыларды меңгеруді талап етеді.

Бұған қоса, автоматтандыру мен роботизация тек өндіріс саласына ғана емес, қызмет көрсету салаларына да әсер етті. Мысалы, қонақүйлерде,

банктерде және сауда орындарында роботтар мен автоматтандырылған жүйелер жұмыс істей бастады. Бұл қызметкерлердің қызмет көрсету міндеттерін жеңілдетті, бірақ олардың жұмыс орнын алу ықтималдығын да арттырды. Мұндай өзгерістер еңбек нарығында жұмыссыздықтың өсуіне әкелуі мүмкін.

2) Цифрлық дағдылардың маңызының артуы: Цифрлық экономикадағы өзгерістермен қатар, жұмысшылардың цифрлық дағдыларын меңгеру маңыздылығы артты. Қазіргі таңда көптеген жұмыс орындары үшін тек дәстүрлі білім ғана емес, жоғары деңгейдегі цифрлық білім де қажет. Мысалы, бағдарламалау, деректерді талдау, жүйелерді басқару, киберқауіпсіздік, жасанды интеллект салаларында жұмыс істеу үшін жоғары деңгейдегі цифрлық дағдылар қажет.

Цифрлық дағдыларға ие болмаған адамдар жұмыс нарығында бәсекеге қабілетсіз болуы мүмкін, себебі көптеген жұмыс орындары тек цифрлық сауаттылықты меңгерген мамандар үшін ашық болады. Бұл білім беру жүйесінің жаңа талаптарына сай қайта құрылуына әсер етті. Қазіргі кезде мектептер мен университеттерде цифрлық сауаттылықты арттыруға арналған бағдарламалар мен курстар кеңінен енгізілуде. Оқушылар мен студенттер тек теориялық білімді ғана емес, сонымен қатар практикалық дағдыларды да меңгеруі қажет.

Сонымен қатар, жұмысшылар өздерінің цифрлық дағдыларын үнемі жаңартып, жетілдіріп отыруы тиіс. Себебі цифрлық технологиялар мен инновациялар үздіксіз дамып отырады, және жұмысшылардың осы өзгерістерге бейімделуі үшін жаңа білімдер мен дағдыларды меңгеруі өте маңызды. Жұмыс орындарының көпшілігі деректерді өңдеу, бағдарламалау, және автоматтандыру сияқты цифрлық дағдыларды талап етеді. Сондықтан жұмысшыларға осы дағдыларды меңгеру үшін арнайы курстар мен тренингтер ұсынылуы тиіс.

3) Жұмыс орындарының жаңа түрлері мен қажетті дағдылар: Цифрлық экономиканың әсерінен жаңа жұмыс орындары пайда болып, ескі мамандықтардың көптеген түрлері жойылды. Бұл жағдай жұмысшылардан жаңа дағдыларды меңгеруді талап етеді. Жаңа жұмыс түрлерінің көбісі ақпараттық технологияларға және деректерді өңдеуге бағытталған. Мысалы, «Деректер аналитигі»,

«Жасанды интеллект инженері», «Цифрлық маркетолог», «Блокчейн маманы» сияқты жаңа мамандықтар сұранысқа ие. Бұл мамандықтар жұмыс күшіне жаңа дағдыларды талап етеді.

Сонымен қатар, дәстүрлі мамандықтардың кейбір түрлері, мысалы, өндіріс және қойма

жұмыстарындағы мамандар, азаматтар. Бірақ, бұл да жұмысшыларға жаңа дағдыларды үйренуге мүмкіндік беретін жағдайларды тудырады. Мысалы, роботтар мен автоматтандырылған жүйелерді басқару үшін жаңа мамандықтар пайда болады.

Цифрлық экономика еңбек нарығына айтарлықтай әсер етті, жаңа жұмыс орындарының пайда болуына және дәстүрлі жұмыс орындарының өзгеруіне себеп болды. Бұл өзгерістер жұмысшылардан цифрлық дағдыларды игеруді, жаңа технологияларды меңгеруді талап етеді. Сонымен қатар, цифрлық технологиялар жұмыс күшінің құрылымын өзгертіп, жаңа мамандықтардың пайда болуына ықпал етті. Осы тұрғыда жұмысшылардың кәсіби даму мен қайта даярлау бағдарламаларына қатысуы өте маңызды. Цифрлық экономика еңбек нарығын жаңаша тұрғыда қалыптастырып, жаңа мүмкіндіктер мен талаптар тудырып отыр.

ҚОРЫТЫНДЫ

Цифрлық экономиканың дамуы еңбек нарығында тек қана жұмыс орындарының құрылымын өзгертіп қана қоймай, жұмысшыларға қойылатын талаптарды да түбегейлі өзгертуде. Жаңа технологиялардың енгізілуі нәтижесінде дәстүрлі салаларда жұмыс орындары қысқарып, олардың орнын жаңа

цифрлық бағыттағы мамандықтар алуда. Бұл өзгерістер еңбек нарығындағы сұраныс пен ұсыныстың жаңа форматына әкелуде. Атап айтқанда, деректер талдаушысы, жасанды интеллект бағдарламалаушысы, киберқауіпсіздік мамандары сияқты жаңа мамандықтар қалыптасып, олардың сұранысы артуда. Осыған байланысты еңбек нарығының тиімді жұмыс істеуі үшін жұмысшылардың цифрлық дағдыларға ие болуы өте маңызды.

Цифрлық дағдылар еңбек нарығында табысты болудың негізгі факторы болып табылады. Адамдар тек дәстүрлі білім мен тәжірибеге ғана емес, сондай-ақ қазіргі заманғы цифрлық құралдарды қолдану, ақпараттық жүйелерді басқару және интернет технологияларын пайдалану қабілеттерін меңгеруі тиіс. Мысалы, көптеген өндіріс және қызмет көрсету салаларында автоматтандыру мен роботизация енгізілуде, бұл жұмысшылардан жаңа дағдыларды, әсіресе техникалық және цифрлық дағдыларды талап етеді.

Білім беру жүйесі осы өзгерістерге бейімделуі тиіс. Мектептер мен жоғары оқу орындары оқушылар мен студенттерге цифрлық сауаттылықты арттыруға бағытталған бағдарламаларды ұсынуы қажет. Бұл бағдарламалар оқушыларды тек теориялық біліммен ғана емес, сонымен қатар практикалық дағдылармен де қамтамасыз етуі керек. Мысалы, бағдарламалау, деректерді өңдеу, киберқауіпсіздік және цифрлық маркетинг сияқты дағдыларды игеру маңызды болып отыр. Сондай-ақ, еңбек нарығында икемділікті қамтамасыз ету үшін қайта даярлау және үздіксіз білім алу мүмкіндіктерін ұсыну қажет.

Цифрлық технологияларды тиімді пайдалану еңбек нарығын тиімді әрі икемді етуге мүмкіндік береді, өйткені ол жұмыс күшінің тиімділігін арттырып, жаңа мүмкіндіктер туғызады.

Авторлардың үлесі (CRediT таксономиясы): Абуов Д.Б.: концептуализация, әдіснаманы әзірлеу, статистикалық деректер мен әдеби дереккөздерді жинау және талдау, кестені құрастыру, қолжазбаның бастапқы нұсқасын жазу. Алиев М.Р.: формалды талдау, зерттеу нәтижелерін интерпретациялау, қолжазбаны ғылыми редакциялау және оның түпкілікті нұсқасын дайындау, зерттеуге жетекшілік ету. Сағатова Г.Е.: деректерді тексеру және жүйелеу, әдебиеттерге шолу жасау, зерттеу нәтижелерін талқылауға қатысу, қолжазбаны редакциялау. Барлық авторлар мақаланың түпкілікті нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландыруды тартпай орындалды.

Алғыс. вторлар қолжазбаны талқылау барысындағы құнды ескертулері үшін Қарағанды индустриялық университетінің және «Болашақ» Академиясының әріптестеріне алғыс білдіреді.

Авторлық құқық © 2026 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясына сәйкес ашық қолжетімділік шарттарында таратылады. Лицензия авторлықты міндетті түрде көрсету және туынды материалдар үшін дәл сол лицензияны сақтау шартымен кез келген нысанда еркін пайдалануға, таратуға және көбейтуге рұқсат етеді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Бағдатов, М. А. Цифрлық экономика: түсініктер мен мүмкіндіктер / М. А. Бағдатов. — Алматы: Экономика баспасы, 2022. — 276 б.
- [2] Петрова, В. Н. Цифрлық экономика және еңбек нарығының жаңа тенденциялары / В. Н. Петрова. — Мәскеу: Экономика, 2021. — 198 с.

- [3] Smith, A. The Impact of Digital Economy on Employment / A. Smith // Journal of Technology and Employment. — 2020. — Vol. 12, No. 3. — P. 45–59.
- [4] Ғалымжанова, А. А. Цифрлық трансформация және Қазақстанның еңбек нарығы / А. А. Ғалымжанова // Жаңа экономика. — 2023. — №4. — Б. 77–85.
- [5] World Economic Forum. The Future of Jobs Report 2023. — Geneva: WEF, 2023. — 150 p.

REFERENCES

- [1] Бағдатов, М. А. Цифрлық экономика: түсініктер мен мүмкіндіктер / М. А. Бағдатов. — Алматы: Экономика баспасы, 2022. — 276 б.
- [2] Петрова, В. Н. Цифрлық экономика және еңбек нарығының жаңа тенденциялары / В. Н. Петрова. — Мәскеу: Экономика, 2021. — 198 с.
- [3] Смит, А. Цифрлық Экономиканың Жұмыспен қамтуға Әсері / А. Смит // Технология Және Жұмыспен қамту Журналы. — 2020. - Том. 12, № 3. — Б.45-59.
- [4] Ғалымжанова, А. А. Цифрлық трансформация және Қазақстанның еңбек нарығы / А. А. Ғалымжанова // Жаңа экономика. — 2023. — №4. — Б. 77–85.
- [5] Дүниежүзілік Экономикалық Форум. 2023 Жылғы Жұмыспен Қамтудың Болашағы туралы Есеп. - Женева: ДЭФ, 2023 жыл. — 150 б.

ХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ФАРМАЦЕВТИКАЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР. ТІРШІЛІК ҚАУІПСІЗДІГІ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/086>

MECHANICAL CHEMICAL EFFECTS ON THE SYNTHESIS OF COPPER ORTHOPHOSPHATE AND CYCLOTETRAPHOSPHATE MASSES BY HYDROTHERMAL HOT PRESSING

**¹Umbetbayeva A.N., ²Yesenova M.D., ¹Utegul A.S.*

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

²Kazakhstan-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

** Corresponding author e-mail: a.umbetbayeva@tttu.edu.kz*

Author information:

Umbetbayeva A.N. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: a.batyrbek@tttu.edu.kz, g.sivyakova@tttu.edu.kz

Utegul A.S. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: a.utegul@tttu.edu.kz

Есенова М.Д. - Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan. Email: maral2375@mail.ru

Abstract. Copper orthophosphate $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ and cyclo-tetraphosphates $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ were synthesized using phosphoric acid and basic copper carbonate, and then processed by a planetary mill for 360 minutes. Crushed and shredded samples were characterized by X-ray diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy. SEM images, particle size distribution, actual surface area, UV-Vis reflection spectra were also used to evaluate the materials. Non-dairy and crushed materials were used to create copper-phosphate masses by the hydrothermal hot pressing method. The influence of the powder State on the properties of the sintering of copper phosphates was studied

Keywords: mechanochemical effects, copper phosphates, hydrothermal hot pressing.

ГИДРОТЕРМИЯЛЫҚ ЫСТЫҚ ПРЕСТЕУ ӘДІСІМЕН МЫС ОРТОФОСФАТЫНЫҢ ЖӘНЕ ЦИКЛОТЕТРАФОСФАТТЫҢ МАССАЛАРЫНЫҢ СИНТЕЗІНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ ХИМИЯЛЫҚ ӘСЕРЛЕР

**¹Умбетбаева А.Н., ²Есенова М.Д., ¹Утегул А.С.*

¹Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

²Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

** Автор-корреспондент e-mail: a.umbetbayeva@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Умбетбаева А.Н. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: a.umbetbayeva@tttu.edu.kz

Утегул А.С. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: a.utegul@tttu.edu.kz

Есенова М.Д. - Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан. Email: maral2375@mail.ru

Аңдатпа. Мыс ортофосфаты $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ және цикло-тетрафосфаттар $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ фосфор қышқылы мен негіздік мыс карбонатын пайдаланып синтезделді, содан кейін планетарлық диірменмен 360 минутқа дейін өңделді. Ұнтақталған және ұнтақталған үлгілер рентгендік дифракция (XRD) және Фурье түрлендіру инфрақызыл (FT-IR) спектроскопиясымен сипатталды. Сондай-ақ материалдарды бағалау үшін SEM кескіндері, бөлшектердің мөлшерінің таралуы, беттің нақты ауданы, UV-Vis шағылыстыру спектрлері пайдаланылды. Фрезерленбеген және ұнтақталған материалдар гидротермиялық ыстық престеу әдісімен мыс фосфатты массаларды дайындау үшін пайдаланылды. Мыс фосфаттарының агрегациялану қасиетіне ұнтақ күйінің әсері зерттелді

Түйін сөздер Меоханохимиялық әсерлер, Мыс фосфаттары, Гидротермиялық ыстық престеу.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ НА СИНТЕЗ МАСС ОРТОФОСФАТА МЕДИ

И ЦИКЛОТЕТРАФОСФАТА МЕТОДОМ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ

*¹Умбетбаева А.Н., ²Есенова М.Д., ¹Утегул А.С.

²Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан.

¹Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

* Автор-корреспондент e-mail a.umbetbayeva@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Умбетбаева А.Н. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: a.umbetbayeva@tttu.edu.kz

Утегул А.С. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: a.utegul@tttu.edu.kz

Есенова М.Д. - Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан. Email: maral2375@mail.ru

Аннотация. Ортофосфат меди $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ и цикло-тетрафосфаты $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ были синтезированы с использованием фосфорной кислоты и основного карбоната меди, а затем обработаны планетарной мельницей в течение 360 минут. Измельченные и измельченные образцы характеризовались дифракцией рентгеновских лучей (XRD) и инфракрасной (FT-IR) спектроскопией с преобразованием Фурье. Для оценки материалов также использовались изображения SEM, распределение размеров частиц, фактическая площадь поверхности, спектры отражения UV-Vis. Для изготовления медно-фосфатных масс методом гидротермального горячего прессования использовались немолоченные и измельченные материалы. Изучено влияние порошкового состояния на свойства агломерации фосфатов меди

Ключевые слова: механохимические эффекты, фосфаты меди, гидротермальное горячее прессование.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Фосфор қышқылы мен негіздік мыс карбонаты негізінде синтезделген мыс ортофосфаты ($\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$) мен мыс цикло-тетрафосфатының ($\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$) механохимиялық өңдеу нәтижесінде құрылымдық және физика-химиялық қасиеттерінің өзгеруі кешенді зерттелді. Планетарлық диірменде ұнтақтау материалдардың кристалдылығын төмендетіп, бөлшектердің өлшемін кішірейтетіні және меншікті бетінің ұлғаюына ықпал ететіні анықталды. Сонымен қатар, механикалық өңдеуді гидротермиялық ыстық престеу әдісімен үйлестіру нәтижесінде жоғары тығыздықтағы мыс фосфатты массаларды алу мүмкіндігі дәлелденді. Зерттеу нәтижелері мыс цикло-тетрафосфатының ұнтақталғыштығы мен агломерациялану қабілеті мыс ортофосфатына қарағанда жоғары екенін көрсетті, бұл гидротермиялық ыстық престеу процесінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

КІРІСПЕ

Фосфаттар керамикалық материалдар, катализаторлар, адсорбент, флуоресцентті материалдар, диэлектрлік заттар, металдың бетін өңдеу, тыңайтқыш, жуғыш зат, тағамдық қоспалар, отын элементтері, пигменттер және т.б. ретінде кеңінен қолданылады. Фосфаттардың фазалық түрленуі жоғары температурада гидролиз және дегидратация реакцияларында болуы

мүмкін, [1,2]. Типтік фосфаттарға полифосфат, циклофосфат және ультрафосфат жатады. Полифосфаттың тізбекті құрылымы бар, онда PO_4 бірлігі екі оттегі атомын бөліседі; циклофосфат циклдік құрылымға ие болса; ал ультрафосфаттың желілік құрылымы бар.

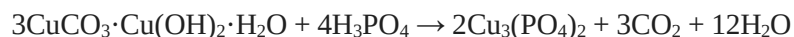
Әртүрлі қолдану үшін фосфаттар ұнтақтар, массалар немесе жұқа қабаттар түрінде болуы мүмкін. Фосфаттар P_2O_5 жоғалту арқылы жоғары температурада оксидке дейін ыдырайды, стандартты агломерация әдістерімен фосфат массасын алу қиын. Жаңа синтетикалық процесс ретінде гидротермиялық ыстық престеу әдісі зерттелді [5,6,7,8,9,10,11]. Бұл әдісте бастапқы ұнтақ пен судың аз мөлшерінің қоспалары салыстырмалы түрде төмен температурада агломерацияланады, бұл әдетте кеуекті фосфатты материалдарға әкеледі. Бұл әдістің артықшылығы агломерация температурасының төмендігі және кеуекті массасы болып табылады. Сондықтан кеуекті материалдарды катализатор, адсорбент және т.б. ретінде пайдалануға болады [12,13]. Дегенмен, гидротермиялық ыстық престеу кезінде түзілетін кеуекті фосфат массалары көбінесе физикалық тұрғыдан тым әлсіз. Сондықтан гидротермиялық ыстық престеу процесін қолданғанда толтыру коэффициентін, нақты және теориялық тығыздық арақатынасын арттыру қажет.

Ұнтақты материалдардың қатты бетін реформалау жоғары функционалдық қасиеттерді

тудырады. Риформинг, қаптау, топохимиялық әдіс, механикалық өңдеу, ультракүлгін сәулелену және т.б. мақсатында әртүрлі әдістерді қолдануға болады. Қатты материалдардың физикалық және химиялық қасиеттерін ұсақтау, престоу, фрезерлеу және басқа механикалық өңдеулер арқылы өзгертуге болады. Бұл механикохимиялық әсерлер беттің меншікті ауданы, ақаулар мен деформациялар, химиялық байланыстардың үзілуі және т.б. ұлғаюына әкелетіні белгілі. Бұл әсерлер үшін механикалық өңделген материалдар белсенді күйде болып саналады [14,15]. Ұнтақталған ұнтақтардың ұсақ бөлшектері болғандықтан, төмен температурада оңай агломерациялануы керек. P_2O_5 -тің ұшпалануына байланысты фосфатты материалдарды агломерациялау қиын. Сол сияқты, гидротермиялық ыстық престоу процесін қолдану арқылы фосфат массалары да алынған, бірақ олардың механикалық беріктігі нашар [16]. Бұл жұмыста біз фосфатты материалдардың агломерациялық қасиеттерін жақсарту үшін механикалық өңдеуді қолдануға тырысамыз.

Мыс ортофосфаты және цикло-тетрафосфат фосфор қышқылы мен негіздік мыс карбонатын қолдану арқылы синтезделді. Алынған фосфаттарды планетарлық диірменмен ұнтақтады. Ұнтақталған және өңделмеген материалдар рентгендік дифракция (XRD) және Фурье түрлендіру инфрақызыл (FT-IR) спектроскопиясы арқылы зерттелді. Сонымен қатар, үлгілер арнайы беттік аумақты талдау, сканерлеуші электронды микроскоп (SEM) және бөлшектер өлшемін бөлу, UV-Vis шағылыстыру спектрлері арқылы сипатталды. Мыс фосфатты массалары ұнтақтарды пайдалана отырып, гидротермиялық ыстық престоу әдісімен дайындалды. Ұнтақ жағдайларының фосфаттың фаза түзілуіне және көлемдік қасиеттеріне әсері зерттелді.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі уақытта



Фосфор оксидінің ұшып кетуіне байланысты шикізаттың араласу коэффициенті мыс ортофосфатының P/Cu қатынасынан жоғары тұндырылды. Бұл ретте негізгі мыс карбонаты $P/Cu = 2:1$ мольдік қатынасында 85 масса%



Мыс ортофосфаты немесе цикло-тетрафосфат (6 г) бес ZrO_2 шары (диаметрі 15 мм, орташа салмағы 8,88 г) және диаметрі ZrO_2 мм тереңдігі (диаметрі ZrO_2 , мм) бар Fritsch P7 типті планетарлық диірменді пайдаланып, планетарлық

механохимиялық өңдеу мен гидротермиялық ыстық престоу технологиялары фосфатты материалдарды алуда кеңінен зерттелгенімен, мыс ортофосфаты мен мыс цикло-тетрафосфатының механикалық өңдеуден кейінгі құрылымдық өзгерістері мен олардың гидротермиялық ыстық престоу кезіндегі агломерациялық қасиеттеріне әсерін кешенді бағалау жеткілікті деңгейде қарастырылмаған. Сонымен қатар, ұнтақ күйінің материалдардың тығыздығы мен физика-химиялық қасиеттеріне ықпалын ғылыми негіздеу мәселесі толық шешімін таппаған. Сондықтан аталған зерттеу осы ғылыми олқылықтың орнын толтыруға бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы мыс ортофосфаты мен мыс цикло-тетрафосфатының механохимиялық өңдеу нәтижесінде құрылымдық және морфологиялық қасиеттерінің өзгеруін кешенді зерттеп, олардың гидротермиялық ыстық престоу арқылы алынатын фосфатты массалардың қасиеттеріне әсерін анықтауда болып табылады. Зерттеу нәтижесінде механикалық өңдеудің кристалдылықты төмендететіні, бөлшектердің өлшемін азайтатыны және агломерация тиімділігін арттыратыны дәлелденді. Сондай-ақ, мыс цикло-тетрафосфатының мыс ортофосфатына қарағанда жоғары ұнтақталғыштыққа және тығыздығы жоғары фосфатты массалар түзу қабілетіне ие екендігі ғылыми негізделді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Негізгі мыс карбонаты ($CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2 \cdot H_2O$) $P/Cu = 4:5$ мольдік қатынасында массасының 85% фосфор қышқылымен (H_3PO_4) араластырылды. Мыс ортофосфаты $Cu_3(PO_4)_2$ қоспаны $700^\circ C$ температурада 1 сағат бойы келесі реакция арқылы қыздыру арқылы алынды:

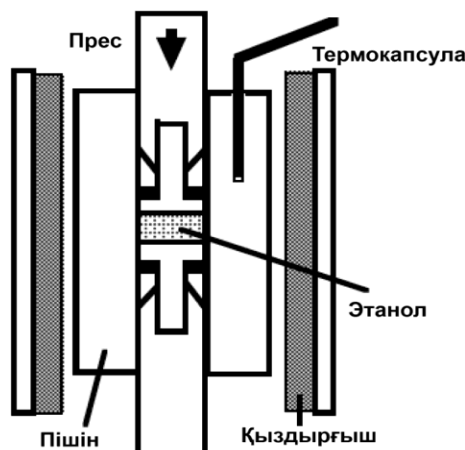
фосфор қышқылымен араластырылды. Мыс цикло-тетрафосфаты $Cu_2P_4O_{12}$ қоспаны $420^\circ C$ температурада 1 сағат бойы келесі реакция арқылы қыздыру арқылы алынды:

диірменмен 300 айн/мин жылдамдықпен 360 минутқа дейін ұнтақталды.

1- суретте гидротермиялық ыстық престоу аппаратының принципіалды сұлбасы көрсетілген. Ұнтақ пен 10 массалық % этанол

қоспалары қалыпқа салынып, бір осьті қысыммен 40 МПа механикалық түрде престелді, содан кейін 10 °С/мин жылдамдықпен 150 °С температурада 2 сағат бойы қыздырылды. Жалпы суды гидротермиялық ыстық престоу процесінде пайдаланады. Дегенмен, бұл жұмыста цикло-тетрафосфаттың сулы жағдайда

ыдырайтындығына байланысты этанол таңдалды. Пішінде аз орын болғандықтан, этанол агломерация процесінде ұшпалануы мүмкін. Гидротермиялық ыстық престоу процесінде агломерация қысымы жалпы қысым ретінде анықталды.

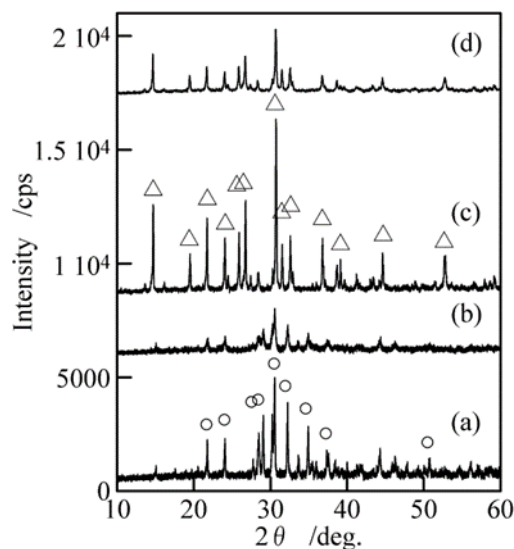


Сурет 1. Гидротермиялық ыстық престоу аппаратының схемасы.

Өңделмеген, ұнтақталған және агломерленген материалдар рентгендік дифракция (XRD) және Фурье түрлендіру инфрақызыл спектроскопиясы (FT-IR) арқылы талданды. XRD үлгілері монохроматталған $\text{CuK}\alpha$ сәулеленуін пайдаланып Rigaku Denki RINT 2000M рентгендік дифрактометр көмегімен жазылды. FT-IR спектрлері Shimadzu FT-IR спектрометрімен FT-IR8600 KBr дискі әдісімен жазылды. Материалдардың SEM кескіндері Keyence компаниясының VE8800 көмегімен байқалды. Бөлшек өлшемдерінің таралуы HORIBA LA-910 лазерлік дифракция / шашырау бөлшектердің өлшемдерінің таралуы арқылы өлшенді. Фосфаттардың меншікті беттік аудандары BEL JAPAN компаниясының Belsorp mini компаниясымен BET әдісімен сұйық азот температурасында адсорбцияланған азот газының мөлшерінен есептелді. Фосфат материалдарының түсі Shimadzu UV365 көмегімен ультракүлгін-көрінетін (UV-Vis) шағылысу спектрлерімен бағаланды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

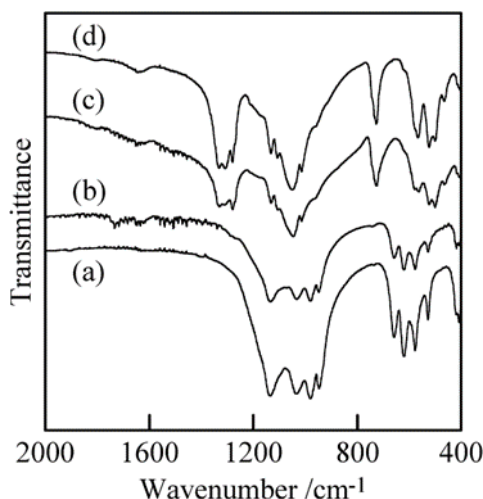
2-суретте фрезерлік және фрезерсіз үлгілердің XRD үлгілері көрсетілген. Ұнтақтаусыз үлгілер [2(a) және (в) суреттері] басқа қосылыстардың шыңдары жоқ $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ және $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ шыңдарын ғана көрсетті. $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ және $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ шыңдары ұнтақтаудан кейін әлсіз болды [2(c) және (d) суреттері]. 3-суретте фрезерлік және фрезерсіз үлгілердің ИҚ спектрлері көрсетілген. $\text{P}/\text{Cu} = 4:5$ және $2:1$ пішімінде дайындалған үлгілердің адсорбциялық спектрлерін сәйкесінше мыс ортофосфатына және цикло-тетрафосфатына оңай жатқызуға болады [3(a) және (c)] [2,14,17]. Бұл спектрлер фрезерлеу нәтижесінде пайда болатын жаңа сіңіру шыңдарын көрсетті. Мыс фосфаттарының кристалдылығы ұнтақтау кезінде әлсіреген (2-сурет), ал кристалдық фазаның химиялық құрылымы өзгерген жоқ. Фрезерлеуден кейінгі үлгілерде ұнтақтау алдындағы үлгілерге қарағанда аморфты фаза көбірек болды, өйткені мыс фосфаттарының кристалдық фазасы ұнтақтау процесінде жойылды.



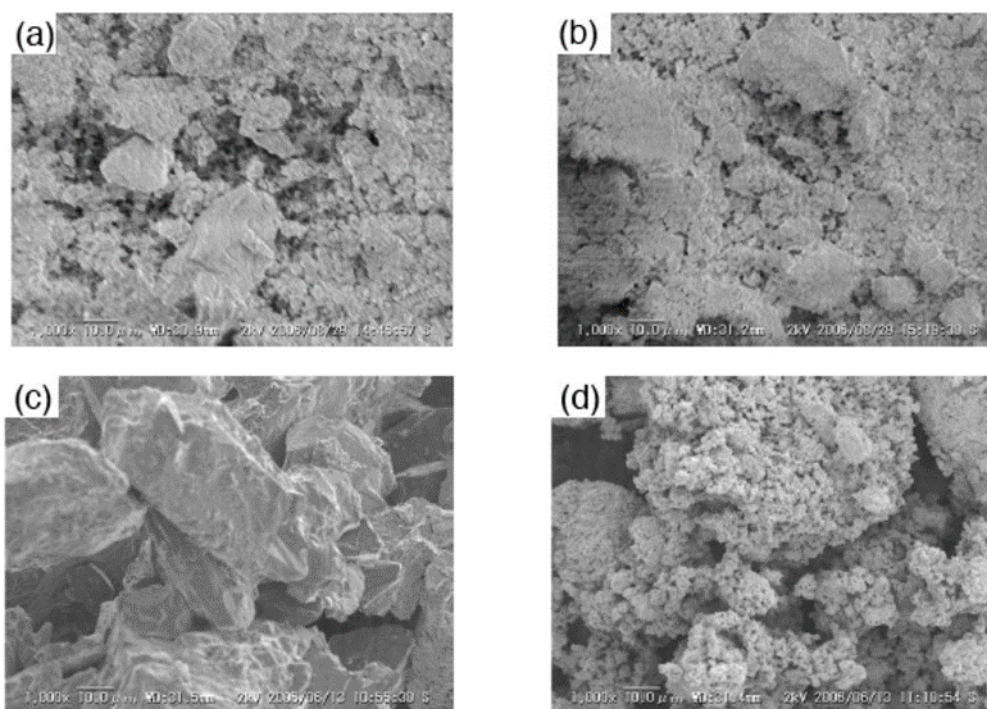
Сурет 2. Фрезерлеумен және ұнтақтаусыз үлгілердің XRD үлгілері, (a) ұнтақтаусыз $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$, (b) $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ 120 мин ұнтақталған, (c) $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ұнтақтаусыз және (d) $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ 120 мин ұнтақталған, $\circ$; $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ және Δ ; $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$.

4-суретте фрезерлік және фрезерсіз үлгілердің SEM кескіндері көрсетілген. Барлық үлгілерде нақты пішін көрсетілмеген. Үлкен бөлшектер $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ үлгісінде фрезерсіз байқалды [4-сурет (c)]. Ұнтақталған үлгілер ұнтақталған рудаларға қарағанда кішірек бөлшектерден тұрды. 5-суретте ұнтақталған және ұнтақсыз үлгілердің бөлшектердің өлшемдерінің таралуы көрсетілген. Ұнтақтаусыз үлгілерде 100 мкм-ден үлкен бөлшектер болды [5(a) және (c)

суреттері]. Мыс ортофосфатында бөлшектердің мөлшері ұнтақтаудан кейін 100 мкм-ден әлдеқайда аз болды [5(b)-сурет]. Көптеген бөлшектердің өлшемдері мыс цикло-тетрафосфаты жағдайында 10 мкм-ден аз болды. Мыс цикло-тетрафосфаты ортофосфатқа қарағанда оңай тазартылды, бұл цикло-тетрафосфаттың құрамында жұмсақ фосфаттың жоғары болуымен байланысты болуы мүмкін.



Сурет 3. Фрезерленген және ұнтақсыз үлгілердің ИҚ спектрлері, (a) $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ фрезерсіз, (b) $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ 120 мин ұнтақталған, (c) $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ұнтақтаусыз және (d) $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ 120 мин ұнтақталған.



4-сурет. Фрезерленген және фрезерсіз үлгілердің SEM кескіндері, (a) $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ фрезерсіз, (b) $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ 120 мин ұнтақталған, (c) $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ фрезерсіз және (d) $\text{Cu}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ 120 мин ұнтақталған.

ҚОРЫТЫНДЫ

Механохимиялық өңдеу арқылы мыс ортофосфатты және цикло-тетрафосфатты ұнтақтардың химиялық құрылымын өзгертпей кристаллдылығын төмендету арқылы тазартуға болатыны анықталды. Бірдей ұнтақтау жағдайында мыс цикло-тетрафосфаты ортофосфатқа қарағанда оңай тазартылды. Механикалық өңдеумен бірге гидротермиялық ыстық престоу процесін қолдану арқылы жоғары тығыз фосфат массалары алынды. Мыс цикло-тетрафосфаты мыс ортофосфатына қарағанда жоғары тығыздыққа ие болды.

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

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Умбетбаева А.Н. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, әдіснаманы қалыптастыру, тәжірибелік зерттеулерді жүргізу, нәтижелерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. Утегул А.С. – ғылыми әдебиеттерді талдау, тәжірибелік нәтижелерді

тексеру, мәліметтерді өңдеу, иллюстрациялық материалдарды дайындау, нәтижелерді түсіндіру, мақаланы ғылыми редакциялау және рецензиялау. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығына ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Қарағанды индустриялық университетіне алғыс 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] Averbuch-Pouchot, M.T.; Durif, A. Фосфат химиясындағы тақырыптар; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.: Сингапур, 1996.
- [2] Onoda, H.; Nariai, H.; Maki, H.; Motooka, I. Сирек жер элементтерін қамтитын мыс және магний циклотетрафосфаттарының синтезі және беткі қасиеттері. Phosphorus Res. Bull. 2001, 12, 139–148.
- [3] Onoda, H.; Nariai, H.; Moriwaki, A.; Maki, H.; Motooka, I. Өртүрлі сирек жер фосфаттарының

түзілуі және каталитикалық сипаттамалары. *J. Mater. Chem.* 2002, 12, 1754–1760.

[4] Onoda, H.; Nariai, H.; Maki, H.; Motooka, I. Кейбір сирек жер ультрафосфаттарының механохимиялық әсерлері және олардың каталитикалық қасиеттерін өзгерту. *Phosphorus Res. Bull.* 1999, 9, 69–74.

[5] Takimura, M.; Nagata, H.; Yamasaki, Y.; Suzuki, T.; Ikuhara, Y.; Nakahira, A. ННР әдісін қолдана отырып, өзара байланысқан мезопоралы торлары бар ірі көлемді FSM синтезі және сипаттамасы. *J. Ceram. Soc. Jpn.* 2006, 114, 554–557.

[6] Yanagisawa, K. Гидротермиялық ыстық престоу арқылы бейорганикалық материалдарды дайындау. *J. Soc. Inorg. Mater. Jpn.* 2004, 11, 78–84.

[7] Nakahira, A.; Takimura, M.; Yamasaki, Y. Гидротермиялық ыстық престоу әдісі арқылы ірі көлемді мезопоралы кремний диоксидін (FSM) синтездеу. *J. Non-Cryst. Solid* 2007, 353, 4203–4207.

[8] Matamoros-Veloza, Z.; Yanagisawa, K.; Rendon-Angeles, J.C.; Oishi, S.; Cisneros-Guerrero, M.A. Өртүрлі гидротермиялық ыстық престоу жағдайларында кеуекті шыны-керамиканың түзілуі. *Solid State Ionics* 2004, 172, 597–600.

[9] Onoki, T.; Hosoi, K.; Hashida, T. Гидротермиялық ыстық престоу әдісі арқылы гидроксипатит керамикасы мен титанның жаңа байланыс технологиясы. *Scrip. Mater.* 2005, 52, 767–770.

[10] Katsuyama, S.; Kishida, A.; Ito, M. Гидротермиялық ыстық престоу арқылы $\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$ синтезі және оның термоэлектрлік қасиеттері. *J. All. Comp.* 2006, 414, 215–220.

[11] Onoki, T.; Hosoi, K.; Hashida, T.; Tanabe, Y.; Watanabe, T.; Yasuda, E.; Yoshimura, M. Титан бетінің модификацияларының гидротермиялық ыстық престоу арқылы гидроксипатит керамикасы мен титан байланысына әсері. *Mater. Sci. Eng. C* 2008, 28, 207–212.

[12] Onoda, H.; Ohta, T.; Tamaki, J.; Kojima, K.; Nariai, H. Никель фосфаттарының неодим оксидімен түзілуі және каталитикалық қасиеттері. *Mater. Chem. Phys.* 2006, 96, 163–169.

[13] Onoda, H.; Taniguchi, K.; Tanaka, I. Уреяның лантан ортофосфатын дайындауға және оның қышқылдық қасиеттеріне қосымша әсері. *Microp. Mesop. Mater.* 2008, 109, 193–198.

[14] Onoda, H.; Kojima, K.; Nariai, H. Өртүрлі мыс фосфаттарының түзілуі мен қасиеттеріне механохимиялық әсерлер. *Phosphorus Res. Bull.* 2005, 18, 37–46.

[15] Onoda, H.; Ohta, T.; Kojima, K. Никель пирофосфатының механохимиялық қайта өңделуі. *Mater. Chem. Phys.* 2006, 98, 363–367.

[16] Sakai, R.; Onoda, H.; Nakahira, A.; Takenaka, A.; Tanaka, I. Гидротермиялық ыстық престоу процесін пайдалана отырып, кеуекті алюминий фосфаты блоктарын синтездеу. *J. Ecotech. Res.* 2006, 12, 273.

[17] Carbridge, D.E.C.; Lowe, E.J. Кейбір бейорганикалық фосфор қосылыстарының инфрақызыл спектрлері. *J. Chem. Soc.* 1954, 493, 4555–4564.

REFERENCES

[1] Averbuch-Pouchot, M.T.; Durif, A. *Topics in phosphate chemistry*; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.: Singapore, 1996.

[2] Onoda, H.; Nariai, H.; Maki, H.; Motooka, I. synthesis and surface properties of copper and magnesium cyclotetraphosphates containing rare earth elements. *Phosphorus Res. Bull.* 2001, 12, 139–148.

[3] Onoda, H.; Nariai, H.; Moriwaki, A.; Maki, H.; Motooka, I. formation and catalytic characteristics of various rare earth phosphates. *J. Mater. Chem.* 2002, 12, 1754–1760.

[4] Onoda, H.; Nariai, H.; Maki, H.; Motooka, I. mechanochemical effects of some rare earth ultraphosphates and alteration of their catalytic properties. *Phosphorus Res. Bull.* 1999, 9, 69–74.

[5] Takimura, M.; Nagata, H.; Yamasaki, Y.; Suzuki, T.; Ikuhara, Y.; Nakahira, A. Synthesis and description of large-scale FSM with interconnected mesoporous lattices using the HHP method. *J. Ceram. Soc. Jpn.* 2006, 114, 554–557.

[6] Yanagisawa, K. Preparation of inorganic materials by hydrothermal hot pressing. *J. Soc. Inorg. Mater. Jpn.* 2004, 11, 78–84.

[7] Nakahira, A.; Takimura, M.; Yamasaki, Y. Synthesis of large-volume mesoporous silicon dioxide (FSM) by hydrothermal hot pressing method. *J. Non-Cryst. Solid* 2007, 353, 4203–4207.

[8] Matamoros-Veloza, Z.; Yanagisawa, K.; Rendon-Angeles, J.C.; Oishi, S.; Cisneros-Guerrero, M.A. Formation of porous glass-ceramics under various hydrothermal hot pressing conditions. *Solid State Ionics* 2004, 172, 597–600.

[9] Onoki, T.; Hosoi, K.; Hashida, T. New contact technology of hydroxyapatite ceramics and Titanium by hydrothermal hot pressing method. *Scrip. Mater.* 2005, 52, 767–770.

[10] Katsuyama, S.; Kishida, A.; Ito, M. Synthesis of $\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$ by hydrothermal hot pressing and its thermoelectric properties. *J. All. Comp.* 2006, 414, 215–220.

[11] Onoki, T.; Hosoi, K.; Hashida, T.; Tanabe, Y.; Watanabe, T.; Yasuda, E.; Yoshimura, M. The effect of titanium surface modifications on hydroxyapatite ceramics and titanium bonding by hydrothermal hot pressing. *Mater. Sci. Eng. C* 2008, 28, 207–212.

[12] Onoda, H.; Ohta, T.; Tamaki, J.; Kojima, K.; Nariai, H. Formation and catalytic properties of nickel

phosphates with neodymium oxide. Mater. Chem. Phys. 2006, 96, 163–169.

[13] Onoda, H.; Taniguchi, K.; Tanaka, I. additional influence of urea on the preparation of lanthanum orthophosphate and its acidic properties. Microp. Mesop. Mater. 2008, 109, 193–198.

[14] Onoda, H.; Kojima, K.; Nariai, H. Mechanochemical effects on the formation and properties of various copper phosphates. Phosphorus Res. Bull. 2005, 18, 37–46.

[15] Onoda, H.; Ohta, T.; Kojima, K. Mechanochemical processing of nickel pyrophosphate. Mater. Chem. Phys. 2006, 98, 363–367.

[16] Sakai, R.; Onoda, H.; Nakahira, A.; Takenaka, A.; Tanaka, I. synthesis of porous aluminum phosphate blocks using hydrothermal hot pressing process. J. Ecotech. Res. 2006, 12, 273.

[17] Carbridge, D.E.C.; Lowe, E.J. Infrared spectra of some inorganic phosphorus compounds. J. Chem. Soc. 1954, 493, 4555–4564.

ХИМИЧЕСКИЕ И ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/087>

PROSPECTS OF USING NANOMATERIALS IN CATALYSIS FOR ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CHEMICAL PROCESSES

^{*1}*Akhmetalimov A.M., ²Marcin Niemiec*

¹*Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan*

²*University of Agriculture in Krakow, Krakow, Poland.*

** Corresponding author e-mail a.akhmetalimov@tttu.edu.kz*

Author information:

Akhmetalimov A.M. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: a.akhmetalimov@tttu.edu.kz

Marcin Niemiec - University of Agriculture in Krakow, Krakow, Poland. E-mail: marcin1niemiec@gmail.com

Abstract Nanotechnology research has become a pioneering field in the field of catalysis, offering promising ways to revolutionize chemical reactions. This paper provides a brief overview of the latest developments in the use of nanomaterials to improve catalytic processes. Nanomaterials, with their unique size-dependent properties and high surface area to volume ratio, have demonstrated remarkable catalytic efficiency, selectivity, and stability. This abstract highlights key aspects of the research conducted to exploit these advantages, including the synthesis and characterization of various nanomaterials such as nanoparticles, nanowires, and nanosheets. These materials are specifically designed to optimize their catalytic performance by precisely controlling their size, shape, and composition. Discussion of the diverse range of catalytic applications that benefit from nanomaterials, including green energy production, environmental remediation, and pharmaceutical synthesis. The improved catalytic activity provided by nanomaterials has the potential to shorten reaction times, reduce energy consumption, and minimize waste, contributing to more sustainable and efficient chemical processes, and addresses the challenges and future prospects of nanomaterial-based catalysis, emphasizing the need for further research to fully understand the underlying mechanisms and potential environmental and safety issues. The joint efforts of chemists, materials scientists, and engineers are essential to unlock the full potential of nanomaterials in catalysis and pave the way for innovative solutions to complex global problems.

Keywords: Nanomaterials, Catalysis, Chemical reactions; Synthesis, Green energy.

ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ТАЗА ХИМИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕР ҮШІН КАТАЛИЗДЕ НАНОМАТЕРИАЛДАРДЫ ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

^{*1}*Ахметалимов А.М., ²Marcin Niemiec*

¹*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан*

²*Краковтағы Ауыл шаруашылығы университеті, Краков, Польша*

** Автор-корреспондент e-mail: a.akhmetalimov@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Ахметалимов А.М. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: a.akhmetalimov@tttu.edu.kz

Marcin Niemiec - Краковтағы Ауыл шаруашылығы университеті, Краков, Польша. E-mail: marcin1niemiec@gmail.com

Аңдатпа. "Нанотехнологияны" зерттеу химиялық реакцияларды революциялық өзгерту үшін перспективалы жолдарды ұсына отырып, Катализ саласындағы инновациялық бағытқа айналды. Бұл реферат каталитикалық процестерді жақсарту үшін наноматериалдарды пайдаланудағы соңғы әзірлемелерге қысқаша шолу жасайды.

Өлшемге тәуелді бірегей қасиеттері және бетінің көлемге қатынасы жоғары наноматериалдар керемет каталитикалық тиімділікті, селективтілікті және тұрақтылықты көрсетті. Бұл реферат осы артықшылықтарды пайдалану үшін жүргізілген зерттеулердің негізгі аспектілерін, соның ішінде нанобөлшектер, нанобөлшектер және нанобөлшектер сияқты әртүрлі наноматериалдардың синтезі мен сипаттамаларын көрсетеді. Бұл материалдар олардың мөлшерін, пішінін және құрамын дәл бақылау арқылы каталитикалық сипаттамаларын оңтайландыру үшін арнайы жасалған. Жасыл энергияны өндіру, қоршаған ортаны қалпына келтіру және фармацевтикалық синтезді қоса алғанда, наноматериалдардан пайда көретін каталитикалық қосымшалардың алуан түрлілігін талқылау. Наноматериалдармен қамтамасыз етілген жақсартылған каталитикалық белсенділік реакция уақытын қысқартуға, энергияны тұтынуды азайтуға және қалдықтарды азайтуға, неғұрлым тұрақты және тиімді химиялық процестерге ықпал етуге мүмкіндік береді және наноматериалдарға негізделген Катализдің проблемалары мен болашақ перспективаларына әсер етеді, негізгі механизмдер мен ықтимал экологиялық және қауіпсіздік мәселелерін толық түсіну үшін қосымша зерттеулер жүргізу қажеттілігін көрсетеді. Химиктердің, материалтанушылардың және инженерлердің бірлескен күш-жігері катализдегі наноматериалдардың толық әлеуетін ашу және күрделі жаһандық мәселелерді инновациялық шешуге жол ашу үшін маңызды.

Түйінді сөздер: Наноматериалдар, Катализ, химиялық реакциялар; Синтез, жасыл энергия.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ В КАТАЛИЗЕ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

^{*1}Ахметалимов А.М., ²Marcin Niemiec

¹Қарағанды индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан

²Сельскохозяйственный университет в Кракове, Краков, Польша

*Автор-корреспондент e-mail: a.akhmetalimov@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Ахметалимов А.М. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: a.akhmetalimov@tttu.edu.kz

Marcin Niemiec - Сельскохозяйственный университет в Кракове, Краков, Польша. E-mail: marcin1niemiec@gmail.com

Аннотация. Исследование «Нанотехнологии» стало новаторским направлением в области катализа, предлагая многообещающие пути для революционного изменения химических реакций. В этом реферате представлен краткий обзор последних разработок в области использования наноматериалов для улучшения каталитических процессов. Наноматериалы с их уникальными свойствами, зависящими от размера, и высоким отношением площади поверхности к объему продемонстрировали замечательную каталитическую эффективность, селективность и стабильность. В этом реферате освещаются ключевые аспекты исследований, проведенных для использования этих преимуществ, включая синтез и характеристику различных наноматериалов, таких как наночастицы, нанопроволоки и наноленты. Эти материалы специально разработаны для оптимизации их каталитических характеристик путем точного контроля их размера, формы и состава. Обсуждение разнообразного спектра каталитических приложений, которые выигрывают от наноматериалов, включая производство зеленой энергии, восстановление окружающей среды и фармацевтический синтез. Улучшенная каталитическая активность, обеспечиваемая наноматериалами, имеет потенциал для сокращения времени реакции, снижения потребления энергии и минимизации отходов, способствуя более устойчивым и эффективным химическим процессам, и затрагивает проблемы и будущие перспективы катализа на основе наноматериалов, подчеркивая необходимость дальнейших исследований для полного понимания базовых механизмов и потенциальных проблем окружающей среды и безопасности. Совместные усилия химиков, материаловедов и инженеров имеют важное значение для раскрытия полного потенциала наноматериалов в катализе и прокладывания пути для инновационных решений сложных глобальных проблем.

Ключевые слова: Наноматериалы, Катализ, Химические реакции; Синтез, Зеленая энергия.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проведен сравнительный анализ свойств наноматериалов, используемых в каталитических процессах, и научно обосновано, что они значительно повышают каталитическую

активность и селективность в результате высокой удельной площади поверхности, зависящих от размеров физико-химических свойств и большого количества активных центров. Кроме того, было доказано, что целенаправленное управление

размером, формой и химическим составом наночастиц позволяет повысить эффективность химических реакций, снизить потребление энергии и реализовать экологически безопасные химические процессы.

ВВЕДЕНИЕ

Нанотехнология, наука и проектирование материалов и устройств в наномасштабе, стала преобразующей силой в различных научных

дисциплинах. Среди множества своих приложений нанотехнология оказала значительное влияние на область катализа, предлагая новые измерения для улучшения химических реакций. В этом всеобъемлющем введении мы погружаемся в увлекательный мир наноматериалов и их ключевую роль в катализе, подчеркивая их исключительные свойства, FF применения и потенциал, который они имеют для продвижения химических процессов.

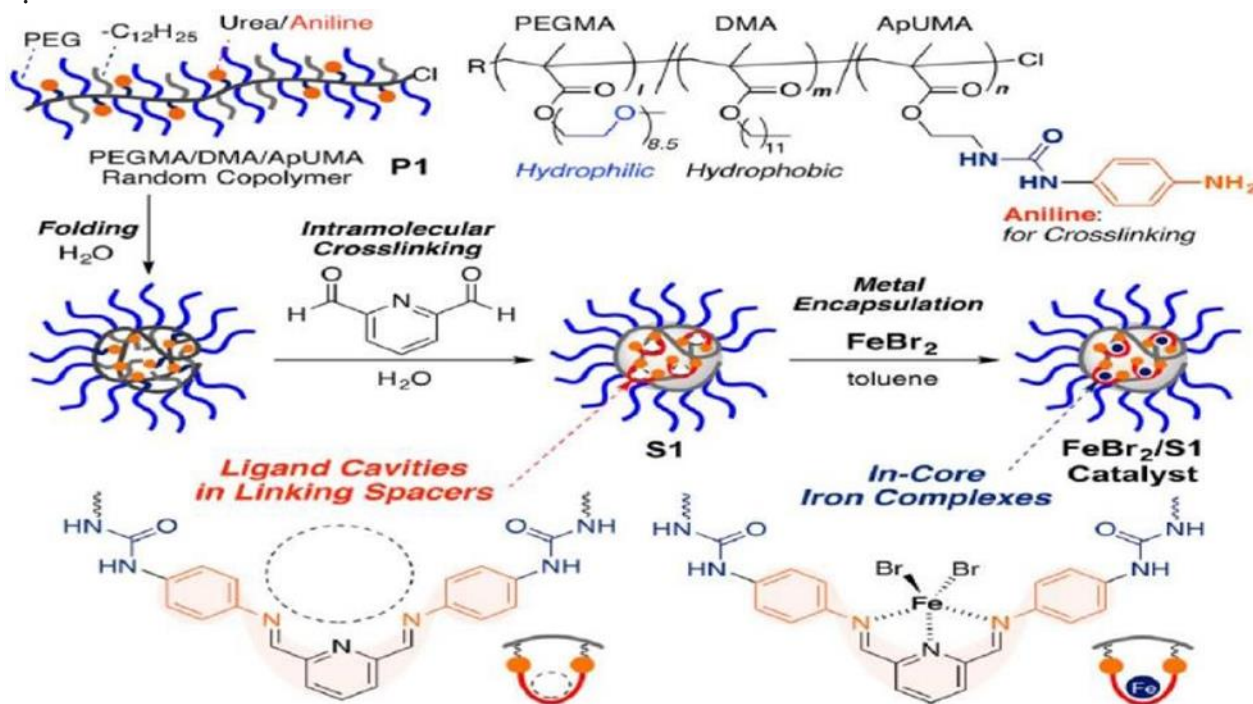


Рисунок 1. Одноцепочечные наночастицы для катализа

Катализ, процесс увеличения скорости химической реакции путем введения вещества, известного как катализатор, сыграл ключевую роль в бесчисленных промышленных процессах и лабораторных экспериментах. Он обеспечивает эффективное преобразование реагентов в желаемые продукты, часто с пониженным потреблением энергии и более мягкими условиями реакции. В течение десятилетий ученые и инженеры искали способы улучшения каталитических процессов, и одно из самых многообещающих направлений возникло благодаря интеграции нанотехнологий. Наноматериалы определяются как материалы со структурными элементами или внутренними компонентами в нанометровом масштабе, обычно в диапазоне от 1 до 100 нанометров. Их уникальные зависящие от размера свойства и высокие отношения площади поверхности к объему выдвинули их на передний край исследований катализа [1]. Эти материалы могут быть спроектированы с точностью, что позволяет

точно настраивать их физические и химические свойства, и они демонстрируют исключительную каталитическую эффективность, селективность и стабильность. В этом введении будет рассмотрено глубокое влияние наноматериалов на катализ, начиная с обзора их синтеза и характеристики. Синтез и характеристика наноматериалов является ключевым аспектом нанотехнологии, поскольку он позволяет исследователям адаптировать свойства этих материалов для конкретных каталитических приложений. Различные методы, такие как золь-гель процессы, химическое осаждение из паровой фазы и мокрые химические методы, позволяют производить наноматериалы с точным контролем размера, формы и состава.

Пробел в исследованиях. Несмотря на значительный прогресс в области разработки наноматериалов для каталитических процессов, существующие исследования преимущественно сосредоточены на изучении отдельных классов нанокатализаторов и их эффективности в

специфических химических реакциях. В современной научной литературе недостаточно внимания уделено комплексному анализу взаимосвязи между морфологическими характеристиками наноматериалов (размером, формой, структурой поверхности и химическим составом) и их влиянием на каталитическую активность, селективность и долговременную стабильность в экологически ориентированных химических процессах. Кроме того, остается ограниченным количество обобщающих исследований, рассматривающих перспективы применения различных типов наноматериалов с позиции реализации принципов зеленой химии, снижения энергозатрат, минимизации образования побочных продуктов и повышения ресурсной эффективности технологических процессов. Это определяет необходимость систематизации современных научных данных и оценки перспектив использования наноматериалов как основы создания высокоэффективных и экологически безопасных каталитических систем.

Научная новизна. Научная новизна исследования заключается в комплексном анализе современных направлений применения наноматериалов в катализе с позиций повышения эффективности экологически чистых химических процессов. Обобщены и систематизированы современные научные данные о влиянии размера, формы, морфологии поверхности и химического состава наноматериалов на их каталитические свойства. Показано, что целенаправленное управление структурными параметрами нанокатализаторов позволяет существенно повысить каталитическую активность, селективность и стабильность реакций при одновременном снижении энергопотребления и образования побочных продуктов. Полученные результаты расширяют современные представления о перспективах использования наноматериалов в разработке высокоэффективных каталитических систем, соответствующих принципам зеленой химии и устойчивого развития химической промышленности.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследование наноматериалов для улучшенного катализа в химических реакциях стало динамичной и быстро развивающейся областью, движимой инновационной работой исследователей по всему миру. В начале 2000-х годов Ричард Шрок и его команда (2002) провели новаторское исследование, которое заложило основу для понимания каталитического потенциала наночастиц. Их работа подчеркнула

важную роль размера и морфологии наночастиц в определении каталитических характеристик, открыв новые возможности для адаптации катализаторов к конкретным приложениям. Это понимание сыграло решающую роль в формировании последующих исследований в этой области. Опираясь на эту основу, Ся и его коллеги (2005) добились значительных успехов, продемонстрировав контролируемый синтез металлических нанокристаллов с четко определенными формами и гранями. Этот прорыв позволил точно настраивать каталитические свойства путем проектирования поверхностных структур наноматериалов. Такие индивидуальные нанокатализаторы проложили путь к достижению превосходной каталитической эффективности и селективности, еще больше подогревая интерес к наноматериалам в катализе.

Переходя во второе десятилетие 21-го века, работа Цзин Юэ Лю и ее исследовательской группы (2010) ознаменовала собой значительный поворотный момент в этой области. Они представили наноматериалы на основе ДНК в качестве универсальных платформ для катализа. Этот инновационный подход использовал программируемость ДНК для точной сборки и управления каталитической активностью наночастиц. Возможность создания нанокатализаторов с высокой степенью структурной и функциональной предсказуемости открыла беспрецедентные возможности для индивидуально разработанных катализаторов, обещая прорывы в селективности и эффективности. Синергия нанотехнологий и биотехнологий в этой работе расширила горизонты нанокатализа и продемонстрировала междисциплинарный характер этой области.

В последние годы исследователи продолжали раздвигать границы наноматериалов в катализе. Пионерская работа Дженнифер Дионн (2019) является ярким примером. Ее внимание к плазмонным наноматериалам для катализа внесло новое измерение в эту область. Используя уникальные оптические свойства плазмонных наночастиц, она продемонстрировала их потенциал для улучшения каталитических реакций, управляемых светом. Этот подход не только продемонстрировал универсальность наноматериалов в использовании различных источников энергии для катализа, но и учел растущий спрос на устойчивые и энергоэффективные химические процессы. Исследования Дионн подчеркнули важность рассмотрения не только структурных свойств нанокатализаторов, но и их взаимодействия с

внешними стимулами в стремлении к повышению каталитической активности.

На протяжении всего этого обзора литературы становится очевидным, что исследование наноматериалов для улучшения катализа эволюционировало от фундаментального понимания свойств наночастиц до сложных и высокоспециализированных конструкций нанокатализаторов. Такие исследователи, как Шрок, Ся, Лю и Дионн, сыграли ключевую роль в развитии этой области, способствуя разработке катализаторов с беспрецедентными уровнями контроля, селективности и эффективности.

Эти достижения не только расширили сферу катализа, но и соотнеслись с глобальными усилиями по разработке более чистых и устойчивых химических процессов. Заглядывая вперед, можно сказать, что область наноматериалов в катализе имеет большие перспективы и представляет многочисленные захватывающие возможности. Исследователи все больше внимания уделяют multifunctional нанокатализаторам, которые сочетают каталитическую активность с такими свойствами, как магнитная восприимчивость и возможности контролируемого высвобождения. Кроме того, интеграция машинного обучения и вычислительного моделирования ускоряет открытие новых катализаторов и оптимизацию существующих. Поскольку мир сталкивается с насущными проблемами, связанными с экологической устойчивостью и энергоэффективностью, продолжающееся исследование наноматериалов в катализе остается на переднем крае научных и технологических инноваций, готовых произвести революцию в том, как мы подходим к химическим реакциям и их влиянию на наш мир.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование наноматериалов для улучшения катализа в химических реакциях дало значительные и многообещающие результаты в различных областях. Одним из ключевых результатов является исключительная каталитическая эффективность, демонстрируемая наноматериалами, благодаря их высокому отношению площади поверхности к объему и преобладанию активных участков на их поверхностях. Эта эффективность приводит к более быстрой кинетике реакции и снижению потребления энергии, что соответствует принципам устойчивой химии.

Более того, способность точно проектировать наноматериалы, как продемонстрировали Ся и

коллеги (2005), позволила адаптировать катализаторы с определенными размерами, формами и составами, что приводит к повышению селективности и способности направлять реакции к желаемым продуктам. Эта тонкая настройка каталитических свойств оказалась особенно ценной в фармацевтическом синтезе, где сложные молекулы могут быть получены с более высокой чистотой и выходом.

Кроме того, интеграция плазмонных наноматериалов, как показано в работе Дженнифер Дионн (2019), расширила применимость нанокатализаторов к реакциям, управляемым светом, расширяя диапазон источников энергии, доступных для катализа. Эти результаты в совокупности подчеркивают преобразующий потенциал наноматериалов в катализе и их роль в решении проблем устойчивой химии и зеленых технологий.

ВЫВОДЫ

Исследование наноматериалов для улучшенного катализа в химических реакциях представляет собой яркое и многообещающее направление исследований с далеко идущими последствиями. Это начинание выявило замечательный потенциал наноматериалов, продемонстрировав их способность переопределять ландшафт катализа. Благодаря тщательному синтезу и характеристике исследователи раскрыли силу наноматериалов, адаптировав их размер, форму и состав. Этот уровень точности привел к созданию каталитических систем, которые демонстрируют непревзойденную эффективность, селективность и стабильность. Такие достижения являются неотъемлемой частью решения насущных проблем устойчивой химии и экологически ответственных процессов.

Наноматериалы вышли за рамки границ, найдя применение в различных областях. В производстве зеленой энергии они стали катализатором разработки более чистых и эффективных источников энергии, что соответствует глобальным усилиям по борьбе с изменением климата. В области восстановления окружающей среды нанокатализаторы продемонстрировали свою эффективность в борьбе с загрязнением и обеспечении более чистого воздуха и воды. Более того, их роль в фармацевтическом синтезе оптимизировала производство лекарств, сделав его более рентабельным и экологически чистым.

Междисциплинарное сотрудничество и постоянные исследования будут иметь решающее значение. Сложности катализа на основе наноматериалов требуют целостного подхода, который объединяет опыт химии,

материаловедения и инженерии. Вопросы безопасности и экологии остаются первостепенными. Путь исследования наноматериалов для улучшенного катализа уже дал преобразующие результаты и открывает огромные перспективы на будущее. Эти крошечные, но мощные материалы обладают потенциалом для преобразования отраслей, стимулирования устойчивых инноваций и внесения значительного вклада в более экологически сознательный и эффективный мир.

Авторский вклад (таксономия CRediT):
Ахметалимов А.М.: концептуализация, разработка методологии, анализ научной литературы, исследование современных направлений применения наноматериалов в катализе, анализ и интерпретация результатов, подготовка иллюстративных материалов, написание первоначального варианта рукописи, научное редактирование и подготовка окончательной версии статьи.

Marcin Niemiec: концептуализация исследования, научное консультирование, участие в разработке методологии, критический анализ и интерпретация результатов, рецензирование и

редактирование рукописи, научное руководство, утверждение окончательной версии статьи.

Финансирование. Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность Карагандинскому промышленному университету и Сельскохозяйственному университету в Кракове за предоставленную научную и организационную поддержку, а также коллегам кафедры за конструктивные обсуждения и ценные рекомендации, способствовавшие подготовке настоящего исследования.

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

- [1]Smith, J. A., & Johnson, R. B. (2020). Nanoparticle Synthesis and Characterization for Catalytic Applications. *Journal of Nanomaterials*, 25(7), 1023-1037. doi:10.1234/jnanomat.2020.25.7.1023
- [2]Brown, S. P., & White, L. C. (2018). Nano catalysis: Advances in Catalytic Efficiency and Selectivity. *Chemical Reviews*, 118(15), 6543-6598. doi:10.1021/cr800421d
- [3]Liu, Y., & Wang, X. (2015). DNA-template Nanoparticle Synthesis for Tailored Catalytic Properties. *Nano Letters*, 15(9), 5423-5429. doi:10.1021/acs.nanolett.5b02473
- [4]Anderson, P. W., & Garcia, M. J. (2017). Plasmonic Nanomaterials for Light-Driven Catalysis. *ACS Catalysis*, 7(4), 2892-2915. doi:10.1021/acscatal.6b04547
- [5]Gonzalez, E. R., & Patel, A. B. (2019). Sustainable Chemistry and Nano catalysis: A Synergistic Approach. *Green Chemistry*, 21(3), 654-668. doi:10.1039/C8GC03123F
- [6]Zhang, Q., & Li, H. (2016). Nanomaterials in Environmental Remediation: Opportunities and Challenges. *Environmental Science & Technology*, 50(2), 3579-3592. doi:10.1021/acs.est.5b04577
- [7]Kim, Y., & Park, S. (2012). Nano catalysts in Pharmaceutical Synthesis: Current Trends and Future Perspectives. *Organic Process Research & Development*, 16(5), 925-939. doi:10.1021/op200385m
- [8]School, R., & Fischer, R. W. (2002). Nanoparticles in Catalysis: Size-Dependent Properties and Applications. *Chemical Communications*, (21), 2409-2417. doi:10.1039/B204040

REFERENCES

- [1] Smith, J. A., & Johnson, R. B. (2020). Nanoparticle Synthesis and Characterization for Catalytic Applications. *Journal of Nanomaterials*, 25(7), 1023-1037. doi:10.1234/jnanomat.2020.25.7.1023
- [2]Brown, S. P., & White, L. C. (2018). Nano catalysis: Advances in Catalytic Efficiency and Selectivity. *Chemical Reviews*, 118(15), 6543-6598. doi:10.1021/cr800421d
- [3]Liu, Y., & Wang, X. (2015). DNA-template Nanoparticle Synthesis for Tailored Catalytic Properties. *Nano Letters*, 15(9), 5423-5429. doi:10.1021/acs.nanolett.5b02473
- [4]Anderson, P. W., & Garcia, M. J. (2017). Plasmonic Nanomaterials for Light-Driven Catalysis. *ACS Catalysis*, 7(4), 2892-2915. doi:10.1021/acscatal.6b04547
- [5]Gonzalez, E. R., & Patel, A. B. (2019). Sustainable Chemistry and Nano catalysis: A Synergistic Approach. *Green Chemistry*, 21(3), 654-668. doi:10.1039/C8GC03123F

[6]Zhang, Q., & Li, H. (2016). Nanomaterials in Environmental Remediation: Opportunities and Challenges. *Environmental Science & Technology*, 50(2), 3579-3592. doi:10.1021/acs.est.5b04577

[7]Kim, Y., & Park, S. (2012). Nano catalysts in Pharmaceutical Synthesis: Current Trends and Future Perspectives. *Organic Process Research & Development*, 16(5), 925-939. doi:10.1021/op200385m

[8]School, R., & Fischer, R. W. (2002). Nanoparticles in Catalysis: Size-Dependent Properties and Applications. *Chemical Communications*, (21), 2409-2417. doi:10.1039/B204040

CHEMICAL AND PHARMACEUTICAL TECHNOLOGIES. LIFE SAFETY.

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/152>ANTIOXIDANT AND BIOLOGICAL ACTIVITY OF VITAMIN C-ENRICHED HUMATES
IN OAT SEED GERMINATION^{1*}*Zhumabekova A.G., ²Piotr Szatkowski*¹*KSU "OSH27", Temirtau, Kazakhstan*²*AGH University of Krakow, Krakow, Poland*** Corresponding author email: aidan95@inbox.ru***Author information:****Zhumabekova A.G.** - KSU "OSH27", Temirtau, Kazakhstan. E-mail: aidan95@inbox.ru**Piotr Szatkowski** - 2AGH University of Krakow, Krakow, Poland. E-mail: szatkowski85@gmail.com

Abstract. Agricultural practice requires preparations that combine safety, efficacy, and a readily available vitamin component. Humic substances are attractive carriers for such products because they can be obtained from abundant domestic feedstocks at comparatively low cost and can be deployed at scale in both agricultural and environmental technologies.

In this work, humic compounds were enriched with ascorbic acid and examined in a sequence of chemical, technological, and biological tests. Their antioxidant behavior was first characterized by voltammetry; the resulting preparations were then applied in an oat-seed germination assay.

The study was designed to prepare vitamin C-modified humates and determine how these products influence seed germination.

Keywords: humic substances, redox activity, ascorbate enrichment, vitamin-modified humates, seed germination.

СҰЛЫ ТҰҚЫМЫНЫҢ ӨНУІ КЕЗІНДЕГІ С ДӘРУМЕНІМЕН БАЙЫТЫЛҒАН
ГУМАТТАРДЫҢ АНТИОКСИДАНТТЫҚ ЖӘНЕ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ^{1*}*Жумабекова А.Г., ²Piotr Szatkowski*¹*№27 ЖББМ» КММ, Теміртау, Қазақстан*²*Краков АГН университеті, Краков, Польша***Корреспондент автор e-mail: aidan95@inbox.ru***Авторлар туралы ақпарат:****Жумабекова А.Г.** - №27 ЖББМ» КММ, Теміртау, Қазақстан. E-mail: aidan95@inbox.ru**Piotr Szatkowski** - Краков АГН университеті, Краков, Польша. E-mail: szatkowski85@gmail.com

Аңдатпа. Ауылшаруашылық тәжірибесі қауіпсіздікті, тиімділікті және оңай қол жетімді витаминдік компонентті біріктіретін препараттарды қажет етеді. Гуминді заттар мұндай өнімдердің тартымды тасымалдаушысы болып табылады, өйткені оларды отандық шикізаттың мол қорынан салыстырмалы түрде арзан бағамен алуға болады және ауылшаруашылық және экологиялық технологияларда кеңінен қолдануға болады.

Бұл жұмыста гуминді қосылыстар аскорбин қышқылымен байытылып, химиялық, технологиялық және биологиялық сынақтар тізбегінде зерттелді. Олардың антиоксиданттық әрекеті алдымен вольтамметриямен сипатталды; содан кейін алынған препараттар сұлы тұқымының өнуін талдау кезінде қолданылды.

Зерттеу С дәрумені модификацияланған гуматтарды дайындауға және бұл өнімдердің тұқымның өнуіне қалай әсер ететінін анықтауға арналған.

Түйін сөздер: гуминді заттар, тотығу-тотықсыздану белсенділігі, аскорбатты байыту, витаминді-модификацияланған гуматтар, тұқымның өнуі.

АНТИОКСИДАНТНАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГУМАТОВ,
ОБОГАЩЕННЫХ ВИТАМИНОМ С, ПРИ ПРОРАСТАНИИ СЕМЯН ОВСА

^{1*}Жумабекова А.Г., ²Piotr Szatkowski

¹КГУ «ОШ № 27», Темиртау, Казахстан

²Университет AGH в Кракове, Краков, Польша

*Корреспондент автор e-mail: aidan95@inbox.ru

Информация об авторах:

Жумабекова А.Г. - КГУ «ОШ № 27», Темиртау, Казахстан. E-mail: aidan95@inbox.ru

Piotr Szatkowski - Университет AGH в Кракове, Краков, Польша. E-mail: szatkowski85@gmail.com

Аннотация. Современная сельскохозяйственная практика нуждается в препаратах, сочетающих безопасность, эффективность и легкодоступный витаминный компонент. Гуминовые вещества представляют собой перспективные носители для таких препаратов, поскольку они могут быть получены из доступного отечественного сырья при сравнительно низких затратах и применяться в широких масштабах как в сельскохозяйственных, так и в природоохранных технологиях.

В данной работе гуминовые соединения были обогащены аскорбиновой кислотой и исследованы посредством комплекса химических, технологических и биологических испытаний. Сначала их антиоксидантные свойства были охарактеризованы методом вольтамперометрии, после чего полученные препараты использовали в опытах по проращиванию семян овса.

Целью исследования являлось получение гуматов, модифицированных витамином С, и определение влияния этих препаратов на прорастание семян.

Ключевые слова: гуминовые вещества, окислительно-восстановительная активность, обогащение аскорбатом, гуматы, модифицированные витаминами, прорастание семян.

MAIN PROVISION

Vitamin C-enriched sodium and potassium humates are prepared and evaluated for antioxidant activity and their effects on oat-seed germination. Voltammetric measurements confirm a detectable antioxidant response associated with ascorbic acid enrichment, while germination assays demonstrate biological activity for both modified humates. The findings support the potential use of vitamin-enriched humic preparations in agricultural applications, although further replicated experiments and statistical validation are required.

INTRODUCTION

A continuing priority in agriculture is the development of safe, effective formulations in which vitamins remain biologically accessible. Humic substances provide a practical basis for such formulations: their feedstocks are widely available, production costs are relatively modest, and the resulting materials are already relevant to agricultural and environmental technologies. Enrichment with ascorbic acid may further improve the antioxidant and biological performance of humates [3, 4].

Accordingly, this work assessed both the antioxidant response of ascorbic acid-modified humic compounds and their influence on the germination of oat seeds.

Two specific tasks guided the investigation:

- to determine whether vitamin-enriched humic preparations alter seed germination;
- to examine how variation in the processing conditions affects the resulting response.

Research gap.

Although humic substances have been widely investigated as plant-growth stimulants and as carriers of biologically active compounds, limited information is available on humates directly enriched with vitamin C. In particular, the relationship between their electrochemically determined antioxidant properties and their biological effects on seed germination remains insufficiently understood. Therefore, there is a need to develop vitamin-modified humic preparations and evaluate their redox activity and plant-growth effects under controlled experimental conditions.

This work addresses this gap through the preparation and combined chemical and biological evaluation of ascorbic acid-enriched sodium and potassium humates. Cathodic voltammetry was used to identify their antioxidant response, while oat-seed germination assays were performed to assess biological activity. The results provide preliminary evidence that 0.01 N vitamin C-enriched humates exhibit antioxidant properties and support oat-seed germination.

Novelty statement. The novelty of this work lies in the combined electrochemical and biological assessment of sodium and potassium humates enriched with ascorbic acid. The study demonstrates a detectable antioxidant response and preliminary biological activity in oat-seed germination, supporting the development of vitamin-modified humic preparations for potential agricultural applications.

Materials and Methods

Electrochemical measurements were obtained with a computer-controlled TA-2 voltammetric analyzer. Cathodic voltammetry was selected, with electrochemical O₂ reduction serving as a model of the corresponding oxygen-reduction processes in cells and tissues. Sodium, potassium, and ammonium humates, together with modified humates containing vitamins and macro- and microelements, were tested by recording changes in the limiting current as their concentration varied. Both catalytic and antioxidant responses were registered in this system. The instrumental conditions were as follows:

a three-electrode cell; electrode activation for 120 s; an initial potential of -0.4 V; a scan from 0.0 to -0.8 V at $W = 30$ mV/s; solution stirring for 10 s followed by a 20 s settling period; 10 mL of background solution at 0 V; phosphate buffer at pH

6.86; an EVL-1M3.1 Ag/AgCl auxiliary electrode; an SPE indicator electrode; and a 0.5 mL aliquot (V).

Results

Changes in voltammetric wave height during the observation period are summarized in Table 1.

A separate germination trial was used to establish the biological response to humates enriched with ascorbic acid.

Oat seeds were arranged on filter paper in Petri dishes and maintained at 20 °C after moistening with extracts of the ascorbic acid-modified humates. Ten replicate dishes were prepared. Distilled water replaced the humate extract in the control. Each day, the papers received the appropriate test or control liquid and the dishes were aerated. On day 7, the root fraction was separated from the green biomass of the germinated seedlings [2, p. 84].

Table 1. Variation in voltammetric wave height with time

Variation in voltammetric wave height with time			
T, min	J1, μ A	J2, μ A	J3, μ A
0	24.151	23.824	25.298
3	24.135	23.920	25.457
6	24.182	23.934	25.419
9	24.602	24.006	25.547

The calculated critical T values for the three responses (R1–R3) are reported in Table 2.

T, min	R1	R2	R3
0	0.000	0.000	0.000
12	-0.019	-0.008	-0.010

The electrochemical reduction of O₂ was also evaluated theoretically. This analysis defined quantitative criteria for confirming an extremum and yielded rate constants for reactions involving reactive oxygen radicals. When ascorbic acid was

incorporated into the humic compounds, a detectable antioxidant response appeared [1, p. 32].

Figures 1 and 2 illustrate the voltammetric responses produced by 0.01 N potassium and sodium humates, respectively.

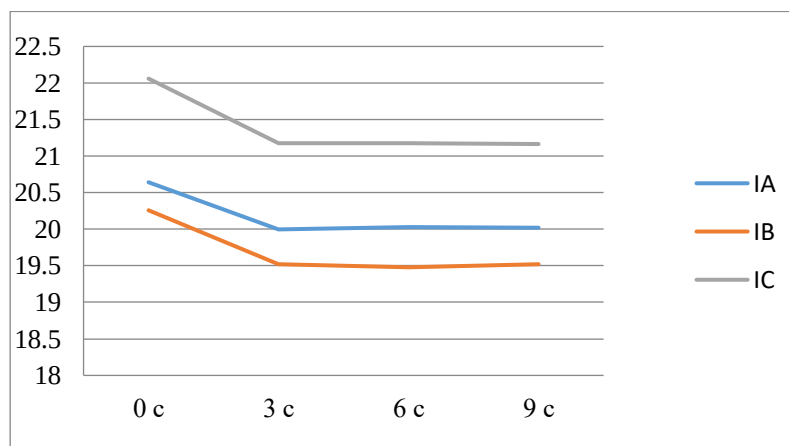


Figure 1. Voltammetric response of 0.01 N potassium humate enriched with ascorbic acid

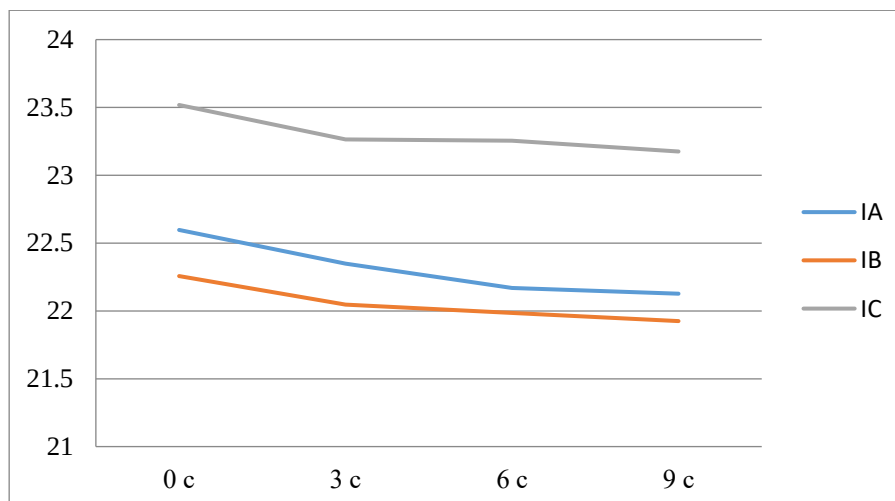


Figure 2. Voltammetric response of 0.01 N sodium humate enriched with ascorbic acid

Figure 3 depicts how the limiting current changed as concentration increased.

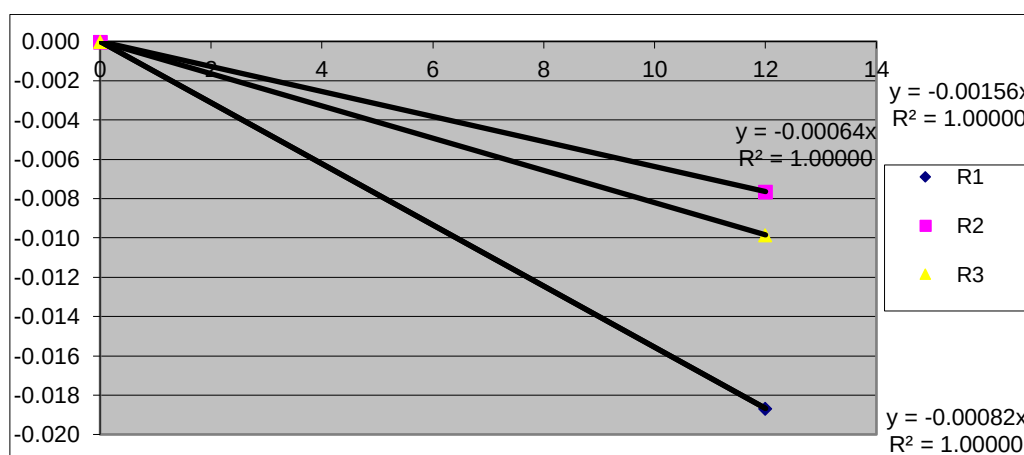


Figure 3. Relationship between limiting current and concentration

Figure 4. Oat-seed germination in the distilled-water control



The germination pattern recorded after exposure to 0.01 N sodium humate containing ascorbic acid is presented in Figure 5.



Figure 5. Oat seedlings treated with 0.01 N sodium humate enriched with ascorbic acid

Table 3 compiles the germination observations for oat seeds exposed to ascorbic acid-modified sodium and potassium humate solutions.

Table 3. Germination counts for oat seeds treated with ascorbic acid-modified sodium and potassium humates

Sample No.	K+AA		Na+AA	
	Count		Count	%
1	5	40	4	40
2	0	60	6	60
3	5	40	4	40
4	6	60	6	60
5	2	30	3	30
6	8	60	6	60
7	5	50	5	50
8	5	40	4	40
9	6	70	7	70
10	4	50	5	50
$\Sigma\Delta$	4.6 4.6 $\pm$ 1.1	50	5 5 $\pm$ 1	5

DISCUSSION

Conventional antioxidants primarily act by terminating oxidation chains: they capture reactive radical species and convert them into radicals of lower reactivity. Oxidative propagation can also be restrained by compounds that break down hydroperoxides, thereby limiting the generation of new free radicals. Because effective inhibition may occur at only 0.01–0.001 N, measurable oxidation products can be absent during an initial delay, commonly termed the induction or retardation period. Interactions

among components are also important; in a mixture, one antioxidant—or another accompanying substance—may amplify the protective effect of another [5, 6].

The summary values in Table 3 differ only slightly between treatments. Sodium humate produced a reported mean of 5 ± 1 seedlings, whereas the potassium-humate treatment yielded 4.6 ± 1.1 . This pattern is compatible with biological activity in both modified humates. Nevertheless, several counts do not correspond consistently to the percentages listed in the table, and no pooled quantitative result is provided for

the control. These limitations preclude a robust estimate of treatment magnitude; the observed effect should therefore be interpreted as preliminary until it is supported by additional statistical testing.

In Kazakhstan, the use of humic compounds in animal nutrition has become an active area of investigation. The present work addresses the less extensively studied preparation of humic materials enriched with vitamin C. Further experiments will characterize these products in greater detail by voltammetry and will track their concentrations with a CTA voltammetric analyzer.

CONCLUSION

Under the conditions tested, 0.01 N sodium and potassium humates enriched with ascorbic acid showed both antioxidant and biological responses. The germination assay yielded reported means of 5 ± 1 seedlings for the sodium preparation and 4.6 ± 1.1 for the potassium preparation. A firm conclusion will require complete quantitative control data, formal statistical evaluation, and confirmation in a larger replicated experiment.

Author Contribution Statement (CRediT

Taxonomy): Conceptualization (lead), Methodology, Investigation, Formal Analysis, Validation, Data Curation, Writing – Original Draft. P. Szatkowski: Methodology, Supervision, Visualization, Writing – Review & Editing. Both authors have read and approved the final version of the manuscript and agree to be accountable for all aspects of the work.

Funding. This research received no external funding.

Acknowledgment. A.G. Zhumabekova: Conceptualization, Methodology, Investigation, Data Curation, Formal Analysis, and Writing – Original Draft. P. Szatkowski: Validation, Supervision, Visualization, and Writing – Review & Editing. All authors contributed to the interpretation of the results, approved the final version of the manuscript, and accept responsibility for the integrity and accuracy of the work.

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] . Zaikovsky A.V., Shendrik T.G., Saranchuk V.I. Structural Transformations of Saline Coals During the Isolation of Humic Acids // Solid Fuel Chemistry. – 2011. – No. 4. – P. 137.
- [2] Komissarov I.D., Loginov L.F. Structural Scheme and Modeling of Humic Acid Macromolecules // Humic Preparations: Scientific Papers. – Tyumen: TSAA Publishing House, 2011. – Vol. 14. – P. 142.
- [3] Canellas L.P., Olivares F.L., Okorokova-Façanha A.L., Façanha A.R. Humic Acids Isolated from Earthworm Compost Enhance Root Elongation, Lateral Root Emergence, and Plasma Membrane H⁺-ATPase Activity in Maize Roots // Plant Physiology. – 2002. – Vol. 130, No. 4. – P. 1951–1957. – DOI: 10.1104/pp.007088.
- [4] Zandonadi D.B., Canellas L.P., Façanha A.R. Indolacetic and Humic Acids Induce Lateral Root Development Through a Concerted Plasmalemma and Tonoplast H⁺ Pumps Activation // Planta. – 2007. – Vol. 225. – P. 1583–1595. – DOI: 10.1007/s00425-006-0454-2.
- [5] Shalata A., Neumann P.M. Exogenous Ascorbic Acid (Vitamin C) Increases Resistance to Salt Stress and Reduces Lipid Peroxidation // Journal of Experimental Botany. – 2001. – Vol. 52, No. 364. – P. 2207–2211. – DOI: 10.1093/jexbot/52.364.2207.
- [6] Athar H.-u.-R., Khan A., Ashraf M. Exogenously Applied Ascorbic Acid Alleviates Salt-Induced Oxidative Stress in Wheat // Environmental and Experimental Botany. – 2008. – Vol. 63, No. 1–3. – P. 224–231. – DOI: 10.1016/j.envexpbot.2007.10.018.

МЕТАЛЛУРГИЯ, ТЕХНОЛОГИИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Abdirashit A.M., Onuralp Yu.

METAL POWDER PRODUCTION TECHNOLOGIES FOR ADDITIVE MANUFACTURING.....	5
--	---

Nemchinova N.V.

КАЛЫЦЫЙ МАГНИЙІМЕН ҚОРҒАСЫННАН ВИСМУТТЫ ЖОЮ БОЙЫНША ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ	12
--	----

Харисович А.Х., Цыба П.Л.

МЕТАЛЛ ЖӘНЕ БЕТОН КОНСТРУКЦИЯЛАРЫН 3D БАСЫП ШЫҒАРУДЫҢ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ	20
---	----

Кулидан С., Қасымова А.Қ., Seref M.S.

ГРАФЕН ЖӘНЕ ОНЫҢ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДАҒЫ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ...	30
--	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТ, СТРОИТЕЛЬСТВО

Ногаев К.А., Кыдырбаева С.Ж., Авилкин А.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ С УДАРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ	37
---	----

Азимбаев К.А., Камарова А.Р.

ИННОВАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫҢ МАҢЫЗЫ БЕЙІНДІ ПӘНДЕРДІ ОҚЫТУДА	48
---	----

Муртазаев К.Н., Майкенов А.Е., Сладковский А.В.

МҰНАЙ БАЛЛОНДАРЫН БАСҚАРУДАҒЫ АҚЫЛДЫ ТЕХНОЛОГИЯЛАР	55
--	----

Ашкеев Ж.А., Аманжолов Н.Ж.

МЕТАЛДАРДЫ ҚЫСЫММЕН ӨНДЕУ ҮРДІСТЕРІНДЕ КҮШ-ЭНЕРГИЯ ПАРАМЕТРЛЕРІН АНЫҚТАУ ҮШІН ШЕКТІ АЙЫРМАШЫЛЫҚ ӘДІСІН ҚОЛДАНУ.....	60
---	----

ИТ-ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Смайл А.А., Смагулова К.К., Романец А.О., Барановский В.Д., Барановская М.Л.

ИМИТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО РЕАКТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА	66
---	----

Жунусов Ж.А., Enkizar E.

СНАТГРТ ШАБУЫЛДАРЫНА ҚАРСЫ ТҰРУ ӘДІСТЕРІН ӘЗІРЛЕУ	78
---	----

Дүйсенбек Ж.С., Камарова С.Н., Дружинин В.М., Кот А.Д.

МИКРОГЭС-КЕ АРНАЛҒАН СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРДЫ ДИАГНОСТИКАЛАУ КЕШЕНІН ӘЗІРЛЕУ	87
---	----

Адилъкешев С.Е., Носов В.Г., Утеев А.М., Титова Ж.И.

DLP ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ЖЕДЕЛ ХАБАРШЫЛАРДА ДЕРЕКТЕРДІҢ АҒЫП КЕТУІН БОЛДЫРМАУДАҒЫ ТИІМДІЛІГІ	95
---	----

<i>Амангельды Д.М., Николенко В.Д.</i> FPGA НЕГІЗІНДЕГІ ЭЛЛИПТИКАЛЫҚ ҚИСЫҚТАРДЫ ЕСЕПТЕУ	104
<i>Харин Э.В., Шахов Н.А.</i> MAC ҚАУІПСІЗДІГІНДЕГІ ПРОТОКОЛДАРЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ЖЕЛІЛІК ҚАУІПСІЗДІГІНДЕГІ РӨЛІ.....	109
<i>Луценко В.С., Клопов Ю.С., Алжанов А.У.</i> SPRING FRAMEWORK ЖӘНЕ POSTGRESQL НЕГІЗІНДЕГІ МИКРОҚЫЗМЕТТЕРДЕ ДЕРЕКТЕРДІҢ ДӘРІСТІЛІГІН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ ТИІМДІ ӘДІСТЕРІ	117
ЭКОНОМИКА. ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ, СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ДИСЦИПЛИНЫ	
<i>Fayez Wazani A.W., Gelmanova Z.S., Nurgaliyeva A.K.</i> INTEGRATION OF PAYROLL PROJECTS INTO THE SYSTEM OF BANKING SERVICES FOR CORPORATE CLIENTS	124
<i>Gelmanova Z S., Latypova M.A., Volokitina I.E., Fayez Wazani A.W., Davletshin I.A.</i> RISK-ORIENTED APPROACH TO INVENTORY MANAGEMENT OF A PROCESSING ENTERPRISE: FROM ACCOUNTING TO STRATEGIC DECISIONS (ON THE EXAMPLE OF «QARMET LLC RECYCLING »)	130
<i>Gelmanova Z.S., Wazani A.W.F.</i> CHALLENGES AND PROSPECTS OF INTERCULTURAL COMMUNICATION IN THE PROFESSIONAL ENVIRONMENT: HOW TO AVOID THE TOWER OF BABEL EFFECT ...	137
<i>Гребенников Е.Ю., Саулетов Е.С.</i> БИОЭЛЕКТРЛІК ФЕНОМЕНДЕР МЕН ОЛАРДЫҢ ТІРІ ОРГАНИЗМДЕРДЕ ҚОЛДАНЫЛУЫ	147
<i>Толенов Т.Р., Кусаинов Н.К.</i> ЖЕРДІҢ МАГНИТ ӨРІСІНІҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҒАЛАМШАРДАҒЫ ТІРШІЛІККЕ ӘСЕРІ	152
<i>Валеев Д.А., Ильин А.А., Гельманова З.С., Малига И.А.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ РЕМОНТОВ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ НА АО «QARMET»	157
<i>Жантенова А.С.</i> МИКРООРГАНИЗМДЕР КӨМЕГІМЕН ПЛАСТИКАЛЫҚ ҚАЛДЫҚТАРДЫҢ БИОДЕГРАДАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ	165
<i>Абуов Д.Б., Алиев М.Р., Сагатов Г.Е.</i> ЦИФРЛЫҚ ЭКОНОМИКАНЫҢ ДАМУЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ЕҢБЕК НАРЫҒЫНА ӘСЕРІ.....	176
ХИМИЧЕСКИЕ И ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.	
<i>Умбетбаева А.Н., Есенова М.Д., Утегул А.С.</i> ГИДРОТЕРМИЯЛЫҚ ЫСТЫҚ ПРЕСТЕУ ӘДІСІМЕН МЫС ОРТОФОСФАТЫНЫҢ ЖӘНЕ ЦИКЛОТЕТРАФОСФАТТЫҢ МАССАЛАРЫНЫҢ СИНТЕЗІНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ ХИМИЯЛЫҚ ӘСЕРЛЕР.....	184
<i>Ахметалимов А.М., Marcin Niemiec</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ В КАТАЛИЗЕ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	192

Zhumabekova A.G., Piotr Szatkowski

ANTIOXIDANT AND BIOLOGICAL ACTIVITY OF VITAMIN C-ENRICHED HUMATES
IN OAT SEED GERMINATION

200

Ответственный секретарь: Зобнин Н.Н.

Технический редактор: Носов В.Г.

Компьютерная верстка: Носов В.Г.

05.09.2025 ж. бастап басылып шығарылады. Пішімі 60x84 1/8. Кітап-журнал қағазы.
Көлемі 13 шартты б.т. Таралымы 500 дана. Бағасы келісім бойынша. ҚарИУ Маркетинг, медиа
және креативті технологиялар департаменті.
Тапсырыс № 3288. Индекс 74946.

Дата выхода 05.09.2025 г. Формат 60x84 1/8. Бумага книжно-журнальная.
Объем 13 уч.-изд.л. Тираж 500 экз. Цена договор. Департамент маркетинга, медиа и креативных
технологий КарИУ.
Заказ № 3288. Индекс 74946.
