

ISSN 3136-3377
ISSN (Online) 3136-3385

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

№2 (155)/ 2026

Founded in 1995

Published 4 times a year

Astana, 2026

Editor-in-Chief: Baglan Togizbayeva

professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Deputy Editor-in-Chief

Askar Zhussupbekov, professor,

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Executive editor

Alma Zakirova, associate professor,

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editorial board

Levente Kovács	Prof., Óbuda University, Budapest, Hungary
Aljawarneh Shadi A.	Prof., Jordan University of Science and technology, Jordan
Milani Alfredo	Prof., University of perugio
Rafal Burdzik	Prof., Silesian university of technology, Poland
Akitoshi Mochizuki	Prof., University of Tokushima, Tokushima, Japan
András Molnár	Prof., Óbuda University, Budapest, Hungary
Der Wen Chang	Prof., Tamkang University, Taipei, Taiwan (ROC)
Yoshinori Iwasaki	Prof., Geo Research Institute, Osaka, Japan
Eun Chul Shin	Prof., Incheon National University, Incheon, South Korea
Viktor Kaliakin	Prof., University of Delaware, Newark, Delaware, USA
Рустем Сахапов	Prof., Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan
Tadatsugu Tanaka	Prof., University of Tokyo, Tokyo, Japan
Hoe Ling	Prof., Columbia University, New York, USA
G.Bekmanova	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Y.Utepov	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
A.Tulebekova	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
M.Zhumagulov	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
D.Bazarbayev	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
A.Zabiyeva	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editorial address: Kazhimukhan str 2., of. 424, Z01C0X1

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

E-mail: vest_techsci@enu.kz

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology

Owner: Non-profit joint-stock company «L.N. Gumilyov Eurasian National University»

Periodicity: 4 times a year

Registered by the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan

Rediscount certificate № KZ96VPY00149136 from 18.05.2026

Address of Printing Office: Satpayev str 2., Astana, Kazakhstan, Z01A3B1

L.N. Gumilyov Eurasian National University

Website: <http://bultech.enu.kz>

Бас редакторы: Б.Б.Тогизбаева

т.ғ.д., профессор, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Бас редактордың орынбасары **А.Ж.Жусупбеков, т.ғ.д., профессор,**

Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Жауапты редактор

А.Б. Закирова, қауымдастырылған профессор,

Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Редакция алқасы

Levente Kovács	Профессор, Обуда университеті, Мажарстан
Aljawarneh Shadi A.	Профессор, Иордания ғылым және технология университеті, Иордания
Milani Alfredo	Профессор, Перуджио университеті, Италия
Rafal Burdzik	Профессор, Силезиялық технологиялар университеті, Польша
Akitoshi Mochizuki	Профессор, Токусима университеті, Жапония
András Molnár	Профессор, Обуда университеті, Мажарстан
Der Wen Chang	Профессор, Тамканг Университеті, Тайвань
Yoshinori Iwasaki	Профессор, Гео зерттеу университеті, Жапония
Eun Chul Shin	Профессор, Ичхон ұлттық университеті, Оңтүстік Корея
Viktor Kaliakin	Профессор, Делавер Университеті, АҚШ
Рустем Сахапов	Профессор, Казан мемлекеттік университет, Ресей
Tadatsugu Tanaka	Профессор, Токио Университеті, Жапония
Hoe Ling	Профессор, Колумбия университеті, АҚШ
Гульмира Бекманова	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Елбек Утепов	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Асель Тулебекова	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Михаил Жумагулов	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Данияр Базарбаев	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Алия Забиева	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Редакцияның мекен жайы: Z01C0X1, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі, 13

кабинет 424, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

E-mail: vest_techsci@enu.kz

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology

Меншіктенуші: КеАҚ "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті"

Мерзімділігі: жылына 4 рет

Қазақстан Республикасының Мәдениет және ақпарат министрлігімен тіркелген

18.05.2026ж. № KZ96VPY00149136 қайта есепке қою туралы куәлігі

Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі 2, Z01A3B1

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Сайт: <http://bultech.enu.kz>

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

№2 (155)/2026

CONTENT / МАЗМҰНЫ

Construction *Құрылыс*

Akira Hasegawa

Earthquake disasters and countermeasures-the case of japan, hachinohe

7

M. Dzhusupova, M. Kozhakhmet , S. Kulshikova

Characterization of kaolin-containing clay from the Kara-Keche deposit and evaluation of its suitability as an active mineral additive for cement composites

М.А. Джусупова, М.С. Кожзахмет, С.Т. Кульшикова

Характеристика каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече и оценка ее применимости в качестве активной минеральной добавки для цементных композиций

27

A.S. Mukasheva, A.Zh. Zhussupbekov, G.A. Zhairbayeva, G.T. Tleulanova

Analysis of deformation parameters of foundations using the method of soil stamp testing in industrial construction conditions

А.С. Мукашева, А.Ж. Жусупбеков, Г.А. Жаирбаева, Г.Т.Тлеуленова

Анализ деформационных параметров оснований методом штамповых испытаний грунтов в условиях промышленного строительства

41

G.A. Baimakhanov, A.M. Iisova , D.D. Karazhanova

Technological support for the quality of construction processes and systematic control of construction parameters

Г.А. Баймаханов, А.М. Иисова, Д.Д. Каражанова

Технологическое обеспечение качества строительных процессов и системный контроль параметров строительства

53

S. Akhazhanov, A. Kassenova, B. Nurlanova, N. Medeubaev

A Simplified Approach for Bending Analysis of Beams Resting on a Two-Parameter Elastic Foundation

65

Architecture *Сәулет*

S. G. Kazhenov, A.S.Yermukhanova

Participatory Budgeting in Urban Planning: A Mechanism for Prioritizing Public Space Development Projects

80

U.N. Ismagulov, K.K. Arynov , A.M. Saurbayeva

Principles of integrating education and production in the architecture of training and production complexe

94

M. Shegenova, G. Maulenova, A. Sultanova

Algorithmic design as a methodological framework for optimizing insolation and wind flows at the stage of conceptual architectural form generation

М.Шегенова, Г.Мауленова, А.Султанова

Алгоритмическое проектирование как методологическая основа оптимизации инсоляции и ветровых потоков на этапе эскизного архитектурного формообразования

109

Transport

Көлік

A.M. Tabinbayev, K.K. Dzholdasova, A.M. Biniyazov, A.S. Denisov

Researching the dynamics of engine oil property changes and diesel lubrication system condition during service life

А.М. Табинбаев, К.К. Джолдасова, А.М. Биниязов, А.С. Денисов

Исследование динамики изменения параметров моторного масла и технического состояния системы смазки дизельного двигателя в процессе эксплуатации

128

M. Idrissov, S. Bekzhanova, D. Bekzhanov, A. Mukhametzhanova

Cluster platform as a center of digitalization competencies based on the «multilevel integrated helix-ecosystem model»

М.М. Идрисов, С.Е. Бекжанова, Д.З. Бекжанов, А.В. Мухаметжанова

Кластерная платформа как центр компетенций цифровизации на основе модели «multilevel integrated helix-ecosystem model»

145

M.Zh. Kizdarbekova, K.G. Balabekova, A.A. Zabiyeu, K.B. Konyrtaeva

Improvement of the body structure for efficient collection of municipal waste

М.Ж. Киздарбекова, К.Г. Балабекова, А.А. Забиев, К.Б. Коньртаева

Коммуналдық қалдықтарды тиімді жинауға арналған шанақтың құрылымын жетілдіру

163

R.M. Bolat, T.K. Balgabekov, A.B. Rustembayev, Sh.Zh. Zharassov

Improving the performance of a vehicle's internal combustion engine using various types of additives

173

Mechanical engineering

Машина жасау

Davran Radjibayev, Jasur Anarkulov

Fault Diagnosis System for Auxiliary Converters in HXD3C Series Electric Locomotives

Давран Раджибаев, Ясур Анаркулов

Система диагностики неисправностей для вспомогательных преобразователей в электровозах на серии "hxd3c"

190

Kh.A. Abshenov, B.R. Arapov, K.K. Seitkazenova, V.N. Pecherskiy, B.B. Zhailybek

Methods and equipment for testing steel samples in distilled water at high temperature and pressure

Х.А. Абшенов, Б.Р. Арапов, К.К. Сейтказенова, В.Н. Печерский, Б.Б. Жайлыбек

Методика и оборудование для проведения испытаний образцов сталей в дистиллированной воде высокой температуры и давления

211

N.A. Tokmurzina, T.A. Tokmurzin, S.S. Abdullayev, G.B. Bakyt, O.G. Kisselyova

Methods of identification of safety risks in conditions of vertically distributed management structure in railway transportation

Н.А.Токмурзина, Т.А.Токмурзин, С.С.Абдуллаев, Ғ.Б.Бақыт, О.Г. Киселёва Теміржол тасымалында тігінен бөлінген басқару құрылымы жағдайындағы қауіпсіздік тәуекелдерін сәйкестендіру әдістері	228
D.K. Kamalbek, A.A. Volnenko, A.A. Abzhapbarov, D.K. Zhumadullayev Calculation of design parameters of the regular packing of heat and mass transfer apparatus from continuously connected pipes Д.К.Камалбек, А.А.Волненко, А.А. Абжапбаров, Д.К. Жумадуллаев Расчет конструктивных параметров регулярной насадки тепломассообменного аппарата из непрерывно соединенных труб	245
D.S. Myrzaliyev, K.K. Bernadin, N.N. Rakhymtay, O.B. Seidullayeva Damage behavior of TiCN cermet cutting tools during dry high-speed turning of low-alloy steel AISI 4340 Д.С. Мырзалиев, К.К. Бернадин, Н.Н. Рахымтай, О.Б. Сейдуллаева Повреждаемость режущих инструментов из TiCN-кермета при сухом высокоскоростном точении низколегированной стали AISI 4340	257
K.D.Ormanbekov, Z.A.Satbayeva, D.R.Orynbekov, V.N.Kots Effect of low-temperature ion-plasma nitriding time on the tribomechanical properties of 30kh13 martensitic stainless steel К.Д.Орманбеков, З.С.Сатбаева, Д.Р.Орынбеков, В.Н.Коц Влияние времени низкотемпературного ионно-плазменного азотирования на трибомеханические свойства мартенситной нержавеющей стали 30X13	273
Computer science Есептеу техникасы	
Luca Battanta Technological Aspect of Digital Terrestrial Television Implementation: Network Architecture, Signal Processing and the Development Prospects	293
K.G. Madiyarov, O.Ya. Shvets Actuarial ML Platform with a Protocol-Based SRE Validation Layer К.Г. Мадияров, О.Я. Швец Протоколдық SRE-в алидация контуры бар актуарлық ML-платформа	304
M. Mansurova, A. Kulatay, D. Zhaisanova Methodological Approaches of Machine Learning and Adaptive Personalization in Educational Gaming Platforms	318
T. Toleutai, A. Akhmetov, A. Zhetpisbayeva, A. Kuttybek, A. Sadvakasova Development of a cyber range platform for cybersecurity beginners Т. Толеутай, А. Ахметов, А. Жетписбаева, А. Куттыбек, А. Садвакасова Разработка платформы киберполигона для начинающих специалистов по кибербезопасности	330



Review

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-7-26>

Earthquake disasters and countermeasures-the case of japan, hachinohe

Akira Hasegawa 

Hachinohe Institute of Technology, Hachinohe, Japan

E mail: ahasegawa0402@gmail.com

Abstract. On December 8, 2025, a major earthquake struck off the eastern coast of Aomori Prefecture, causing severe damage in Hachinohe City and surrounding areas. The event highlighted the vulnerability of regional infrastructure, economic activities, and local communities to seismic and tsunami hazards. This study examines the impacts of the earthquake on transportation facilities, communication networks, residential districts, public utilities, and social systems. Using Hachinohe as a representative case study, the paper reviews historical experiences with earthquakes and tsunamis in Japan, the geophysical mechanisms responsible for their occurrence, and the strategies implemented to reduce disaster-related losses. Particular attention is given to the resilience of critical infrastructure, emergency response operations, evacuation procedures, and post-disaster recovery processes. The research also evaluates the effectiveness of existing disaster management policies and community-based preparedness programs. Furthermore, the study discusses potential challenges associated with future environmental and socio-economic changes, including population decline and climate-related risks. Based on the findings, recommendations are proposed for strengthening disaster preparedness, improving risk mitigation measures, enhancing infrastructure resilience, and supporting sustainable regional development in earthquake-prone coastal regions.

Keywords: earthquake disaster, tsunami, Hachinohe, seismic resilience, disaster mitigation, infrastructure damage, emergency response, regional sustainability, Pacific Plate subduction, disaster recovery.

Introduction

On December 8, 2025, shortly after 11 PM, I felt a strong tremor. I was in bed in my bedroom, waiting for the shaking to subside, as I feared my house might collapse. Fortunately, there was no power outage, so I immediately turned on the television. Within minutes, an earthquake alert was broadcast. The epicenter was off the coast east of Aomori Prefecture, and the maximum seismic intensity in Hachinohe was recorded as higher 6. A tsunami warning was issued, and evacuation orders were given to move away from the sea. Many residents living near the coast evacuated to higher ground on a cold winter night.

Fig.1 shows the damage to the top of the viaduct piers of the Hachinohe Line railway. Due to this damage, the Hachinohe Line was unusable, but it was restored and operations resumed three weeks after the disaster. Fig.2 shows a communication tower with a fractured vertical member. Because there was a risk of collapse, and concerns about the tower's collapse after the earthquake, surrounding residents evacuated, and surrounding roads became impassable. Repairs were completed 18 days later, the evacuation of surrounding residents ended, and life returned to normal. In the city center and some residential areas, buildings have been damaged and repairs are underway.

Off the coast of Hachinohe, the Pacific Plate is subducting beneath the continental plate at a rate of several centimeters per year. * The strain energy generated at this plate boundary is the cause of major earthquakes occurring every few decades. The mechanism of these earthquakes has already been elucidated, and improvements are being made, albeit slowly, to mitigate the damage caused by earthquakes and tsunamis resulting from this activity.

Japan, including Hachinohe, has repeatedly suffered from earthquakes and tsunamis. Using Hachinohe, where the author lives, as an example, this study examines how society has responded to these earthquakes and tsunamis, protecting livelihoods and industries, and considers what challenges should be faced and how they should be resolved in the face of future regional environmental changes.



Figure 1. Viaduct pier of Railway in Hachinohe Figure.2. Tower with a broken vertical member

Japan Meteorological Agency: The mechanism of earthquake occurrence

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/jishin/about_eq.html

The earthquake that occurred on December 8, 2025, had a seismic intensity of higher 6 as the

maximum seismic intensity and occurred off the coast of eastern Aomori Prefecture. This area off the coast of eastern Aomori Prefecture is located at the boundary between the Pacific Plate and the continental plate, and the phenomenon of the Pacific Plate subducting beneath the continental plate continues. "Around Japan, the oceanic plates, the Pacific Plate and the Philippine Sea Plate, are moving towards the continental plates (North American Plate and Eurasian Plate) at a speed of several centimeters per year, subducting beneath the continental plates." * Fig.3 is a distribution map of earthquakes that occurred near Japan in 50 years (1960-2011). It shows that many earthquakes have occurred along the boundaries of each plate.

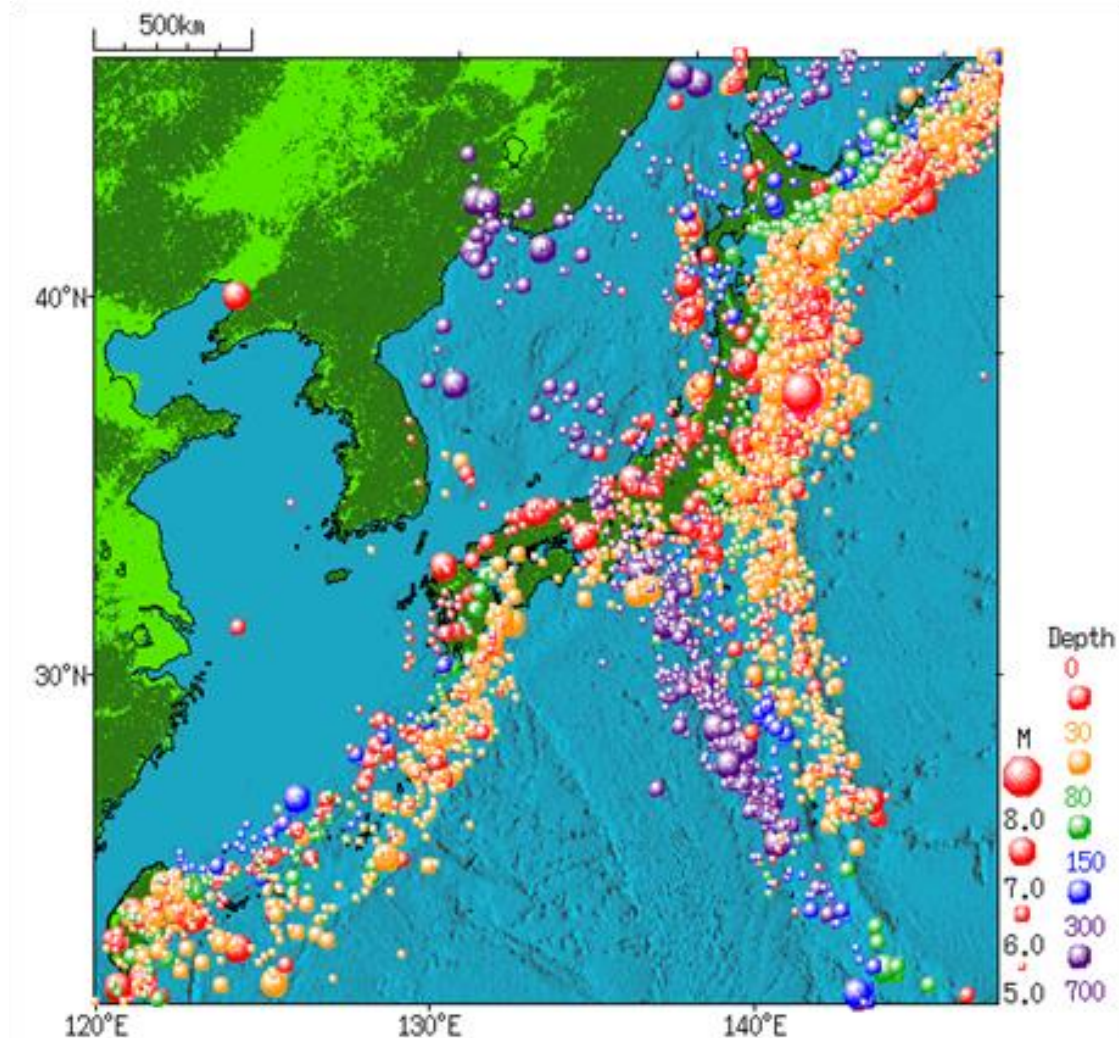


Figure 3. A distribution map of earthquakes that occurred near Japan in 50 years (1960-2011)
From Japan Meteorological Agency(JMA)

*Japan Meteorological Agency: The mechanism of earthquake occurrence
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/jishin/about_eq.html

Therefore, the area around Japan is subjected to complex forces from multiple tectonic plates, making it one of the most earthquake-prone regions in the world. This generates significant strain energy at the boundary, and the release of this energy frequently causes earthquakes. Between 2011 and 2024, 1971 earthquakes of magnitude 6.0 or greater occurred worldwide, of which 328 (16.6%) occurred in Japan*.

Figure 4 shows earthquake information published in real time on the Japan Meteorological Agency website. It shows earthquakes that occurred around Japan within 24 hours from 11:00 AM on March 1, 2026. While it shows that many earthquakes occurred, many of them occurred near the plate boundary.

The epicenter of the earthquake that occurred on the Pacific side of eastern Japan on March 11, 2011, was located south of the current location. Because a large amount of energy was released simultaneously at multiple locations, it became a massive earthquake with a magnitude of 9.0 (Mw) and a maximum seismic intensity of 7, generating a large tsunami. This earthquake resulted in over 20,000 deaths, and even 15 years later, recovery, including damage to nuclear power plants, is still ongoing.



Figure 4. Earthquakes that occurred within 24 hours of 11:00 AM on March 1, 2026

From Japan Meteorological Agency

*Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen_db/pdf/2025/2-2-3.pdf

<https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#5/37.079/136.084/&contents=hypo>

While magnitude, an indicator of earthquake energy, is used globally, seismic intensity, which represents the strength of shaking in various locations caused by an earthquake, is expressed differently from country to country. In Japan, the Japan Meteorological Agency uses a 10-level seismic intensity scale shown in Table 1. Each level of seismic intensity corresponds to a corresponding level of human experience and corresponding actions. Seismic intensity 1 represents the lowest level of seismic intensity felt by humans, and seismic intensity 7 represents the highest level. Instrumental seismic intensity is calculated from the three components of the

acceleration waveform recorded by seismometers at installation points using a predetermined procedure including a Fourier transform. It is measured approximately a few minutes after the earthquake occurs and communicated to the public through television, radio, and the website.

Figure 5 shows earthquakes with a maximum seismic intensity of 1 or higher that occurred during the week from February 21st, plotted with the magnitude as the diameter. 45 earthquakes occurred during this period. This kind of information can be found on the Japan Meteorological Agency's website. The area around Hachinohe City experiences approximately one earthquake per day.

Table 1 Seismic intensity scale, Measured seismic intensity, and Human Experiences and Behavior in Japan *The author translated the Japan Meteorological Agency's materials

Seismic intensity scale	Measured seismic intensity I	Human Experiences and Behavior
0	$I < 0.5$	People do not feel the shaking, but it is recorded on seismographs.
1	$0.5 < I < 1.5$	Some people who stay quiet indoors may feel a slight vibration.
2	$1.5 < I < 2.5$	Most people who stay quiet indoors feel the vibration. Some sleeping people may wake up.
3	$2.5 < I < 3.5$	Most people who stay quiet indoors feel the vibration. Some people who are walking may feel the vibration. Most sleeping people wake up.
4	$3.5 < I < 4.5$	Most people are startled. Most walking people feel the vibration. Most sleeping people wake up.
lower 5 (5L)	$4.5 < I < 5.0$	Most people feel fear and want to hold on to things.
upper 5 (5U)	$5.0 < I < 5.5$	Most people have difficulty walking without holding on to things, or experience other problems with their movements.
Lower6 (6L)	$5.5 < I < 6.0$	Standing becomes difficult.
Upper6 (6U)	$6.0 < I < 6.5$	Standing becomes impossible, and people can only move by crawling. People are thrown into disarray by the shaking, unable to move, and may even be blown away.
7	$6.5 < I$	

Figure 6 shows the number of earthquakes with seismic intensity of 1 or higher that occurred in Japan during the 10-year period from 1996 and the 10-year period from 2016 (20 years later). Hereafter, the former data will be referred to as the 1996 data, and the latter as the 2016 data. The horizontal axis represents the number of earthquakes from seismic intensity 1 to 7, and the vertical axis represents the number of earthquakes on a logarithmic scale. The two curves are similar, but

the 2016 data shows more earthquakes with seismic intensity 6U and 7, which cause significant damage. For the maximum seismic intensity of 7, there was one in the 1996 data, but four in the 2016 data.



Figure 5. Earthquakes with a seismic intensity of 1 or higher in 24 hours (from Feb. 21, 2026, to Feb. 27, 2026) in Japan. By Japan Meteorological Agency:
<https://www.data.jma.go.jp/eqdb/data/shindo/index.html>

When approximation lines showing the relationship between maximum seismic intensity and the number of earthquakes are inserted, it is shown that the slope of the 2016 data is gentler, indicating that higher intensity earthquakes occurred in the 2016 data. The number of earthquakes in each 10-year period was 33,659 in the 1996 data and 24,376 in the 2016 data, with the total number of earthquakes in the 2016 data decreasing by 72.4%. The average daily occurrence rate was 9.2 times in 1996 and 6.7 times in 2016.

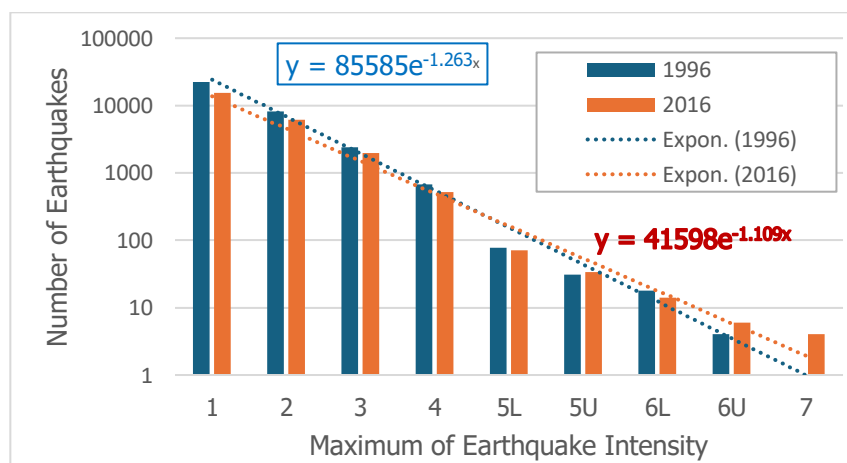


Figure 6. Maximum seismic intensity and number of earthquakes: 10-year period from 1996 and 2016

Figure 7 shows the maximum seismic intensity and number of occurrences of earthquakes that caused human casualties in Japan over the past 10 years, from 2016. There were 49 earthquakes that caused human casualties, which averages out to 4.9 per year. Over the 10 years, there were 17 earthquakes with a maximum seismic intensity of 6L or higher, averaging out to 1.7 per year.

Comparing the maximum seismic intensity and the number of fatalities, there were 9 occurrences of 6L with 4 deaths, 4 occurrences of 6U with 4 deaths, and 4 occurrences of 7 with 962 deaths. It can be seen that earthquakes with a maximum seismic intensity of 7 caused many deaths in a single earthquake, resulting in significantly different damage compared to earthquakes with a seismic intensity of 6U.

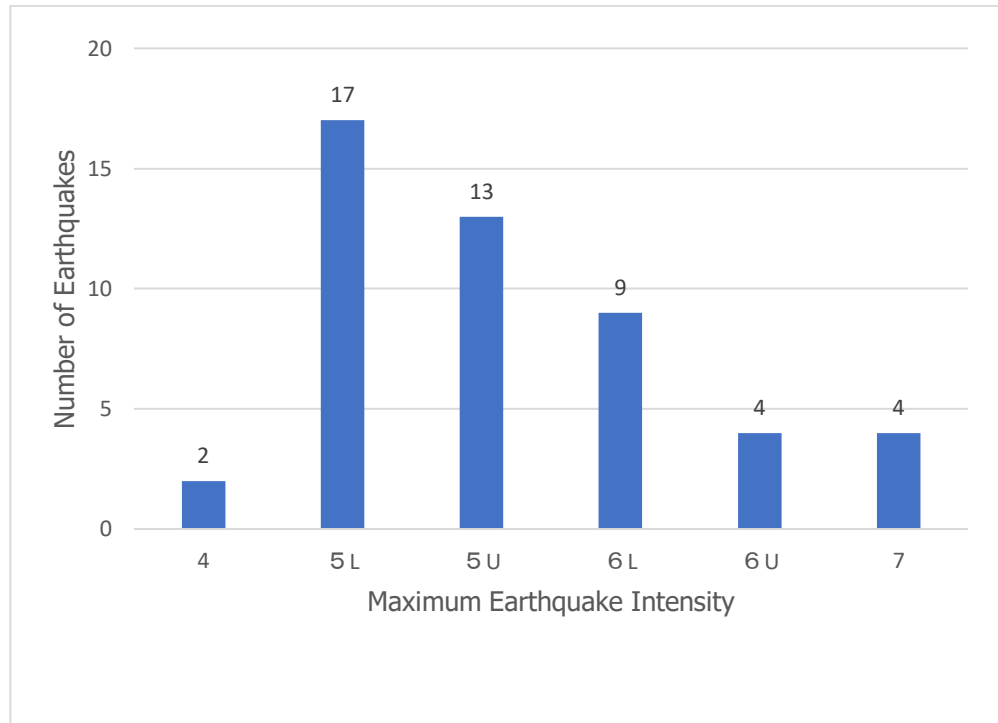


Figure 7. Maximum Earthquake Intensity and Number of Earthquakes from 2016 to 2025
The numbers are from <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/higai/higai1996-new.html#higai2006>

Figure 8 compares the number of earthquakes resulting in human casualties, categorized by maximum seismic intensity, over a 10-year period from 1996 to 2016. Here, human casualties refer to people injured or killed by the earthquake. While the number of earthquakes with a maximum seismic intensity of 5L or higher remains roughly the same, the number of earthquakes with a maximum seismic intensity of 4 differs significantly. This requires verification of the number of earthquakes with a maximum seismic intensity of 4, but assuming similar earthquake patterns in the two periods, it suggests that earthquakes resulting in human casualties in 1996 were able to decrease in 2016.

Figure 9 is a figure that adds the percentage (line graph) of earthquakes causing human casualties to the total number of earthquakes (including those without human casualties), to Figure 7, which shows the number of earthquakes that caused human casualties. Both the 1996 and 2016 data show that the rate of human casualties increases with increasing maximum seismic intensity, reaching 100% at seismic intensity 7. Comparing the 1996 and 2016 data, the rates are similar for each category: 6U (50% and 67%), 6L (56% and 64%), 5U (36% and 38%), and 5L (22% and 24%). However, the 2016 data shows higher rates in all categories. On the other hand, for seismic intensity 4, the rates are 4.4% and 0.38%, a decrease of approximately 1/10 compared to the 2016 data. This suggests an improvement in disaster prevention capabilities against earthquakes with a maximum

seismic intensity of 4, but it is necessary to acknowledge that improving disaster prevention capabilities against earthquakes with a maximum seismic intensity of 5 or higher remains a challenge.

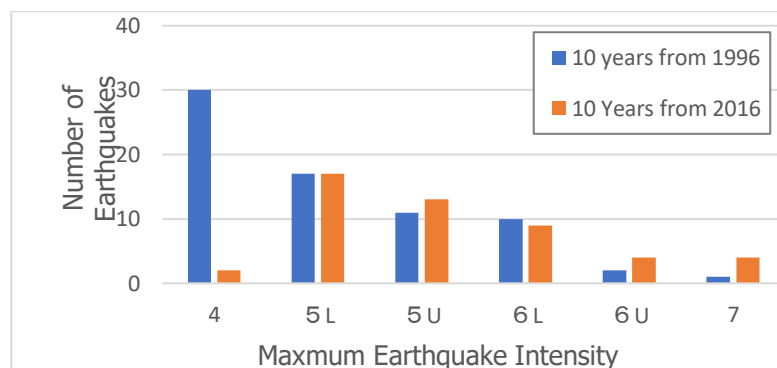


Figure 8. Maximum Earthquake Intensity and Number of Earthquakes 10 years from 1996 and 2016

Regarding damage to houses, between 1996 and 2010 there were 5,238 completely destroyed and 24,780 partially destroyed or slightly damaged, while between 2015 and 2010 there were 16,054 completely destroyed and 409,608 partially destroyed or slightly damaged, with the damage between 2015 and 2010 being overwhelmingly greater. It is necessary to understand that this is due to the difference in the number of earthquakes with a maximum seismic intensity of 6U and 7, and that even earthquakes with the same maximum seismic intensity of 7 can be of different magnitudes.

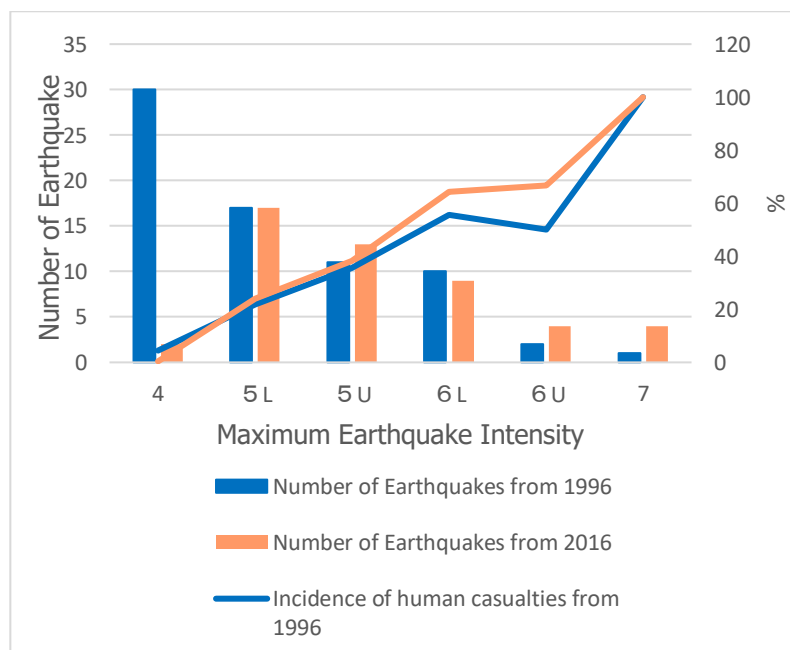


Figure 9. Maximum Earthquake Intensity and Number of Earthquakes
Percentage of earthquakes that resulted in human casualties in 1996 and 2016 (%)

In Japan, throughout history, numerous disasters have repeatedly occurred, causing significant damage to the lives of citizens and communities.

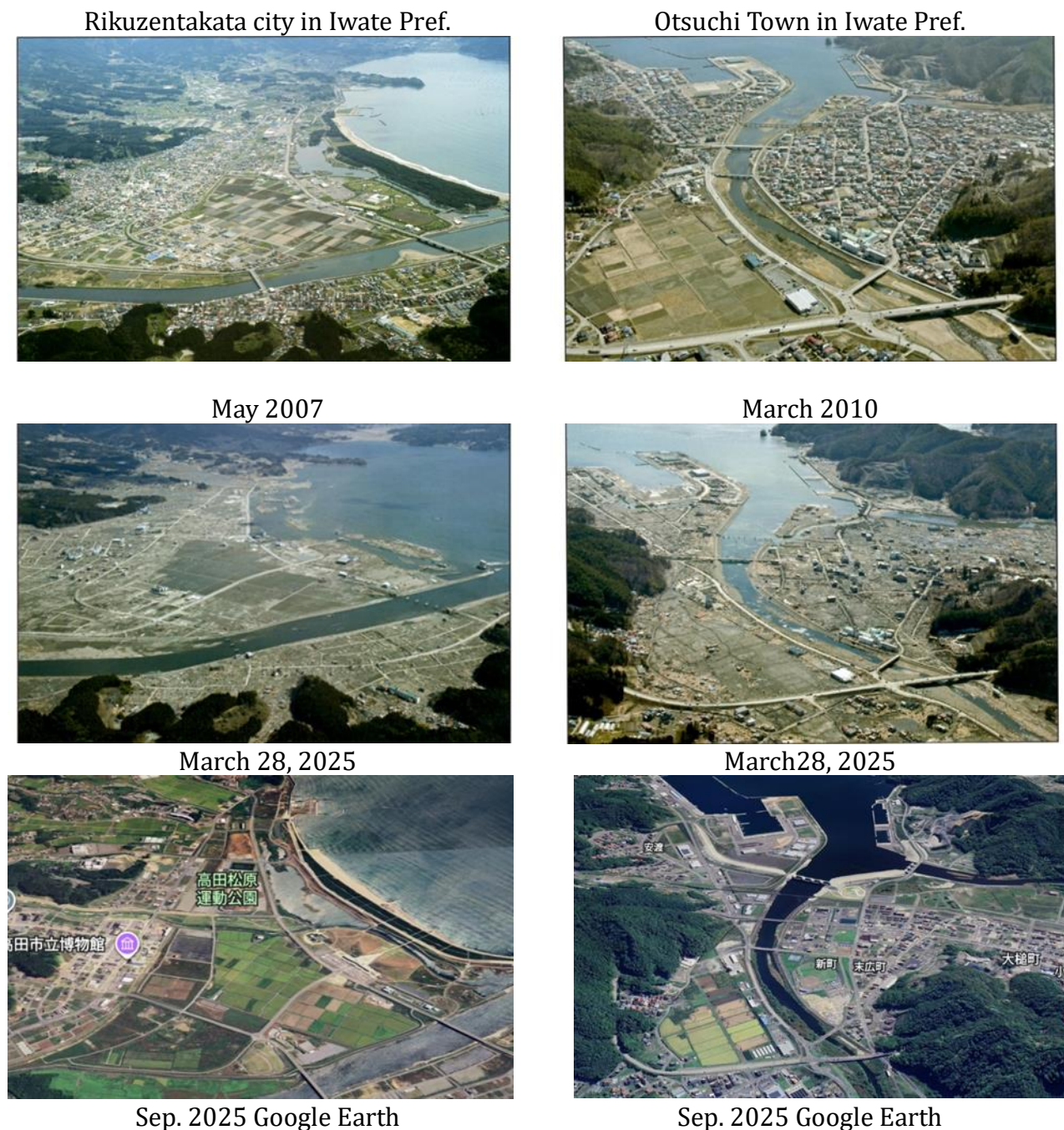


Figure10. Damage by the 2011 Tohoku Region Pacific Ocean offshore Earthquake Earth

*Ministry of Internal Affairs and Communications, Document I: Number of Deaths and Housing Damage by Prefecture in the Great East Japan Earthquake (as of March 1, 2025)

https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r7/items/part7_section2.pdf

Among these, earthquakes have been devastating lives and property, destroying houses and infrastructure, and wiping out people's livelihoods and industries. Each time, people have strived to protect themselves from earthquakes by implementing earthquake-resistant urban planning and evacuation plans.

However, the 2011 Tohoku Region Pacific Ocean offshore Earthquake (magnitude Mw9.0 on March 11, 2011) not only caused damage from the earthquake itself, but also resulted in the subsequent massive tsunami, which claimed many lives, homes, factories, fishing boats, and entire communities. Furthermore, in Fukushima Prefecture, the radiation damage from the nuclear power plant meant that even after the threat of earthquakes and tsunamis subsided, the surrounding areas remained uninhabitable for a long period. Looking at the recovery of disaster-stricken areas excluding those around nuclear power plants, much of the social infrastructure, such as seawalls, roads, and elevated ground, which were planned to be completed within 10 years of the disaster, has already been completed. However, 15 years have passed, and the original population has not returned.

Figure 10 shows aerial photographs of Rikuzentakata City and Otsuchi Town, which face the Pacific Ocean and suffered significant damage from the tsunami, before the disaster, immediately after the disaster, and 15 years later. In Rikuzentakata City, the population decreased by 23% in 10 years after the disaster, and in Otsuchi Town, it decreased by 29%. Considering that the population decrease in Hachinohe City during the same period was 6%, this represents a significant population decline. This means that even if social infrastructure is prepared, people's hearts and communities do not recover in the same way as things are rebuilt. Recovery takes a long time. Also, as can be seen in Fig.10, although ground elevation was carried out in coastal areas after the disaster, the land use situation is different compared to the situation before the disaster. This situation highlights the importance of earthquake preparedness and minimizing damage, which are crucial social issues.

The Ministry of Internal Affairs and Communications has reported the following damage from this earthquake: 19,782 deaths, 2,550 missing persons, 6,242 injured, 122,053 houses completely destroyed, and 284,074 houses partially destroyed. *

Furthermore, it has been reported that high-rise buildings in areas far from the epicenter shook significantly during this earthquake. This is thought to be due to the long-period components of seismic waves transmitting over hundreds of kilometers, causing resonance with high-rise buildings that have long natural periods. Currently, information regarding long-period ground motion that causes such phenomena is also being provided to the public.

1. Before 2011 (Top), March 2011 immediately after the disaster (middle, and Sep.2025, 15 years after the disaster (Lower).
2. The left side is Rikuzentakata city, the right side is Otsuchi town. The tsunami run-up height was 40m at Rikuzentakata, and it was 21m at Otsuchi
3. The photos before and immediately after the disaster are from Tohoku Construction Association materials, and the photo 15 years after the disaster is from Google Earth.

The methodology

Table 2 summarizes the date, time, name, and damage overview of major earthquakes that occurred around Hachinohe in the last 50 years. The four earthquakes that caused significant damage to the Hachinohe region in the last 50 years are the 1968 Tokachi offshore earthquake, the 1994 Sanriku far offshore earthquake, the 2011 Tohoku Region Pacific Ocean offshore earthquake, and the 2025 Aomori Prefecture Eastern offshore earthquake. Fig.11 shows the location of each epicenter. The following can be understood from these tables and figures;

1. Frequency of major earthquakes: Major earthquakes with epicenters off the coast of Hachinohe occurred in 1968, 1994, and 2025, with intervals of 26 and 31 years. This

suggests that strain energy accumulating near plate boundaries leads to rupture after approximately 30 years.

2. In contrast, the 2011 earthquake occurred in a wider area south of Hachinohe. The possibility of such an earthquake occurring over a wide area is considered extremely rare compared to localized earthquakes like those off the coast of Hachinohe. The maximum seismic intensity is greater than that of the 1968 earthquake. This is thought to be due to the larger magnitude of the earthquake.
3. Comparing the 1994 and 2025 earthquakes, which have similar magnitudes and maximum seismic intensity, the 1994 earthquake had a magnitude of 0.1 greater, resulting in greater damage and a wider area of impact. However, the damage from the 2025 earthquake seems to be less than in the past. This may be because we have experienced many earthquakes, and each time we have considered disaster prevention, leading to improved building strength and successful results in evacuation drills and other measures. In the case of structural damage, the natural frequencies of the ground and structures can be related to the magnitude of the damage, so it is necessary to evaluate them in conjunction with the characteristics of each seismic wave.

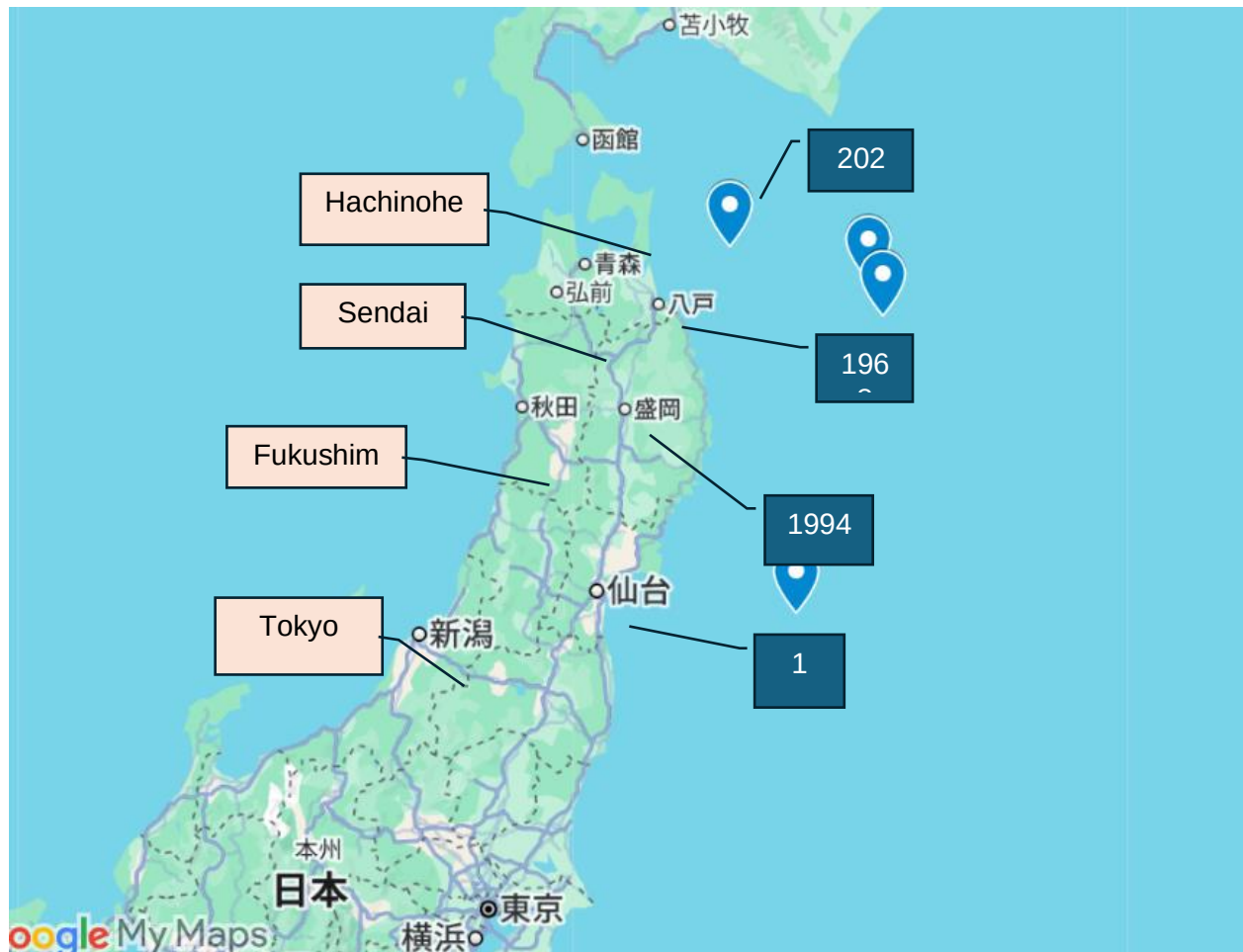


Figure11. Epicenters of Big Earthquakes near Hachinohe

Figure 12, 13, and 14 show the damage caused by earthquakes and tsunamis in Hachinohe City

in 1968, 1994, and 2011, respectively.

Table 2 Major earthquakes that occurred around Hachinohe in the last 50 years

The 1968 Tokachi offshore earthquake, May 16, 1968, Magnitude Mw8.2	
Seismic Intensity	5 at Hachinohe, Hakodate, Morioka, etc.
Main damage	Tsunami of 5m, 52 dead or missing, 330 injured, landslides (heavy rain the day before), railway damage and closure
The 1994 Sanriku far offshore earthquake, Dec. 28, 1994, Mj7.6	
Seismic Intensity	6 at Hachinohe, Tsunami 55cm at Miyako
Main damage	3 dead due to building destruction, 788 injured, 72 buildings completely destroyed, deaths
The 2011 Tohoku Region Pacific Ocean offshore Earthquake, Mar. 11, 2011, Mw9.0, the largest M in Japanese history	
Seismic Intensity	7 at Miyagi Pref., 5U at Hachinohe. Tsunami (Maximum height 9.3 m or more at Soma, Maximum run-up height 40.1 m at Ryori Bay)
Main damage	The largest earthquake disaster in Japanese history: 22,318 dead, 2,553 missing, 6,242 injured, nuclear power plant damaged.
The 2025 Aomori Prefecture Eastern offshore earthquake, Dec. 8, 2025, Mj 7.5	
Seismic Intensity	6U at Hachinohe
Main damage	0 deaths, 61 injured, buildings, overpass, and tower damaged.

Mw: Moment magnitude scale, Mj: Magnitude scale by Japan Meteorological Agency

Figure 12 shows the 1968 earthquake, which, due to heavy rainfall in the days leading up to it, resulted in numerous ground-related disasters.

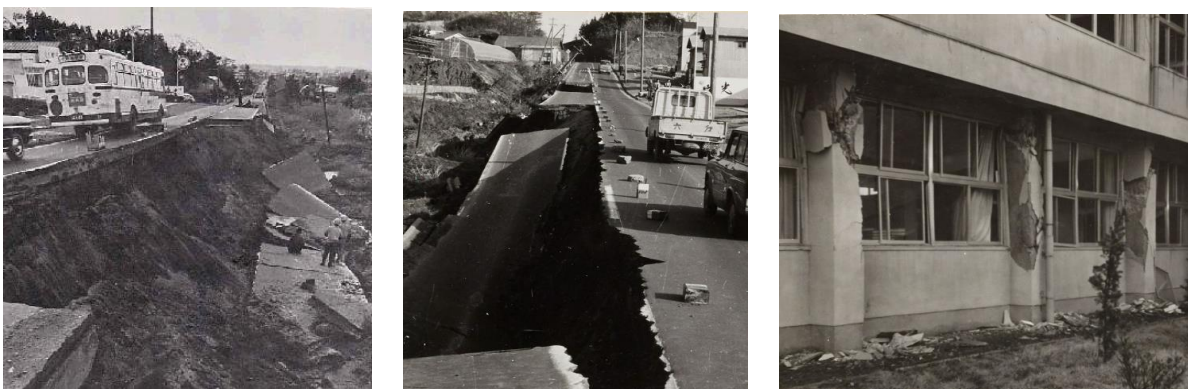


Figure 12. Damage by the 1968 Tokachi offshore Earthquake (Hachinohe City)

Left-Road collapse (Provided by Hachinohe City)

Center-Road collapse (Provided by Disaster Prevention Specialist Library)

Right-Damage to buildings (Provided by Disaster Prevention Specialist Library)

This suggests that earthquake damage can be compounded by other disasters. As mentioned earlier, this earthquake caused significant damage to water pipes, which contributed to Hachinohe

City becoming the birthplace of earthquake-resistant pipes.

Figure 13 shows the 1994 earthquake, which caused extensive damage to buildings such as the city hall and schools in Hachinohe City. In January of the following year, 1995, the Great Hanshin Earthquake caused significant damage to structures, leading to major changes in earthquake-resistant building standards.

Figure 14 shows the 2011 earthquake, which brought a large tsunami to Hachinohe City. Breakwaters designed to maintain harbor tranquility were destroyed, fishing boats moored in the harbor were washed ashore, and beachfront restaurants were damaged. The height of the tsunami that hit Hachinohe City was lower than that of Iwate and Miyagi prefectures to the south.



Figure 13. Damage by the 1994 Sanriku far offshore Earthquake (Hachinohe City) Left Slope collapse (from Morioka Meteorological Observatory website), Center) Damage to buildings (ibid.) Right Damage to buildings



Figure 14. Damage by the 2011 Tohoku Region Pacific Ocean offshore Earthquake and Tsunami

(Hachinohe City) Left) Bottom of a fishing boat washed ashore in Hachinohe Port by the tsunami (by author) Center) Overturned car. Offshore breakwater was destroyed in Hachinohe Port. (Ibid.) Right) Damage to a restaurant near the coast (Ibid.)

Following the major earthquake, seismic reinforcement efforts have been underway. This section describes the seismic reinforcement of social infrastructure implemented in the Hachinohe area.

(1) Seismic Reinforcement of Water Supply Facilities:

In Hachinohe City, the water supply system suffered significant damage in the 1968 earthquake. The main cause was that water pipe joints came loose due to ground deformation, leading to leaks. As a result, the seismic resistance of water pipe joints was strengthened. The developed joints are

based on a seismic isolation concept and are designed with large expansion and bending margins to accommodate major earthquakes and poor ground conditions. Under normal circumstances, the pipe body is not subjected to excessive force, and the joints can adapt to ground fluctuations. * In addition, loop main lines of water pipes have been installed around the city, and main water pipes have been installed so that even if some water treatment plants are damaged, the impact on the water supply will be minimal. As a result, in subsequent major earthquakes, even if localized water outages occur, a stable water supply to citizens has been possible. Furthermore, the development and installation of earthquake-resistant water pipes in Hachinohe City began immediately after the 1968 earthquake, making them the first earthquake-resistant water pipes in Japan, and Hachinohe City is considered the birthplace of earthquake-resistant water pipes.

In addition, following the 1994 Sanriku far offshore earthquake, in order to prevent large-scale structural damage in the 1995 Hyogo Prefecture Southern Earthquake that occurred the following month in January 1995, mainly in Kobe City, seismic regulations for various structures were revised and seismic reinforcement work was carried out. For bridges, in addition to seismic reinforcement of bridge piers, the installation of bridge girder collapse prevention devices has been carried out in various places. In Hachinohe City, as shown in Fig.15, seismic reinforcement of bridge piers has also been carried out mainly on important routes.



Figure 15 Seismic reinforcement of bridge piers by PC panels
(2012, Yanagibashi Bridge, Hachinohe City)

Findings/Discussion

This section introduces some of the earthquake disaster prevention measures implemented in Japan. While raising seawalls and strengthening structures are important, providing information on earthquakes and tsunamis, as well as responding to disasters from the time of the event onward, are also crucial activities.

Many citizens receive information through the Earthquake Early Warning system. Earthquake waves consist of fast P-waves (approximately 7 km/s) and slow S-waves (approximately 4 km/s), and this system utilizes the difference in their speeds. Since the strong waves that cause damage are S-waves, the Earthquake Early Warning system detects P-waves and warns of an impending earthquake before the S-waves arrive. For example, if detected 60 km away, it can provide 20 seconds of early warning. Because processing time for notification takes several seconds, if an earthquake occurs nearby, the Earthquake Early Warning may only be issued after the earthquake has arrived.

This warning is transmitted to citizens by the Japan Meteorological Agency via the internet

(mobile phones), television, radio, etc. Although it's only for a short time, this allows us to have information about the epicenter and magnitude of an earthquake, enabling us to prepare ourselves physically and mentally. This observation is conducted at approximately 1,700 points nationwide. The Earthquake Early Warning system is also working to quickly and accurately estimate the epicenter and magnitude from data from a limited number of observation points.

Fig. 16 is a distribution map of locations where sea level fluctuations are observed to monitor tsunamis. Information regarding tsunamis and storm surges is provided based on the data observed here. When an earthquake occurs, the Japan Meteorological Agency immediately estimates the magnitude and location of the earthquake, and based on this, determines the expected tsunami height along the coast. Within minutes of the earthquake, a major tsunami warning (expected maximum wave height of 3m or more), a tsunami warning (expected maximum wave height of 1m to 3m), or a tsunami advisory (expected maximum wave height of 0.2m to 1m) is issued for each region. The information provided includes the expected arrival time of the first tsunami and the expected tsunami height.

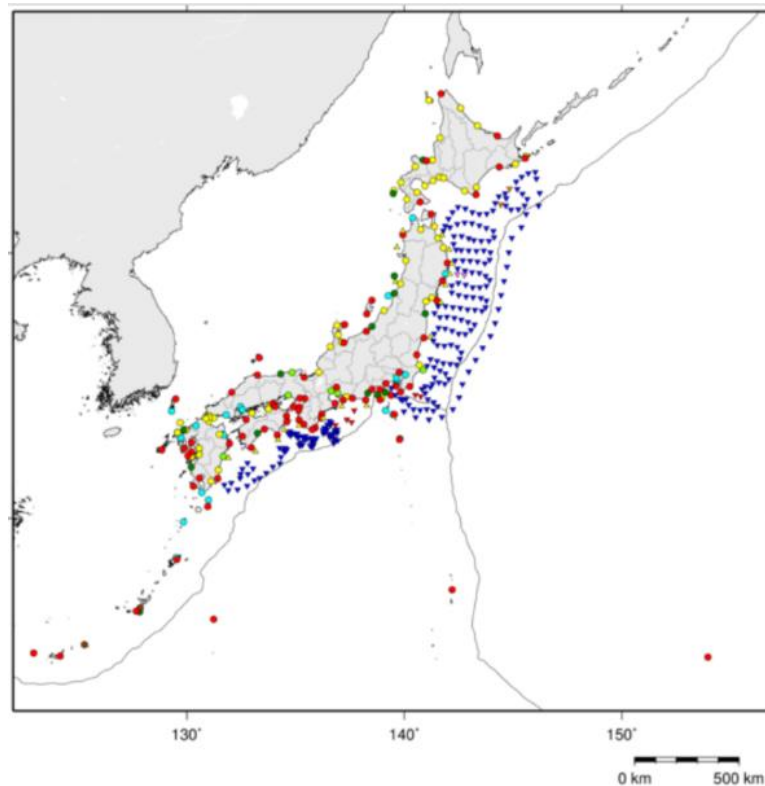


Figure 16 Tsunami observation points by JMA

Along with this basic information about tsunamis, information about expected damage and actions to take will also be conveyed. For example, in the case of a major tsunami warning, citizens will be informed via television, radio, and the internet that "A massive tsunami will strike, completely destroying or washing away wooden houses, and people will be swept away by the tsunami's current. People in coastal areas or along rivers should immediately evacuate to higher ground or safe places such as evacuation buildings." Evacuation sites and routes will be prepared and communicated to citizens by each municipality.

Fig.17 is a tsunami inundation forecast map, also known as a tsunami hazard map, provided to

citizens by Hachinohe City. It shows the inundation depth from past and future tsunamis, providing preliminary information for evacuation.

In a tsunami disaster, 27 tsunami evacuation buildings have been designated as emergency and temporary shelters for situations where evacuation to areas outside the predicted inundation zone is not possible in time.

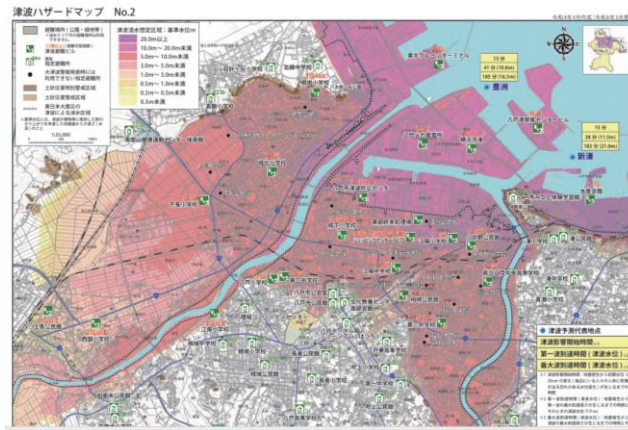


Figure 17 Tsunami Hazard Map (Central Hachinohe City, 2025)
Differences in color indicate differences in tsunami water depth.

These include tall buildings such as elementary and junior high schools, shopping centers, and factories in coastal areas, with cooperation from both public and private facilities. Additionally, these include evacuation towers constructed specifically for tsunami evacuation in low-lying areas without nearby higher ground. Fig. 18 shows one of the tsunami evacuation buildings constructed in response to the tsunami damage caused by the 2011 Tohoku earthquake and tsunami. It is equipped with necessary supplies for evacuation, such as drinking water, food, and heating equipment. It is also sometimes used for disaster prevention meetings.



Figure 18 Tsunami Disaster Prevention Center in Hachinohe
Constructed for tsunami evacuation purposes in a low-lying area with no nearby elevated ground.

Evacuation drills are conducted to teach people how to respond during an evacuation. In Japan, September 1st is designated as Disaster Prevention Day, and evacuation drills are conducted around this time as part of disaster prevention training. These drills are organized by schools, companies, and neighborhood associations, with support from local governments. The reason for

choosing September 1st is that this is when Japan enters its windy season, and the country has experienced severe flooding in the past. Fig.19 shows a disaster prevention drill conducted by students of Hachinohe Institute of Technology in collaboration with the local community. It is expected that experiencing these drills will enable people to respond more smoothly in the event of a disaster, thereby reducing damage.



Figure 19. Disaster Prevention Drill (Joint Drill between HIT Students and the Local Community)

- Left Water Discharge Training Conducted Under the Guidance of Firefighters
- Center Training in Evacuation Support for People with Disabilities, Experiencing Evacuation Under Different Conditions (Wheelchair, Slope, Gravel Road)
- Right: Earthquake Experience on a Vibration Table: Earthquake Simulation Vehicle mounted on a Car

In an earthquake or tsunami that is expected to cause damage, evacuation information will be disseminated by each municipality via television, radio, and the internet. At home, lifelines may be cut off, resulting in water outages, power outages, and other inconveniences. Evacuation centers are typically local schools and community centers. While drinking water, food, and bedding are provided, living in an evacuation center presents challenges regarding toilets and privacy. To address these issues, mobile toilets (vehicles equipped with multiple toilets) and indoor tents may be used. Fig.20 shows the locations of evacuation shelters in Hachinohe City. 80 locations have been designated to suit the actual needs of the residents.

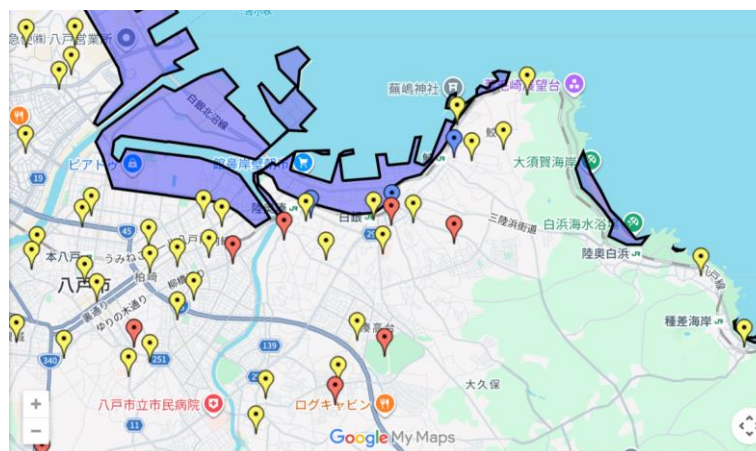


Figure 20. Google Maps showing 80 evacuation shelters in Hachinohe City during the 2011 Tohoku Region Pacific Ocean offshore Earthquake and tsunami. Schools and community centers were among the facilities used as evacuation shelters.

Life in evacuation centers is often inconvenient, and if the scale of damage is large and expected to be prolonged, temporary housing may be prepared. While the average area per unit is a very small 30 square meters, it provides access to water, sewage, electricity, gas, and heating, and allows for a certain degree of privacy. Rent is generally free, and the period of stay is typically several years. Fig.21 shows an example of temporary housing.

Afterward, some residents move out of emergency temporary housing as their homes are repaired or they find new residences. For citizens who cannot find housing, local governments sometimes provide permanent housing called "reconstruction housing." Reconstruction housing is public housing developed by local governments with the aim of providing long-term housing for people who have lost their homes in a disaster. The rent for this reconstruction housing is set lower than that for regular housing. Because it is difficult for the elderly to find new housing, reconstruction in aging areas is challenging.

In Japanese disaster prevention, there is a concept called "self-help, mutual aid, and public assistance." Self-help means protecting oneself, public assistance means that public institutions will protect oneself, and mutual aid means that oneself and public institutions cooperate to protect oneself.



Figure 21. Example of temporary housing

To protect oneself from disaster, first and foremost, each individual must take action to protect themselves. Based on the pre-disaster prevention measures promoted by the government, the author's recommended approach to personal disaster prevention is as follows:

1. Measures to arrange furniture: First, earthquake resistance of the home, prevention of furniture tipping over, prevention of ceiling-hanging objects falling, and prevention of glass products such as cups and bottles tipping over.
2. Stockpiling of food and beverages: Stockpiling three days' worth of food and water, storing used bathwater.
3. Preparation of an emergency survival kit: Valuables, identification, cash, etc.
4. Method of checking on the safety of family members: Dedicated phone number for checking on safety.
5. Confirmation of evacuation locations and routes: Community center.

In addition, I have taken other preventative measures such as placing slippers, a flashlight, and a radio around my bed, and preparing a portable toilet.

Conclusion

On December 8, 2025, I experienced an earthquake at my home in Hachinohe City. While the damage was not significant compared to the reported seismic intensity, considering the continued possibility of large earthquakes in the future, I have compiled my knowledge of earthquakes and tsunamis to date. Currently in Japan, there is concern about massive earthquakes and tsunamis in areas that have not experienced major earthquakes for some time, such as the Tokyo metropolitan area and the Tonankai earthquake, and disaster prevention plans are being developed accordingly. There are fears that earthquakes similar to the 2011 Tohoku earthquake could occur in other parts of Japan. Currently, long-term scientific earthquake prediction is not possible. It is hoped that it will become possible to scientifically evaluate whether the plate boundaries around Japan are in a period of concentrated activity with earthquakes occurring at intervals ranging from several decades to several centuries.

As discussed in this text, each time a major earthquake occurs, various disaster prevention measures are modified or added. Regarding the seismic resistance of structures, damage from major earthquakes is investigated, design standards are revised, and improvements are made to existing structures as seismic reinforcement work. However, it has been reported that the frequency of record-high or record-low occurrences is high not only for earthquakes and tsunamis, but also for other disasters such as floods and heavy snowfalls. By accumulating records of natural disasters, it is necessary to consider how future countermeasures should be developed. Furthermore, there are challenges such as how much seismic resistance should be increased and how high seawalls need to be built.

I hope this article will be useful as information regarding earthquakes and tsunamis in Japan, particularly in Hachinohe City.

Acknowledgments

In writing this article, I utilized materials from the Japan Meteorological Agency, the Morioka Local Meteorological Observatory, Hachinohe City, and the Disaster Prevention Specialist Library. When considering natural disasters, I believe that the preservation and availability of past data is extremely useful in reflecting on the past and considering future countermeasures. I predict that the accumulation of data will lead to a reduction in future disasters. I would like to express my gratitude to everyone who provided the materials.

References

1. Japan Meteorological Agency website: <https://www.jma.go.jp/jma/index.html>
2. Morioka Local Meteorological Observatory: <https://www.jma-net.go.jp/morioka/>
3. Hachinohe City Office: <https://www.city.hachinohe.aomori.jp/>
4. Disaster Prevention Specialist Library: <https://city-net.or.jp/products/library/>
5. Prime Minister's Office: What you can do before disaster strikes
<https://www.kantei.go.jp/jp/headline/bousai/sonae.html>
6. Government of Japan. Disaster Management in Japan. Available at:
<https://www.bousai.go.jp/> (accessed: 18.06.2026).
7. Cabinet Office of Japan. White Paper on Disaster Management. Available at:
<https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/> (accessed: 18.06.2026).
8. Japan Meteorological Agency. Earthquake Information. Available at:
<https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/eew.html> (accessed: 18.06.2026).

9. Japan Meteorological Agency. Tsunami Warning and Forecast System. Available at: <https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/tsunami.html> (accessed: 18.06.2026).
10. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). Disaster Prevention and Infrastructure Resilience. Available at: <https://www.mlit.go.jp/en/> (accessed: 18.06.2026).
11. Fire and Disaster Management Agency (FDMA). Disaster Prevention Information. Available at: <https://www.fdma.go.jp/en/> (accessed: 18.06.2026).
12. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED). Available at: <https://www.bosai.go.jp/e/> (accessed: 18.06.2026).
13. Earthquake Research Committee, Headquarters for Earthquake Research Promotion. Long-Term Evaluation of Seismic Activity. Available at: <https://www.jishin.go.jp/evaluation/> (accessed: 18.06.2026).
14. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Available at: <https://www.undrr.org/> (accessed: 18.06.2026).
15. International Tsunami Information Center (ITIC). Tsunami Preparedness and Mitigation. Available at: <https://itic.ioc-unesco.org/> (accessed: 18.06.2026).

Information about the author:

Akira Hasegawa- Emeritus professor, Hachinohe Institute of Technology, Hachinohe, Japan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-27-40>

Характеристика каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече и оценка ее применимости в качестве активной минеральной добавки для цементных композиций

М.А. Джусупова¹ , М.С. Кожахмет² , С.Т. Кульшикова^{*3} 

¹*Кыргызский государственный технический университет им.И.Раззакова, Бишкек, Кыргызстан*

²*Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

³*Жезказганский университет имени О.А.Байконурова, Жезказган, Казахстан*

*E mail: dzmahavat@gmail.com, meiram.kms1@gmail.com, *saule.kulshikova@gmail.com*

Аннотация. Исследована каолинсодержащая глина месторождения Кара-Кече как потенциальное сырье для получения активной минеральной добавки к цементным композициям. Выполнена оценка сырьевой базы каолиновых глин Кыргызской Республики и исследованы состав и структурные особенности изучаемого материала. Для оценки характеристик глины использованы методы рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового и электронно-микроскопического анализа. Установлено, что глина содержит каолинит 45-55 %, иллит 15-20 % и кварц 25-30 %. Термоактивацию глины проводили при 550-700 °С со скоростью нагрева 100°С/мин и выдержкой 3 часа, после чего измельчали 2-3 минуты в мельнице ударно-роторного типа и вводили взамен 5, 10, 15 % цемента. В ранние сроки твердения 3-7 суток при ведении 15 % глины обеспечивается прирост прочности цементных композиций на 74,3 и 35,6 % по сравнению с контрольным цементом. Для 28 и 90 суточных образцов оптимальное количество составило 5 %, где повышение прочности составляет +28,1 и +9,8 % соответственно. Полученные данные свидетельствуют о возможности использования глины месторождения Кара-Кече в качестве минеральной добавки при разработке цементных композиций.

Ключевые слова: каолинсодержащая глина, месторождение Кара-Кече, термическая активация, активная минеральная добавка, пуццолановая активность, цементные композиции

Введение

Развитие строительной индустрии Кыргызстана сопровождается поиском эффективных способов использования местного минерального сырья. Перспективным направлением является получение активных минеральных добавок (АМД) из глин, пригодных для использования в составе композиционных цементных вяжущих и бетонов. Известно, что цементная промышленность занимает одно из самых высоких мест по уровню загрязнений окружающей среды, а использование одной тонны модификаторов бетона в среднем экономит 2,5-3,0 т. цемента. Одним из самых востребованных альтернативных дополнительных цементных материалов являются кальцинированные глины.

Исследователи в обзорной статье [1,2,3] указывают на перспективность частичной замены клинкера кальцинированной глиной, таких как метакаолин. Активность метакаолина зависит от совокупности факторов: химический состав, степень кристалличности, тонкость помола и температура термообработки, однако из-за широкого разнообразия состава их стандартизированное использование весьма затруднительно [3].

При обобщении подходов к активации глин [7] авторами было отмечено, что несмотря на интенсивный интерес к таким материалам и наличие разрозненных данных по наиболее распространенным природным глинам критерии выбора сырья и режимов обработки еще не систематизированы. В обзоре по LC3-системам [8] указан высокий потенциал кальцинированных глин для получения эффективных цементных композиций, но основное внимание сосредоточено на общих преимуществах, ограничениях и перспективах, а вопросы о реакционной способности и выбора оптимальных режимов активации конкретных местных глин не рассматривались.

Исследователями [9] установлено, что глины, кальцинированные при оптимальной температуре, проявляют пуццолановую активность и рассматриваются в качестве компонента для цементных систем. Однако исследование выполнено для другого сырья и не позволяет напрямую перенести полученные результаты на каолинсодержащую глину месторождения Кара-Кече. В работе [10] были изучены смешанные иллит-каолинитовые глины, в которых степень их активации и соответственно реакционная способность зависит от содержания глинистых минералов, кварца и карбонатных примесей. Каолинитовые и монтмориллонитовые кальцинированные глины, как установлено [11], по-разному влияют на сульфатный баланс, раннюю гидратацию и свойства порового раствора цементной системы. То есть минералогический тип исходной глины непосредственно определяет ее поведение после активации. Полученные результаты в данном случае не раскрывают особенности каолинсодержащей глины Кара-Кече.

При оценке реакционной способности кальцинированных иллита, каолинита и монтмориллонита, как показали авторы [12], уровень пуццолановой активности определяется не только температурой обжига, но и минеральной природой сырья; наиболее высокая реакционная способность характерна для каолинитсодержащих систем. Данная работа в большей степени носит фундаментальный характер и не охватывает глины месторождений Центральной Азии. При исследовании кальцинированных каолинит-иллитовых глин [13] авторы установили их способность обеспечивать цементным композициям дополнительный прирост прочности в длительные сроки твердения от 28 до 90 суток. Однако в исследованиях не уделялось внимания предварительной оценке сырья и выбору режима активации для конкретной глины. В работе [14] авторы отмечают, что низкосортные глины могут использоваться для

получения LC3цементных композиций, а их эффективность зависит от реакционной способности, дисперсности и содержания в них минерала каолинита. Однако данные результаты получены на известняково-кальцинированных цементах и не дают ответа на применимость каолинсодержащей глины Кара-Кече в цементных композициях. В работе [15] рассматривали влияние трёх распространённых низкосортных глинистых минералов: каолинита, монтмориллонита и иллита на поведение кальцинированного глиняного цемента LC3. Каолинит показал наибольшую реакционную активность, но из-за ограниченной его доступности рассматривались альтернативные низкокачественные монтмориллонитовые и иллитовые глины, которые также показали свою эффективность. Авторы подчеркивают, что для каждого конкретного сырья необходимы индивидуальные экспериментальные исследования, поскольку универсального режима активации для всех глин не существует. Именно этот нерешенный аспект сохраняется и для каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече. При оценке реакционной способности кальцинированных иллита, каолинита и монтмориллонита, как показали авторы [12], уровень пуццолановой активности определяется не только температурой обжига, но и минеральной природой сырья; наиболее высокая реакционная способность характерна для каолинитсодержащих систем. Данная работа в большей степени носит фундаментальный характер и не охватывает глины месторождений Центральной Азии. При исследовании кальцинированных каолинито-иллитовых глин [13] авторы установили их способность обеспечивать цементным композициям дополнительный прирост прочности в длительные сроки твердения от 28 до 90 суток. Однако в исследованиях не уделялось внимания предварительной оценке сырья и выбору режима активации для конкретной глины. В работе [14] авторы отмечают, что низкосортные глины могут использоваться для получения LC3цементных композиций, а их эффективность зависит от реакционной способности, дисперсности и содержания в них минерала каолинита. Однако данные результаты получены на известняково-кальцинированных цементах и не дают ответа на применимость каолинсодержащей глины Кара-Кече в цементных композициях. В работе [15] рассматривали влияние трёх распространённых низкосортных глинистых минералов: каолинита, монтмориллонита и иллита на поведение кальцинированного глиняного цемента LC³. Каолинит показал наибольшую реакционную активность, но из-за ограниченной его доступности рассматривались альтернативные низкокачественные монтмориллонитовые и иллитовые глины, которые также показали свою эффективность. Авторы подчеркивают, что для каждого конкретного сырья необходимы индивидуальные экспериментальные исследования, поскольку универсального режима активации для всех глин не существует. Именно этот нерешенный аспект сохраняется и для каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече. Таким образом, анализ современных исследований показывает, что в литературе достаточно подробно раскрыты общие закономерности термоактивации каолинитсодержащих и смешанных глин, а также их влияние на гидратацию и прочность цементных систем. Вместе с тем остаются недостаточно изученными применимость каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече в качестве сырья для активной минеральной добавки, связь ее химико-минералогических особенностей с выбором температурного режима активации и влияние полученного термоактивированного материала на прочность цементных композиций. Предварительная сравнительная оценка каолиновых глин Кыргызстана по химическим составам позволила отметить высокое содержание SiO₂ от 48,5 до 71,5 % и Al₂O₃ от 14,8 до

30,4 %. Сравнительная оценка химического состава каолинсодержащих глин Кыргызстана (табл. 1) показывает, что глина Кара-Кече характеризуется алюмосиликатной природой и по содержанию SiO_2 и Al_2O_3 может рассматриваться как потенциальное сырье для получения активной минеральной добавки.

Таблица 1. Химический состав каолинсодержащих глин Кыргызстана [19].

№	Наименование месторождения каолина	Химический состав сырья, %							Потери при прокаливании
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	
1	Чокобулак	48,5	30,4	1,38	0,65	-	-	-	-
2	Оргочёр	59,96	26,69	1,2	0,09	-	-	3,89	-
3	Согуты	53,51	33,2	1,96	0,29	0,21	0,61	-	11,14
4	Кара-Кече	61,84	21,63	1,68	0,81	0,2	0,88	-	9,92
5	Кок-Мойнок	52,7	29,55	1,45	0,31	0,80	0,79	-	8,43
6	Сулукта	69,5	25,2	4,9	-	-	-	-	-
7	Кара-Булун	68,5	22,2	0,98	0,25	-	-	-	-
8	Таш-Кумыр	71,5	19,2	0,89	0,81	0,6	0,81	-	0,26
9	Кызыл-Кия	65,84	14,8	4,35	-	2,85	1,76	-	6,72
10	Каолин Моск.район	61,42	19,15	1,95	0,92	-	0,9	2,87	-
11	Кеминский район	65,32	22,18	0,9	-	0,24	1,8	-	9,8

Исследования отечественных ученых были направлены на изучение особенностей фазового состава и структурно-фазовых превращений при обжиге глинистого сырья месторождений Чоко-Булак, Кок-Мойнок, Кара-Кече, Согуты, а также проводилось сравнение с импортируемым Глуховецким каолином (Украина). При анализе данных РФА выяснено, что местные глины ближе к каолинам. Глины месторождений Чоко-Булак и Кок-Мойнок имеют более высокое содержание каолинита, чем глина Кара-Кече. После термообработки (обжига) глин до температуры до 600 оС происходит деструкция кристаллической решетки каолинита с образованием промежуточных фаз [18, 21]. Но основной целью их исследования было изучение каолинсодержащих глин для получения адсорбента и для регулирования технологических свойств керамических изделий.

В связи с этим целью настоящего исследования является характеристика каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече и оценка ее применимости после термической активации в качестве активной минеральной добавки для цементных композиций.

Методология

В качестве исходного минерального сырья в исследовании использовали каолинсодержащую глину Кара-Кече (Кыргызстан), отобранную из покровной части угольного пласта (рис. 1а). По предварительным данным глина относится к гидрослюдисто-каолинитовым разновидностям. В качестве вяжущего применяли портландцемент ПЦ 400 Д20 производства цементного завода г. Кант (Кыргызстан). Химический состав цемента, %: SiO_2 – 22,57; Al_2O_3 – 4,87; Fe_2O_3 – 4,24; CaO – 65,39; MgO – 1,79; SO_3 – 0,36; потери при прокаливании – 0,25. Минералогический состав

портландцемента, %: C_3S – 63,2; C_2S – 15,8; C_3A – 5,6; C_4AF – 12,6.

Для повышения реакционной способности глинистого сырья применяют различные способы активации, однако для получения активных минеральных добавок, используемых в цементных композициях, наибольшее практическое значение имеет термическая активация путем кальцинации [3, 21].



а)



б)

Рисунок 1. а) глина месторождения Кара-Кече; б) порошок термоактивированной глины Кара-Кече

В настоящем исследовании термическую активацию глины Кара-Кече осуществляли в электрической муфельной печи со скоростью нагрева $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в интервале температур $550\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Продолжительность изотермической выдержки составляла 3 часа, после чего охлаждение образцов глины осуществляли в печи до комнатной температуры. После термообработки глину измельчали в лабораторной мельнице ударно-роторного типа FW-100 в интервале 2–3 минуты.

экспериментальной оценки прочностных характеристик цементных композиций были изготовлены образцы размером $2 \times 2 \times 2\text{ см}$. Термоактивированную глину Элементный состав глины определяли методом волнодисперсионной рентгенофлуорисцентной спектроскопии (WDXRF) на приборе S2 PUMA (Bruker AXS, Германия). Анализ проводили в вакуумном режиме при напряжении рентгеновской трубки до 50 кВ. Порошковые образцы глины предварительно высушивали и прессовали в таблетки. Содержание основных оксидов (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O и др.) определяли по интенсивности характеристических линий элементов с последующей автоматической обработкой результатов в штатном программном обеспечении прибора.

Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре D6 PHASER (Bruker AXS, Германия) с использованием $\text{Cu-K}\alpha$ излучения ($\lambda = 1,5406\text{ \AA}$) при 30 кВ и 10 мА. Съёмку проводили в диапазоне $2\theta = 5\text{--}80^{\circ}$ с шагом $0,02^{\circ}$ в геометрии θ - 2θ . Идентификацию фаз выполняли с использованием базы данных PDF-2 (ICDD), а количественный фазовый анализ – методом Ритвельда с использованием программного обеспечения TOPAS (Bruker). Микроструктурные исследования проводили методом сканирующей электронной

микроскопии на микроскопе Hitachi TM4000Plus при ускоряющем напряжении 5, 10 и 15 кВ с использованием системы энергодисперсионного микроанализа.

Для предварительной вводили взамен части цемента в количестве 5, 10 и 15 % от его массы. Составы различались температурой получения минеральной добавки (550 и 700 °С) и продолжительностью измельчения в мельнице (2 и 3 мин.). Из каждого состава изготавливали не менее 6 образцов и рассчитывали среднее значение. Прочность цементных образцов оценивали в установленные сроки твердения: 3, 7, 28 и 90 суток.

Результаты и обсуждение

По минералогическому составу глина Кара-Кече относится к гидрослюдисто-каолининовым (табл. 1), для подтверждения возможности получения активных минеральных добавок была изучена микроструктура, оценен ее химический, фазовый, минеральный составы.

Микроструктурный и элементный анализ показал, что матрица глины Кара-Кече агрегатно-пластинчатая, частично ориентированная, пористая. Наблюдаются микротрещины, зоны флокуляции и контрастные включения, характерные для Fe-оксидов и их гидратов (рис.2). По морфологическим признакам можно выделить минералогические фазы каолинита и иллита в виде тонких пластинчатых частиц, образующих слоистую матрицу. Кварц и полевые шпаты встречаются редко и представлены угловатыми зёрнами с гладкими поверхностями. Распределённые неравномерно оксиды и гидроксиды железа в виде точечных или плёночных контрастных включений. Карбонаты кальция/магния в виде светлых зон без выраженной чешуйчатой структуры. SEM-анализ подтвердил наличие тонкодисперсной пластинчатой матрицы с преобладанием алюмосиликатов, что указывает на преобладание элементов Si, Al и O и позволяет предполагать о повышении пуццоланической активности после термообработки.

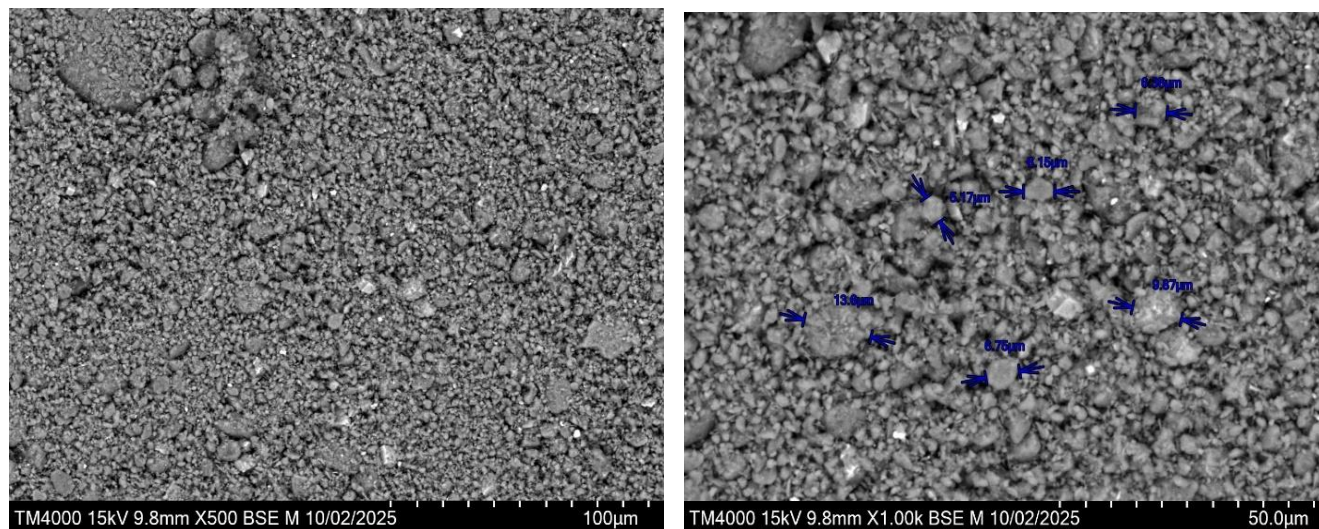


Рисунок 2. SEM-изображение глины Кара-Кече при разрешении $\times 500$ и $\times 1.00k$

Минералогический состав глины Кара-Кече по основным рефлексам (2θ , °) представлен

следующими минералами: каолинит $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ – 12,3; 24,8; 38,5; иллит $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – 8,9; 17,7; 27,8; кварц SiO_2 – 20,8; 26,6; 50,1; 60,0; полевошпат (ортоклаз/альбит) – 27,6; 30,0; 56,3; гематит Fe_2O_3 – 33,1; 35,6; 54,0 и кальцит CaCO_3 – 29,4; 47,3. Результаты рентгенофазового анализа (рис.3) позволили установить, что основной глинистой фазой является минерал – каолинит (45-55 %) с дополнительным содержанием иллита (15-20 %). К неглинистым фазам относят кварц (25-30 %), полевые шпаты (5-10 %), Fe-оксиды (до 5 %), кальцит (следы до 2 %). Соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ приблизительно 2:1, характерное для каолинито-кварцевых смесей указывают на возможность термоактивации глины Кара-Кече в глинист нежели в метактолин. По тепловыделению прогноз по фазовым превращениям указывает, что при температуре 450–600 °C происходит дегидроксилирование каолинита и переход в метактолин.

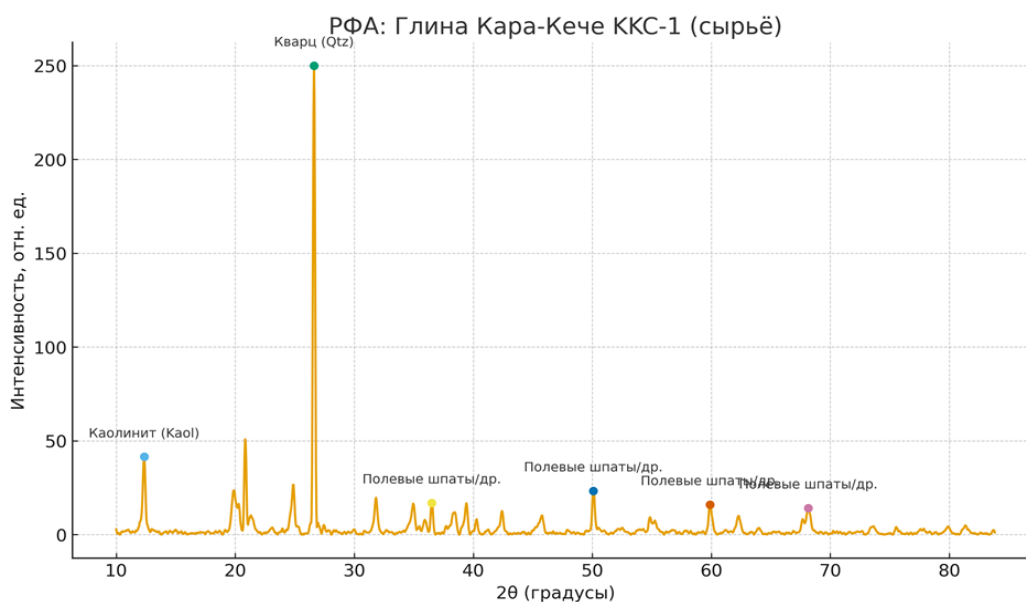


Рисунок 3. Дифрактограмма глины месторождения Кара-Кече

При 650–800 °С формируется аморфная алюмосиликатная матрица. При повышении температуры > 950 °С будет происходить переход в муллит и кристобалит. Для оценки влияния активной минеральной добавки на прочность цементных композиций были проведены предварительные экспериментальные исследования. Полученные данные по прочности при сжатии в возрасте 3, 7, 28 и 90 суток приведены в табл. 2. Нормальная густота цементного теста НГ–25,5 %. Результаты предварительных испытаний (табл. 2) цементных композиций с термоактивированной глиной Кара-Кече свидетельствуют о существенном влиянии на прочность в ранние и поздние сроки твердения рецептурно-технологических параметров: температуры обжига, содержания добавки и продолжительности измельчения. В качестве контрольного принят состав на чистом цементе без добавки, прочность которого на 3-и сутки $R^3_{сж} = 56$ МПа, на 7-е сутки $R^7_{сж} = 71,0$ МПа, на 28-е сутки $R^{28}_{сж} = 114,0$ МПа и через 90 суток $R^{90}_{сж} = 146,6$ МПа. Анализ полученных данных показал, что наиболее выраженное положительное влияние на прочность оказывают составы с глиной, обожженной при 700 °С. При данной температуре обеспечивается максимальная степень термической активации глины и сопровождается

ростом пуццоланической активности, что способствует ускорению взаимодействия с гидроксидом кальция и формированию дополнительных гидросиликатных и гидроалюмосиликатных новообразований. В отличие от глины, активированной при 700°C, цементные композиции с глиной, обожженной при 550°C, характеризуются менее устойчивым эффектом реакционной способности. В отдельных случаях наблюдается повышение прочности, однако при дозировках 10-15 % часть составов уступает контрольному составу, особенно в 28- и 90- суточном возрасте.

Таблица 2. Прочность цементных композиций с термоактивированной глиной Кара-Кече

№ состава	Количество глины после обжига, % от массы цемента	Температура обжига, °C	Время измельчения, мин	R ³ _{сж} , МПа	R ⁷ _{сж} , МПа	R ²⁸ _{сж} , МПа	R ⁹⁰ _{сж} , МПа
Контрольный	0	-	-	56,0	71,0	114,0	146,6
1	5	550	2	58,8	75,7	131,3	154,5
2	5	550	3	59,4	71,1	126,6	148,7
3	5	700	2	69,7	81,2	131,0	143,8
4	5	700	3	76,0	76,3	146,0	161,0
5	10	550	2	54,0	74,0	109,3	128,7
6	10	550	3	46,5	69,3	122,6	146,0
7	10	700	2	71,5	92,5	128,0	142,5
8	10	700	3	78,5	86,8	141,1	156,7
9	15	550	2	63,7	74,3	109,5	127,7
10	15	550	3	76,7	77,8	117,0	137,2
11	15	700	2	70,8	89,0	133,3	142,9
12	15	700	3	97,6	96,3	140,1	154,8

На повышение реакционной способности существенное влияние оказывает также время измельчения. При увеличении продолжительности помола с 2 до 3 минут наблюдается рост прочности цементных композиций, особенно на 3-и и 28 суток. Данная тенденция объясняется увеличением удельной поверхности термоактивированной глины и улучшением равномерности ее распределения в цементной матрице. Причем положительный эффект от измельчения следует сочетать с температурой обжига и дозировкой добавки, что подтверждает сложный характер взаимодействия исследуемых факторов.

Следует отметить, что увеличение количества термоактивированной глины в цементных композициях не всегда приводит к пропорциональному росту их прочности. Наиболее высокие показатели долговременной прочности 28 и 90 суток получены при дозировке 5 % от массы цемента. Тогда как в ранние сроки более выраженный эффект наблюдается при введении 10–15 %. Полученные данные указывают на необходимость соблюдения оптимального баланса содержания активированной глины, превышение которого может сопровождаться эффектом разбавления цементной системы и снижением вклада клинкерной части в формирование прочного цементного камня.

Наибольшее значение прочности на 3-и сутки $R^3_{сж} = 97,6$ МПа наблюдается у состава № 12 (15 % минеральной добавки, 700 °С, 3 мин. помол), что выше контрольного состава на 74,3 %. На 7-е сутки показатель прочности достигает $R^7_{сж} = 96,3$ МПа, что выше контрольного на 35,6 %. Далее для $R^{28}_{сж} = 140,1$ МПа прирост составил 22,9 % и на 90-е сутки для $R^{90}_{сж} = 154,8$ МПа прирост 5,6 %. Наибольшие значения прочности на 28-е и 90-е сутки зафиксированы для №4 с содержанием 5 % термоактивированной глины, полученной при 700 °С и измельчением 3 мин. Показатель прочности $R^{28}_{сж} = 146,0$ МПа на 28,1 % выше контрольного значения и $R^{90}_{сж} = 161,0$ МПа выше контрольного на 9,8 %. Это свидетельствует о том, что при минимальном содержании добавки, обожженной при 700 °С и помоле 3 минуты обеспечиваются благоприятные условия для формирования плотной и прочной структуры цементного камня в длительные сроки твердения.

Для состава №8 (10 %; 700 °С; 3 мин) наблюдаются также высокие показатели прочности, превышающие контрольный: $R^3_{сж} = 78,5$ МПа, $R^7_{сж} = 86,8$ МПа, $R^{28}_{сж} = 141,09$ МПа и $R^{90}_{сж} = 156,7$ МПа, где прирост составляет 40,2; 22,3; 23,8 и 6,9% соответственно. Данные свидетельствуют об эффективности введения минеральной добавки в широком диапазоне.

Для составов с активированной глиной при 550 °С даже при высокой степени активации не обеспечивается равнозначная прочность с контрольным образцом. Так составы № 5 и № 9 имеют меньшие значения в 28- и 90-суточном возрасте по сравнению с контрольным. Для состава № 5 $R^{28}_{сж} = 109,3$ МПа и $R^{90}_{сж} = 128,7$ МПа, что ниже контрольного на 4,1 % и 12,2 %. Для состава № 9 $R^{28}_{сж} = 109,5$ МПа и $R^{90}_{сж} = 127,7$ МПа, что ниже контрольного на 3,9 и 12,9%. Это указывает на недостаточную термическую активацию глины при 550 °С, что не обеспечивает необходимый уровень ее реакционной способности.

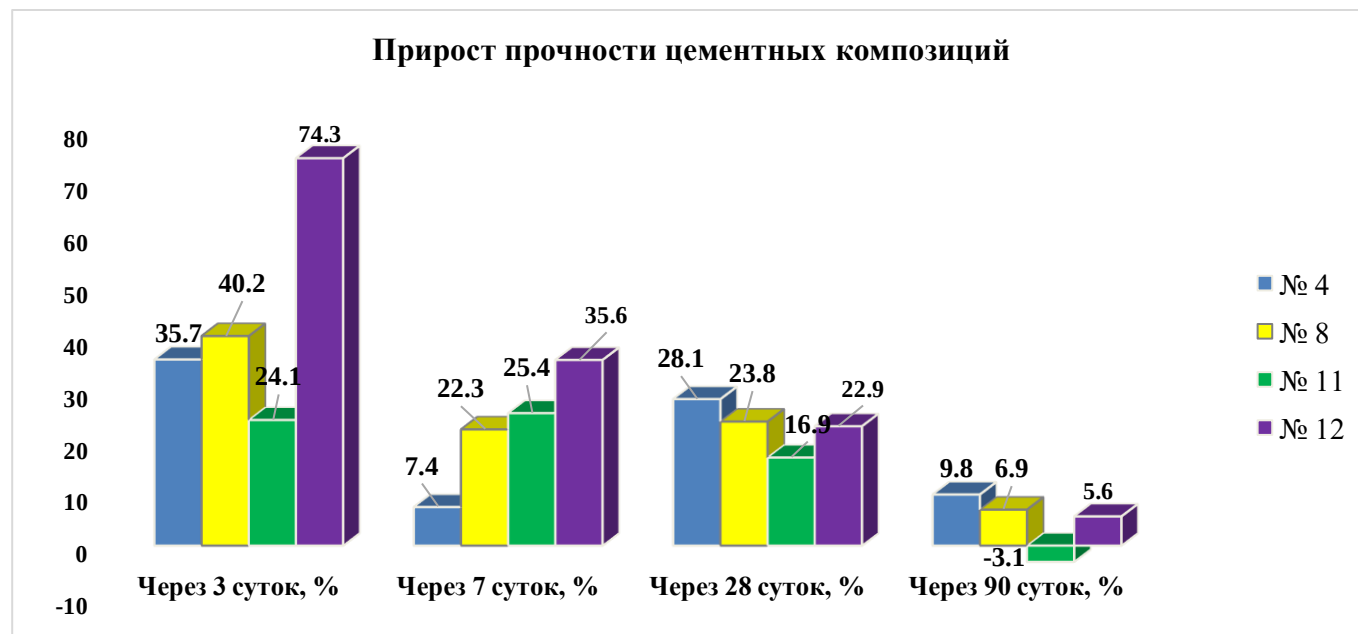


Рисунок 4. Прирост прочности цементных композиций с термоактивированной глиной Кара-Кече относительно контрольного состава

На рисунке 4 наглядно можно пронаблюдать относительно контрольного состава прирост прочности цементных композиций при введении термоактивированной глины

Кара-Кече, который в ранние сроки твердения наблюдается у составов № 8 и № 12, тогда как наиболее высокие показатели в 28- и 90-суточном возрасте характерны для состава № 4. При сопоставлении полученных результатов прочности цементных композиций в разные сроки твердения выявлены две основные тенденции. Первая заключается в том, что в ранние сроки твердения наиболее эффективными оказались составы с наибольшим содержанием минеральной добавки, активированной при максимальной температуре 700 °С и времени помола 3 минуты.

Вторая тенденция состоит в том, что максимальные значения прочности на 28-е и 90-е сутки обеспечиваются при умеренной (оптимальной) дозировке добавки, полученной при тех же условиях подготовки. Это свидетельствует о различии механизмов, определяющих раннее и позднее структурообразование. Если на начальных стадиях важна интенсификация процессов гидратации и нуклеации, то в позднем возрасте решающее значение приобретают плотность структуры и сбалансированность фазового состава цементного камня.

Таким образом, по результатам предварительного эксперимента можно говорить о перспективности применения термоактивированной глины Кара-Кече в качестве активной минеральной добавки в цементных композициях, позволяющих не только снизить содержание цемента, но и значительно повысить их прочностные и структурные показатели.

Заключение

В результате исследования установлено, что каолинсодержащая глина месторождения Кара-Кече по химическому и минералогическому составу является перспективным алюмосиликатным сырьем для получения активной минеральной добавки. По данным SEM- и XRD-анализа в составе глины преобладают каолинит, иллит и кварц, а выявленные структурные особенности указывают на возможность повышения реакционной способности материала после термической активации. Предварительные испытания цементных композиций показали, что наиболее выраженный положительный эффект по прочности достигается при использовании термоактивированной глины, полученной при 700 °С и измельченной в течение 3 мин. Полученные данные подтверждают перспективность использования глины месторождения Кара-Кече для получения активной минеральной добавки для производства цементных композиций с повышенными прочностными свойствами

Вклад авторов.

Джусупова М.А. Обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач) Разработка методологии исследования Планирование исследований (подбор рецептуры, температура обжига и количество вводимой активной минеральной добавки

Кульшикова С.Т. Сбор, анализ и обобщение данных литературы, редактирование текста рукописи - Оформление рукописи Работа с графическим материалом

Кожухмет М.С. Написание текста рукописи - Критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до или после публикации рукописи)

Список литературы

1. Sabir, B.; Wild, S.; Bai, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cem. Concr. Compos.* 2001, 23, 441-454. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Sperinck, S., Raiteri, P., Marks, N., Wright, K. Dehydroxylation of kaolinite to metakaolin -a molecular dynamics study.// *Journal of Materials Chemistry*. 2011. vol. 21. PP. 2118-2125. <https://doi.org/10.1039/C0JM01748E>
3. Overmann, S.; Vollpracht, A.; Matschei, T. Reactivity of Calcined Clays as SCM-A Review. *Materials* 2024, 17, 312. <https://doi.org/10.3390/ma17020312>
4. Дворкин, Л. И., Житковский, В. В., Дворкин, О. Л., Разумовский, А. Р. Метакаолин - эффективная минеральная добавка для бетонов. *Технологии бетонов*. – 2015. – № 9-10(110-111). – С. 21-24. – EDN UYFAZF.119 pp.
5. Рахимов, Р. З., Рахимова, Н. Р., Стоянов, О. В. Глинистые пуццоланы. Часть 1. Обзор. *Вестник технологического университета*. 2016. Т.19, №1
6. Dhandapani Y. et al. Fresh properties of concrete containing calcined clays: a review by RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures*. 2022. Vol. 55. Art. 151. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01971-3>
7. Meng D., Djobo J.N.Y., Segura I.P., Kaze R.C., Kuenzel C., Ranjbar N. Clay activation: A review. *Materials Today*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.11.024>
8. Ghazy M.F., Maaty E.S.A., Elaty M.A., Alrwashdeh A.A. A comprehensive review of limestone calcined clay cement (LC3): Environmental and properties benefits, challenges, opportunities, and future directions. *Results in Engineering*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108319>
9. Pinheiro V.D., Abreu R.F.d., Alexandre J., Xavier G.d.C., Marvila M.T., de Azevedo A.R.G. Pozzolanic Potential of Calcined Clays at Medium Temperature as Supplementary Cementitious Material. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Art. 7508. <https://doi.org/10.3390/su16177508>
10. Keppert M., Pommer V., Šádková K. et al. Thermal activation of illitic-kaolinitic mixed clays. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024. Vol. 149. P. 10533–10544. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13342-x>
11. da Silva M.R.C., Andrade Neto J.S., Walkley B. et al. Effects of kaolinite and montmorillonite calcined clays on the sulfate balance, early hydration, and artificial pore solution of limestone calcined clay cements (LC3). *Materials and Structures*. 2024. Vol. 57. Art. 187. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02462-3>
12. Dhandapani Y., Subramanian K.K., Kanavaris F., Black L., Bernal S.A. The meta-kaolinite content of the calcined clay source impacts the mechanical and durability performance of blended Portland concrete. *Cement and Concrete Research*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107922>
13. Rehman M.U., MacLeod A.J.N., Aldridge L. et al. Differences in hydration kinetics and phase development of Australian bentonite and kaolinite based limestone calcined clay cements. *Materials and Structures*. 2025. Vol. 58. Art. 226. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02743-5>
14. Flegar Pregernik M., Serdar M. Long-Term Hydration Study of Blended Cement: Calcined Kaolinite-Illite Composite Clays Compared to Fly Ash. *Materials*. 2025. Vol. 18. Art. 5123. <https://doi.org/10.3390/ma18225123>

15. Blouch N., Kazmi S.N.H., Akram N., Saleem M.J., Khan I.A., Javed K., Ahmad S., Khan A. Performance Evaluation of Low-Grade Clay Minerals in LC3-Based Cementitious Composites. *Solids*. 2025. Vol. 6. Art. 35. <https://doi.org/10.3390/solids6030035>
16. Bakera, A.T.; Alexander, M.G. Use of metakaolin as supplementary cementitious material in concrete, with focus on durability properties. *RILEM Tech. Lett.* 2019, 4, 89–102. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Thankam, G.L.; Renganathan, N.T. Ideal supplementary cementing material-Metakaolin: A review. *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 2020, 11, 58-65. [Google Scholar]
18. Боркоев, Б.М. Особенности фазового состава и структурно-фазовые превращения при обжиге керамического сырья Кыргызской Республики. // Вестник КГУСТА, 2016, №2(52), с.139-144.
19. Дженчураев, Д.Д., Дженчураева, А.В. Георесурсы неметаллорудного сырья Тянь-Шаня и их рациональное использование. Издательство КРСУ, Бишкек, 2021 г., 370 стр., УДК: 553.6 (235.216), ISBN: 978-9967-19-809-8- 11. 4.
20. Hanein, T., Thienel, K.C., Zunino, F. et al. Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. *Mater Struct* 55, 3 (2022). [**M. Dzhusupova ¹, M. Kozhakhmet ², S. Kulshikova ^{*3}**](https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-Маймеков, 3.К. и др. Физико-химические и термодинамические характеристики каолиновой глины Чоко-Булакского месторождения при различных температурах ее деструкции. Известия НАН КР, 2023, №7, с.32-38.</div><div data-bbox=)

¹ *I. Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan*

² *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

³ *Zhezkazgan University named after O.A. Baikonurov, Zhezkazgan, Kazakhstan*

Characterization of kaolin-containing clay from the Kara-Keche deposit and evaluation of its suitability as an active mineral additive for cement composites

Abstract. The kaolin-containing clay of the Kara-Keche deposit has been studied as a potential raw material for obtaining an active mineral additive to cement compositions. The assessment of the raw material base of kaolin clays of the Kyrgyz Republic was carried out, and the composition and structural features of the studied material were investigated. Methods of X-ray fluorescence, X-ray phase and electron microscopic analysis were used to evaluate the characteristics of clay. It was found that the clay contains kaolinite 45-55%, illite 15-20% and quartz 25-30%. The clay was thermally activated at 550-700 °C with a heating rate of 100C/min and held for 3 hours, after which it was ground for 2-3 minutes in a rotary impact mill and 5, 10, 15% cement was introduced instead. It has been found that the best strength results are achieved by thermal activation of 700 °C clay, but the optimal amount of clay in the cement composition depends on the age of the samples. In the early stages of hardening, 3-7 days, when 15% clay is applied, the strength of cement compositions increases by 74.3 and 35.6% compared to the control cement. For 28 and 90 daily samples, the optimal amount was 5%, where the increase in strength is +28.1 and +9.8%, respectively. The data obtained indicate the possibility of using clay from the Kara-Keche deposit as a mineral additive in the development of cement compositions

Keywords: kaolin-containing clay, Kara-Keche deposit, thermal activation, active mineral additive, pozzolan activity, cement compositions

References

1. Sabir, B.; Wild, S.; Bai, J. *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review*. Cem. Concr. Compos. 2001, 23, 441–454.
2. Sperinck, S.; Raiteri, P.; Marks, N.; Wright, K. *Dehydroxylation of kaolinite to metakaolin - a molecular dynamics study*. Journal of Materials Chemistry. 2011. Vol. 21. PP. 2118–2125. <https://doi.org/10.1039/C0JM01748E>
3. Overmann, S.; Vollpracht, A.; Matschei, T. *Reactivity of Calcined Clays as SCM-A Review*. Materials. 2024, 17, 312. <https://doi.org/10.3390/ma17020312>
4. Dvorkin, L. I., Zhitkovskiy, V. V., Dvorkin, O. L., Razumovskiy, A. R. *Metakaolin - effektivnaya mineralnaya dobavka dlya betonov*. Tekhnologii betonov. 2015. № 9-10(110-111). S. 21-24. EDN UYFAZF.
5. Rakhimov, R. Z., Rakhimova, N. R., Stoyanov, O. V. *Glinistye putstsolany. Chast 1. Obzor*. Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2016. T.19, №1.
6. Dhandapani Y. et al. *Fresh properties of concrete containing calcined clays: a review by RILEM TC 282-CCL*. Materials and Structures. 2022. Vol. 55. Art. 151. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01971-3>
7. Meng D., Djobo J.N.Y., Segura I.P., Kaze R.C., Kuenzel C., Ranjbar N. *Clay activation: A review*. Materials Today. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.11.024>
9. Ghazy M.F., Maaty E.S.A., Elaty M.A., Alrwashdeh A.A. *A comprehensive review of limestone calcined clay cement (LC3): Environmental and properties benefits, challenges, opportunities, and future directions*. Results in Engineering. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108319>
10. Pinheiro V.D., Abreu R.F.d., Alexandre J., Xavier G.d.C., Marvila M.T., de Azevedo A.R.G. *Pozzolanic Potential of Calcined Clays at Medium Temperature as Supplementary Cementitious Material*. Sustainability. 2024. Vol. 16. Art. 7508. <https://doi.org/10.3390/su16177508>
11. Keppert M., Pommer V., Šádková K. et al. *Thermal activation of illitic-kaolinitic mixed clays*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2024. Vol. 149. P. 10533–10544. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13342-x>
12. da Silva M.R.C., Andrade Neto J.S., Walkley B. et al. *Effects of kaolinite and montmorillonite calcined clays on the sulfate balance, early hydration, and artificial pore solution of limestone calcined clay cements (LC3)*. Materials and Structures. 2024. Vol. 57. Art. 187. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02462-3>
13. Dhandapani Y., Subramanian K.K., Kanavaris F., Black L., Bernal S.A. *The meta-kaolinite content of the calcined clay source impacts the mechanical and durability performance of blended Portland concrete*. Cement and Concrete Research. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107922>
14. Rehman M.U., MacLeod A.J.N., Aldridge L. et al. *Differences in hydration kinetics and phase development of Australian bentonite and kaolinite based limestone calcined clay cements*. Materials and Structures. 2025. Vol. 58. Art. 226. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02743-5>
15. Flegar Pregernik M., Serdar M. *Long-Term Hydration Study of Blended Cement: Calcined Kaolinite-Illite Composite Clays Compared to Fly Ash*. Materials. 2025. Vol. 18. Art. 5123. <https://doi.org/10.3390/ma18225123>

16. Blouch N., Kazmi S.N.H., Akram N., Saleem M.J., Khan I.A., Javed K., Ahmad S., Khan A. *Performance Evaluation of Low-Grade Clay Minerals in LC3-Based Cementitious Composites*. Solids. 2025. Vol. 6. Art. 35. <https://doi.org/10.3390/solids6030035>
17. Bakera, A.T.; Alexander, M.G. *Use of metakaolin as supplementary cementitious material in concrete, with focus on durability properties*. RILEM Tech. Lett. 2019, 4, 89–102.
18. Thankam, G.L.; Renganathan, N.T. *Ideal supplementary cementing material-Metakaolin: A review*. Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 2020, 11, 58–65.
19. Borkoev, B.M. *Osobennosti fazovogo sostava i strukturno-fazovye prevrashcheniya pri obzhige keramicheskogo syrya Kyrgyzskoy Respubliki*. Vestnik KGUSTA, 2016, №2(52), s.139-144.
20. Dzhenchuraev, D.D., Dzhenchuraeva, A.V. *Georesursy nemetallorudnogo syrya Tyan-Shanya i ikh ratsionalnoe ispolzovanie*. Izdatelstvo KRSU, Bishkek, 2021 g., 370 str., UDK: 553.6 (235.216), ISBN: 978-9967-19-809-8-11.4.
21. Hanein, T., Thienel, K.C., Zunino, F. et al. *Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL*. Mater Struct 55, 3 (2022). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-0>
22. Maymekov, Z.K. i dr. *Fiziko-khimicheskie i termodinamicheskie kharakteristiki kaolinovoy gliny Choko-Bulakskogo mestorozhdeniya pri razlichnykh temperaturakh ee destruktzii*. Izvestiya NAN KR, 2023, №7, s.32-38.

Сведения об авторах:

Джусупова М. А. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство, эксплуатация строительных материалов и конструкций» Кыргызского государственного технического университета им.И.Раззакова, проспект Чынгыза Айтматова, 66, 720044, Бишкек, Кыргызстан

Қожахмет М. С. – Старший преподаватель Евразийского Национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева 2, 010008, Астана, Казахстан

Кульшикова С.Т. – автор для корреспонденции, доктор PhD, зав.кафедрой «Технологические машины и строительство» Жезказганского университета имени О.А. Байконурова, пр.Алашахана 1Б, 100600, Жезказган, Казахстан

Dzhusupova M. A. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department "Production, Operation of Building Materials and Structures" of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, 66 Chyngyz Aitmatov Avenue, 720044, Bishkek, Kyrgyzstan

Kozhakhmet M. S. – Senior Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev St., 010008, Astana, Kazakhstan

Kulshikova S. T. – corresponding author, PhD, Head of the Department of Technological Machines and Construction at the O.A. Baikonurov Zhezkazgan University, 1B Alashakhan Ave., 100600, Zhezkazgan, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license



Обзорная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-41-52>

Анализ деформационных параметров оснований методом штамповых испытаний грунтов в условиях промышленного строительства

А.С. Мукашева , **А.Ж. Жусупбеков** , **Г.А. Жаирбаева** ,
Г.Т.Тлеуленова* 

Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

E mail: gulshattleulnova7@gmail.com, astana-geostroi@mail.ru, gulnaz.W@mail.ru, almagul_m75@mail.ru

Аннотация. В статье представлен обзор существующих типов грунтов и выполнен сравнительный анализ диапазонов модуля деформации различных дисперсных грунтов, определённых методом штамповых испытаний. Полевые исследования проведены на промышленной площадке с выполнением плановой и высотной привязки устьев скважин и точек испытаний. Всего выполнено 37 испытаний в соответствии с требованиями действующих нормативных документов и стандартов инженерно-геологических изысканий. На основании поэтапного нагружения построены графики зависимости осадки от давления $S = f(p)$, что позволило определить модули деформации грунтов основания и оценить их деформационные свойства. В работе учтены инженерно-геологические и гидрогеологические условия участка, включая послойное строение грунтов, физико-механические характеристики и уровень грунтовых вод. Особое внимание уделено преимуществам штампового метода, обеспечивающего определение характеристик грунтов в естественных условиях залегания при минимальном нарушении их структуры. Полученные результаты подтверждают эффективность применения штамповых испытаний для повышения точности расчётов осадок, оптимизации проектных решений и обеспечения надёжности промышленных зданий и сооружений. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных данных при проектировании оснований и фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях.

Ключевые слова: деформации грунта, испытания штампом, осадка, прочность на сдвиг, модуль упругости.

Введение

Штамповые испытания широко используются в промышленном строительстве для оценки параметров деформации, таких как осадка, смещение и зависимость напряжения от деформации, в различных материалах и конструкциях. Эти испытания особенно полезны для оценки механических свойств материалов при различных условиях нагружения. За прошедшие годы было разработано несколько методов тестирования параметров, определяющих деформации, которые направлены на повышение точности и эффективности этих оценок. В данной статье представлен сравнительный анализ различных методов тестирования, используемых в сочетании с тестами на штамповку, с акцентом на их принципы, области применения, преимущества и ограничения. Анализ основан на результатах различных научных исследований, что позволяет получить всестороннее представление о текущем состоянии техники в этой области.

Основными параметрами деформации, оцененными с использованием метода штамповых испытаний грунтовых оснований являются: осадка, прочность на сдвиг и модуль упругости. Метод испытания штампом, также известный как испытание на нагрузку на пластину, широко используется на строительных участках для оценки деформационных свойств грунтовых оснований. Этот метод заключается в приложении нагрузки к пластине, помещенной на поверхность грунта и измерении возникающих осадок. Оценка ключевых параметров деформации грунтовых оснований имеет решающее значение для понимания осадки, прочности на сдвиг и модуля упругости, особенно при использовании метода штампового испытания. Эта техника испытаний на месте играет важную роль в определении характеристик деформации грунта, что необходимо для проектирования фундаментов прогнозирования поведения грунта под действием нагрузки и обеспечения целостности конструкции. Существует несколько основных оцениваемых параметров деформации: модуль объемной упругости K , модуль сдвига G , одометрический модуль E_{oed} и модуль упругости (модуль деформации) E . Модуль K связан с сжимаемостью грунта. Этот параметр имеет решающее значение для оценки потенциальной осадки грунтовых оснований, поскольку он напрямую влияет на то, как грунт будет деформироваться под нагрузкой [1]. Модуль K наряду с модулем G дает представление о прочности грунта на сдвиг, что является важным фактором в геотехническом проектировании фундаментов [3], [9]. Модуль G указывает на сопротивление грунта сдвиговому напряжению, что необходимо для прогнозирования поведения грунта в различных условиях нагрузки. Кроме того, важную роль в понимании упругого поведения грунта под нагрузкой играет модуль E_{oed} . Этот параметр особенно важен для оценки модуля упругости E , который измеряет способность материала упруго деформироваться под воздействием силы [2]. Модуль упругости является ключевым фактором в анализе осадки, поскольку он напрямую связан с расчетами осадки. Модуль деформации отражает поведение грунта под давлением и имеет важное значение для понимания как мгновенной, так и конечной осадки [5]. Испытание нагрузкой на пластину *in-situ*, которое часто используется в сочетании с методом испытания штампом, предоставляет ценные данные о модуле деформации и его нелинейных свойствах, что позволяет более точно оценить поведение грунта [1]. Таким образом, интеграция модуля K , модуля G , модуля E_{oed} и модуля деформации E обеспечивает всестороннее понимание

поведения грунта под нагрузкой, имеет решающее значение для эффективного анализа осадки. Метод штампового испытания, наряду с другими методами испытаний на месте, облегчает точное измерение этих параметров деформации, что в конечном итоге способствует более безопасной и надёжной практике геотехнического проектирования [8].

В ряде научных исследований штамповое испытание рассматривается как один из базовых методов полевых исследований, предназначенных для определения деформационных характеристик грунтовых оснований. Метод основан на установке жёсткой пластины (штампа) на поверхность или в забое выработки с последующим поэтапным приложением контролируемой нагрузки и регистрацией соответствующих осадок. В результате формируется зависимость «нагрузка-осадка», которая позволяет оценить напряжённо-деформированное поведение грунта в естественных условиях залегания. В исследовании, данный метод обеспечивает получение информативных параметров, используемых при расчёте оснований по деформациям и несущей способности.

В научных источниках отмечается, что испытания могут проводиться в статическом и динамическом режимах нагружения. Статические штамповые испытания считаются более точными при определении модуля деформации, поскольку обеспечивают поэтапное приложение нагрузки с выдержкой ступеней до стабилизации осадки. Динамические методы характеризуются большей оперативностью и применяются преимущественно для экспресс-оценок состояния основания и установления корреляционных зависимостей между динамическими и статическими модулями [1], [8]. При этом на результаты испытаний существенно влияют геометрические параметры штампа (диаметр, форма), глубина заложения, а также реологические особенности грунта. Анализ существующей научной литературы показывает, что ключевыми параметрами, определяемыми по результатам штампового испытания, являются осадка, модуль деформации (модуль упругости) и косвенно — прочность на сдвиг. Осадка представляет собой вертикальное перемещение поверхности грунта под действием внешней нагрузки и служит основой для прогнозирования общей и дифференциальной осадки сооружений [2]. На основании предельных значений осадки определяется допустимая несущая способность основания. Для повышения достоверности расчетов результаты штамповых испытаний часто сопоставляются с данными лабораторных одометрических и трёхосных испытаний [3].

В ряде исследований подчёркивается возможность косвенной оценки прочности грунта на сдвиг по характеру кривой «нагрузка-осадка». Несмотря на то что метод ориентирован преимущественно на анализ вертикальных деформаций, параметры прочности могут быть определены через интерпретацию предельного состояния основания и сопоставление с теоретическими моделями несущей способности [4], [5]. Для уточнения этих характеристик штамповые испытания нередко комбинируются с другими полевыми методами, например испытанием срезом лопаткой, что позволяет получить более комплексную оценку механического поведения грунтового массива [4]. Особое внимание в исследованиях уделяется определению модуля деформации, который является одним из основных расчётных параметров при проектировании фундаментов. Модуль деформации определяется по начальному или текущему наклону кривой «нагрузка-

осадка». Однако вследствие нелинейного характера поведения грунтов в области напряжений-деформаций для интерпретации результатов нередко применяются гиперболические и эмпирические модели [10]. Разработка корреляционных зависимостей между статическим и динамическим модулями также является предметом активных исследований [1].

В работе [6] исследовано, что на величину деформационных параметров существенно влияют тип и физико-механические свойства грунта. Исследованы песчаные грунты, как правило, характеризуются более высокими значениями модуля деформации и прочности на сдвиг по сравнению с глинистыми, склонными к значительным осадкам и ползучести. В другом исследовании [2], [7] рассматривается, что существенную роль играют влажность, плотность сложения, гранулометрический состав и структурные особенности грунта. Кроме того, условия нагружения σ величина, скорость приложения нагрузки и история предшествующих нагрузок σ также оказывают заметное влияние на получаемые параметры [1], [7], [8].

Отдельное направление исследований связано с оценкой эффективности мероприятий по укреплению и улучшению грунтов. Например, применение грунтоцементных элементов и других методов армирования приводит к увеличению критических давлений и снижению осадок оснований [9], [10]. Штапловые испытания в таких случаях используются как инструмент контроля качества усиления и количественной оценки изменения деформационных характеристик. Таким образом, анализ научных публикаций свидетельствует о высокой информативности штапкового метода при определении модуля деформации и оценке поведения грунтовых оснований. Комплексное применение штапловых испытаний в сочетании с лабораторными методами и современными моделями интерпретации позволяет повысить достоверность расчётных параметров и обеспечить надёжность проектных решений в области промышленного и гражданского строительства [11], [13].

Сравнение методов определения модулей деформации по результатам полевых и лабораторных исследований показывает, что испытание штапом широко применяется в инженерной практике и часто используется в сочетании с одометрическими и трёхосными испытаниями для проверки и уточнения параметров деформации грунтов [12].

Также штапковое испытание обеспечивает измерения на месте, лабораторные испытания предлагают более контролируемые условия для оценки поведения грунта. Однако результаты лабораторных испытаний не всегда совпадают с измерениями на месте из-за различий в условиях нагрузки и возмущения грунта во время отбора проб [3]. Полевые исследования выполнены на территории Северной промышленной зоны Республики Казахстан, где на момент проведения работ участок не был застроен. Рельеф площадки характеризуется равнинным типом с незначительными уклонами и локальными понижениями, обусловленными, по-видимому, эрозионными процессами и техногенным воздействием. Гидрографическая сеть слабо развита.

Таким образом, геоморфологические, гидрогеологические и техногенные особенности участка следует учитывать при выборе и проектировании фундаментов, особенно в контексте оценки деформационных характеристик грунтов основания. На данном объекте

была проведена плановая и высотная привязка устьев скважин и точек испытаний грунта штампами в количестве 37 точек.

Методология

Испытания грунта штампом проводились в соответствии с целью определения деформационных характеристик дисперсных грунтов, в частности модуля деформации E минеральных, органоминеральных и органических грунтов. Метод основан на измерении осадки штампа при ступенчатом нагружении основания. Подготовка к испытаниям осуществлялась перед проведением испытаний: на месте отбора были пробурены опытные скважины диаметром не менее 325 мм. Бурение производилось с обсадкой трубами до забоя, за исключением устойчивых к обрушению грунтов выше уровня грунтовых вод, где допускалось бурение без обсадной колонны.

Минимальная толщина однородного слоя испытуемого грунта составляла не менее двух диаметров штампа, что обеспечивает корректность измерений. На отметке проведения испытания отбирались образцы для лабораторного анализа. В лабораторных условиях определялись следующие физико-механические характеристики в зависимости от типа грунта:

- гранулометрический состав;
- влажность, плотность грунта и плотность частиц;
- влажность на границах раскатывания и текучести, число пластичности и показатель текучести;
- плотность сухого грунта, коэффициент пористости, коэффициент водонасыщения [14].

Процедура установки штампа и нагружения предусматривает, что штамп устанавливается на дне выработки с обязательной проверкой его горизонтальности. Для плотного контакта подошвы штампа с основанием выполнялось не менее двух поворотов штампа вокруг его вертикальной оси в противоположные стороны. В глинистых грунтах с показателем текучести $I_L > 0.75$ установка осуществлялась в специально выровненную выемку глубиной 40–60 см [15]. Поперечный размер выемки не превышал диаметр штампа более чем на 10 см. При необходимости стены выемки закреплялись. Нагружение осуществлялось с использованием домкрата или тарированного груза. Домкраты проходили предварительную тарировку, погрешность измерения нагрузки не превышала 5% от заданной степени давления. Условия опыта:

1. глубина испытания – 4 м;
2. вид грунта – песок;
3. схема нагружения – нагрузка;
4. степень нагрузки – кпа-50;
5. тип штампа – шв60-600;
6. площадь штампа – 600 см кв;
7. диаметр трубы – 127.00 мм;
8. технические условия стабилизации – 120 мин.

Режим нагружения, нагрузка на штамп увеличивалась степенями давления в

соответствии с таблицами «Ступени давления и время условной стабилизации деформации» для соответствующего типа грунта (глинистые, просадочные, органо-минеральные и органические). Время удержания каждой ступени определялось по достижении условной стабилизации, то есть когда осадка за последний час составляла не более 0.02 мм. При необходимости выдержка продлевалась, но не более 6 часов для глинистых и до 12 часов — для органо-минеральных и органических грунтов. После завершения цикла нагружения проводилось разгружение штампа с фиксацией величины обратимой деформации (отскока), необходимой для расчёта модуля деформации. Характеристики определились по результатам нагружения грунта вертикальной нагрузкой в забое горной выработки или в массиве грунта с помощью штампа. Результаты испытаний оформлялись в виде графиков зависимости осадки штампа от нагрузки.

Погружение винтового штампа производилось завинчиванием механически ниже забоя скважины. При испытаниях в скважинах глубина завинчивания винтового штампа ниже забоя скважины составляла 50 см для глинистых грунтов с $I_L > 0.75$ и водонасыщенных песков и 30 см для остальных грунтов.

В процессе завинчивания винтового штампа обеспечивается синхронность его вращения с погружением. Глубина погружения за один оборот соответствует шагу винтовой лопасти. После установки штампа монтируют устройство для нагружения штампа, анкерное устройство и измерительную систему. Внешний вид установки представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Проведение испытаний грунта штампами на площадке

Штамп имеет диаметр 277 мм и площадь опорной поверхности 600 см², что соответствует требованиям нормативной документации. Испытания проводились в опытной скважине диаметром 325 мм, обеспечивающей необходимый зазор и стабильность размещения оборудования.

Шаг винтовой лопасти составляет 50 мм. Система нагружения была реализована с использованием пневматического механизма, обеспечивающего плавное и контролируемое увеличение давления. Для фиксации осадки применялись высокоточные датчики перемещений с минимальной дискретностью измерения 0.01 мм. Контроль давления осуществлялся с использованием манометра класса точности 0.4, позволяющего регистрировать значения до 1600 кПа. Максимальное давление, создаваемое на грунт в ходе испытаний, составляло 1.0 МПа.

Испытания штампом были запланированы для всех инженерно-геологических элементов (ИГЭ) сжимаемой толщи, в котором указано, что в пределах сжимаемой толщи оснований зданий и сооружений полевые испытания следует проводить штампами площадью 600 см² либо в забое скважин, либо с использованием винтовой лопасти в массиве грунта.

Количество штамповых испытаний для каждого характерного ИГЭ составляло не менее трёх либо двух, если расхождения определяемых показателей не превышало 25% от среднего значения. По итогам полевых испытаний проводилось уточнение величин модуля деформации грунтов, предварительно определённых лабораторными методами.

Результаты и обсуждения

В исследовании было проведено 4 испытаний. По данным испытаний был построен график зависимости осадки штампа от давления $S=f(p)$. Модуль деформации вычислялся в диапазоне давлений. За начальное значение было принято давление, равное вертикальному эффективному напряжению от собственного веса грунта на отметке испытания и соответствующая осадка, за конечные значения, соответствующие четвертой точке графика на прямолинейном участке.

Таблица 1. Результаты расчета

№	Расчетные значения параметров	Δs , мм	Δp , МПа	E , МПа
1	Нагрузка	0.68	0.20	40.50
2	Разгрузка	-	-	-
3	Нагрузка повтор	-	-	-
4	Нагрузка повтор	-	-	-

Если при давлении приращение осадки будет вдвое больше, чем для предыдущей ступени давления, а при последующей ступени давления приращение осадки будет равно или больше приращения осадки.

При этом число точек в рассматриваемом диапазоне было 37. В противном случае при испытании грунта необходимо применять меньшие ступени давления. Основное уравнение для вычисления K_p модуля деформации представлено

выражением [8]:

$$K_p = \frac{h}{D}, \quad (1)$$

где: h – глубина расположения штампа относительно дневной поверхности грунта;
 D – диаметр штампа.

K_p принимают равным 1, при испытаниях грунтов штампами в котлованах, шурфах независимо от h/D . При испытаниях грунтов винтовым штампом в буровых скважинах ниже забоя принимают коэффициент K_p . Для выполнения расчетов принято $K_p=1$. Результаты расчетов представлены в таблице 1. По результатам испытаний был построен график зависимости осадки от давления (Рисунок 2), на основании которых определялся модуль деформации E в соответствии с формулами, приведёнными в ГОСТ 20276–2012 (таблица 2). Значения E учитывались при проектировании фундаментов и оценке пригодности основания.

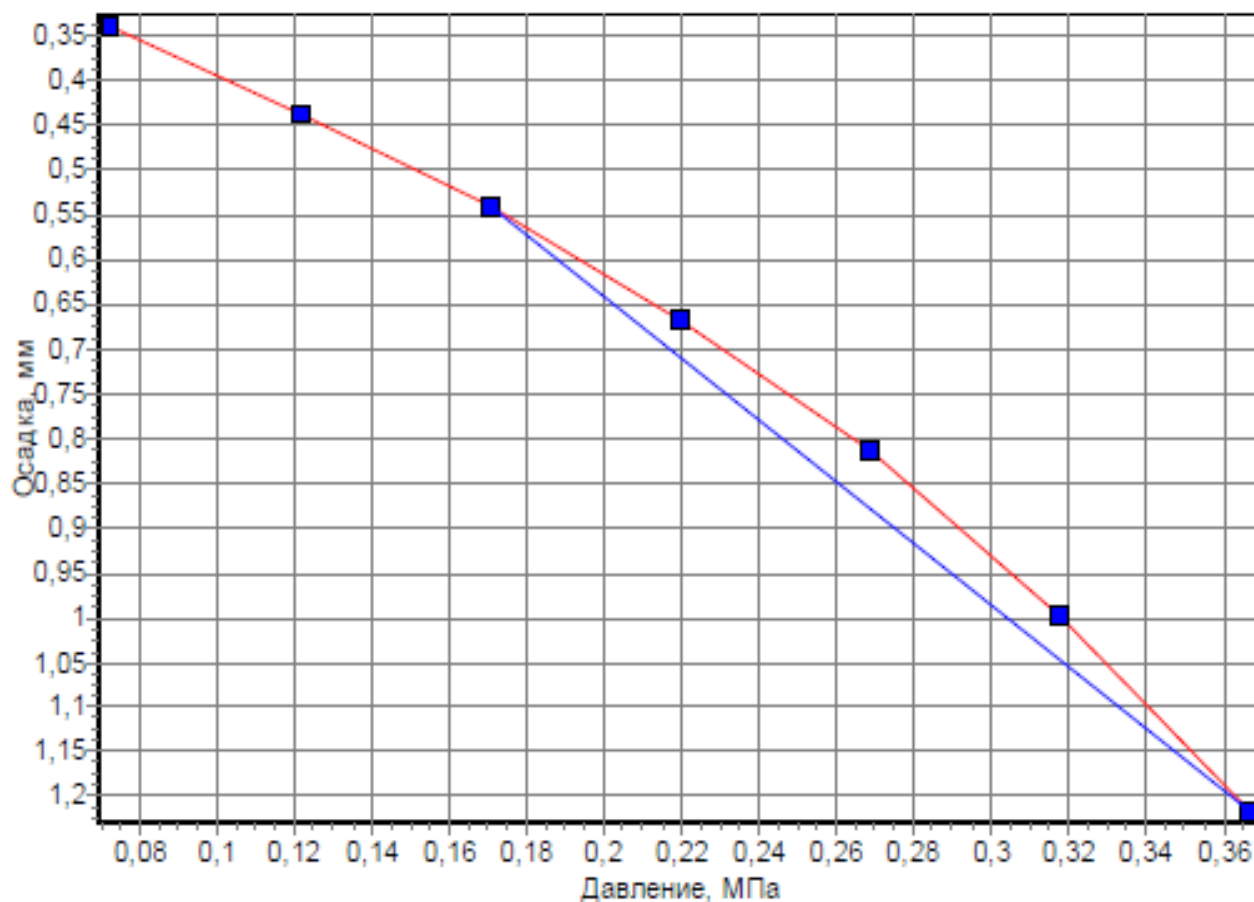


Рисунок 2. График штампового опыта ИГЭ 2 пески пылеватые аQII-III

Методом штамповых испытаний были определены модули деформации пылеватых песков и суглинков, которые соответственно были в диапазоне от 22.40 МПа до 45.53 МПа, среднее значение 53.60 МПа и от 15.10 МПа до 25.60 МПа, среднее значение 20.16 МПа. В

сравнении результатов песка и суглинка с лабораторными исследованиями погрешность составляет не более 5%.

Таблица 2. Результаты проведенных испытаний в виде определенных модулей деформации E грунтов основания

№	ИГЭ	Описание грунта	Номера испытаний	E, МПа	Среднее значение E
1	2	ИГЭ 2. Пески пылеватые аQII-III	1, 4, 7, 13, 17, 23, 31, 33, 35	40,50; 40,50; 40,50; 22,40; 22,40; 31,90; 41,70; 39,77; 45,53; 37,37	53, 60
2	3	ИГЭ 3. Суглинки N1-2pv	2, 5, 8, 11, 15, 20, 22, 28, 39	25,60; 15,40; 24,54; 15,10; 24,53	20, 16

Заключение

В результате выполненных штамповых испытаний, получены достоверные значения модулей деформации дисперсных грунтов основания. Всего выполнено 37 испытаний, по результатам которых построены зависимости осадки штампа от давления $S = f(p)$ и определены значения модуля деформации E в заданном диапазоне напряжений с учётом коэффициента условий испытания $K_p = 1$, в данном случае модуля деформации (E) минеральных, органоминеральных и органических грунтов.

Таким образом, для песков модуль больше чем для суглинков, так как пески меньше сжимаемые грунты. Установлено, что модули деформации пылеватых песков изменяются в пределах 22.40–45.53 МПа, тогда как для суглинков они составляют 15, 10, 25, 60 МПа. Полученные результаты подтверждают, что песчаные грунты характеризуются большей жёсткостью и меньшей сжимаемостью по сравнению с суглинистыми, что обусловлено их структурно-текстурными особенностями.

Сопоставление полевых данных с результатами лабораторных исследований показало расхождение не более 5%, что свидетельствует о высокой достоверности полученных параметров. Полученные значения модулей деформации были использованы при проектировании фундаментов и позволили уточнить расчётные осадки, обеспечив повышение надёжности и обоснованности проектных решений.

Благодарность

Данное исследование финансируется АО «Фонд науки» Республики Казахстан (грант № DP25997309 «Разработка геоинформационной базы данных искусственного интеллекта для оптимизации оснований и фундаментов при строительстве в Казахстане»).

Вклад авторов

Мукашева А.С. — постановка научной задачи, сбор и анализ теоретических данных, написание основного текста статьи, формирование выводов и научных рекомендаций, координация совместной работы авторского коллектива.

Жусупбеков А.Ж. — участие в разработке концепции исследования, оценка деформационных параметров основания грунта, редактирование текста статьи, формирование научной интерпретации результатов.

Жаирбаева Г.А. — сбор и систематизация данных по модулю деформации групп оснований.

Тлеуленова Г.Т. — подготовка графических материалов (схем), участие в анализе распределения нагрузок, участие в обсуждении результатов, обеспечение корректности формулировок и научного стиля.

Список литературы

1. Experimental study of the modulus of deformation determined by static and dynamic plate load tests / S. Lehmann, S. Leppla, A. Norkus // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – 2020 – Vol. 4. – P. 109-124.
2. Determination of the geotechnical parameters of soils behavior for safe future urban development, Najran Area, Saudi Arabia: implications for settlements mitigation / A. K. Abd El Aal, A. Rouaiguia // Geotechnical and Geological Engineering – 2020. – Vol. 1, No. 38. – P. 695-712.
3. Comparison of soil deformation parameters determined by odometer and triaxial tests / Dirgeliene N. // ISEC Press. – 2024. – pp. 1-6.
4. Correlation Analysis of Soil Parameters Derive from Field Tests of Silty Clay Layers / X. Xu // IOS Press. – 2024. – pp.1061–1067. DOI:10.3233/ATDE241098
5. Strength and stiffness characterization of clays using Atterberg limits / S. M. Ahmed, S. S. Agaiby // Transportation Geotechnics. – 2020. DOI:10.1016/j.trgeo.2020.100420
6. Some practical applications of shear wave velocity measurements in dense sand / M. Long / EDP Sciences. – 2024. DOI:10.1051/e3sconf/202454419003
7. Effect of particle size, moisture content and density on the hyperbolic model parameters for non-cohesive soil / G. D. Dhadse, G. Ramtekkar, G. Bhatt // International Journal of Engineering, Transactions. – 2022. – Vol. 9, No. 35. – P. 1699–1706.
8. Determination of unloading—reloading modulus and exponent parameters (m) for hardening soil model of soft soil in Ho Chi Minh City / T. Ngo Duc, P. Vo, T. Tran Thi // Springer. – 2020. – P.677–689. DOI:10.1007/978-981-15-5144-4_65
9. Tray research of the strain state of soil bases reinforced by soil-cement elements under the strip stamp / Y. Vynnykov, R. Razdui, A. Aniskin // Academic journal Industrial Machine Building Civil Engineering. – 2019. – Vol. 53, No 2. – P. 90–97 DOI:10.26906/znp.2019.53.1898
10. Investigation of particularities of the stress-strain state of the sandy basis under loading conditions of rough stamps / G. M Skibin // IOP Publishing. – 2021. DOI:10.1088/1742-6596/1928/1/012065

11. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. Москва: Стандартинформ, 2020. 40с.
12. Practical experience in the construction of roads in difficult soil conditions / A. Tulebekova, A. Zhussupbekov, A. Zhankina, A. Aldungarova, G. Mamurbekova // Journal of Water and Land Development. – 2024. – Vol.60, No. I-III. – pp. 138-148 DOI: 10.24425/jwld.2024.149115

A.S. Mukasheva, A.Zh. Zhussupbekov, G.A. Zhairbayeva, G.T. Tleulenova*

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana

Analysis of deformation parameters of foundations using the method of soil stamp testing in industrial construction conditions

Abstract. This article presents a review of existing soil types and a comparative analysis of the deformation modulus ranges of various dispersed soils determined by the plate load test method. Field investigations were carried out at an industrial site with planimetric and elevation referencing of borehole mouths and testing points. 37 tests were conducted in accordance with standard requirements. Based on step-by-step loading results, settlement pressure curves $S=f(p)$ was plotted, from which the deformation moduli of foundation soils were determined. The study considered the engineering-geological and hydrogeological conditions of the site, including the layered soil profile and the groundwater level. Particular attention was given to the advantages of the plate load test method, which allows the determination of soil parameters under natural in-situ conditions with minimal disturbance of soil structure. It was established that the use of refined deformation modulus values contributes to reducing calculated settlements and improving the reliability of design solutions. The obtained results confirm the practical significance of plate load tests as an effective tool in geotechnical investigations for the design of industrial buildings and structures and justify the need for an integrated interdisciplinary approach.

Keywords: soil deformation, stamp testing, settlement, shear strength, elastic modulus

References

1. Experimental study of the modulus of deformation determined by static and dynamic plate load tests / S. Lehmann, S. Leppla, A. Norkus // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – 2020 – Vol. 4. – P. 109-124.
2. Determination of the geotechnical parameters of soils behavior for safe future urban development, Najran Area, Saudi Arabia: implications for settlements mitigation / A. K. Abd El Aal, A. Rouaiguia // Geotechnical and Geological Engineering – 2020. – Vol. 1, No. 38. – P. 695-712.
3. Comparison of soil deformation parameters determined by odometer and triaxial tests / Dirgeliene N. // ISEC Press. – 2024. – pp. 1-6.
4. Correlation Analysis of Soil Parameters Derive from Field Tests of Silty Clay Layers / X. Xu // IOS Press. – 2024. – pp.1061–1067. DOI:10.3233/ATDE241098
5. Strength and stiffness characterization of clays using Atterberg limits / S. M. Ahmed, S. S. Agaiby // Transportation Geotechnics. – 2020. DOI:10.1016/j.trgeo.2020.100420
6. Some practical applications of shear wave velocity measurements in dense sand / M. Long / EDP Sciences. – 2024. DOI:10.1051/e3sconf/202454419003

7. Effect of particle size, moisture content and density on the hyperbolic model parameters for non-cohesive soil / G. D. Dhadse, G. Ramtekkar, G. Bhatt // International Journal of Engineering, Transactions. – 2022. – Vol. 9, No. 35. – P. 1699–1706.
8. Determination of unloading—reloading modulus and exponent parameters (m) for hardening soil model of soft soil in Ho Chi Minh City / T. Ngo Duc, P. Vo, T. Tran Thi // Springer. – 2020. – P.677–689. DOI:10.1007/978-981-15-5144-4_65
9. Tray research of the strain state of soil bases reinforced by soil-cement elements under the strip stamp / Y. Vynnykov, R. Razdui, A. Aniskin // Academic journal Industrial Machine Building Civil Engineering. – 2019. – Vol. 53, No 2. – P. 90–97 DOI:10.26906/znp.2019.53.1898
10. Investigation of particularities of the stress-strain state of the sandy basis under loading conditions of rough stamps / G. M Skibin // IOP Publishing. – 2021. DOI:10.1088/1742-6596/1928/1/012065
11. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. Москва: Стандартинформ, 2020. 40с.
12. Practical experience in the construction of roads in difficult soil conditions / A. Tulebekova, A. Zhussupbekov, A. Zhankina, A. Aldungarova, G. Mamurbekova // Journal of Water and Land Development. – 2024. – Vol.60, No. I-III. – pp. 138-148 DOI: 10.24425/jwld.2024.149115

Сведения об авторах:

Мукашева А.С. – докторант кафедры «Строительство», ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 010008, Астана, Казахстан

Жусупбеков А.Ж. – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство», ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 010008, Астана, Казахстан

Жаирбаева Г.А. – докторант кафедры «Строительство», ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 010008, Астана, Казахстан

Тлеуленова Г.Т. – автор для корреспонденции, PhD, ассоциированный профессор кафедры «Строительство», ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 010008, Астана, Казахстан

Mukasheva A.S. – PhD student of the Department «Construction», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Kazakhstan

Zhussupbekov A.Zh. - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Construction», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Kazakhstan,

Zhairbayeva G.A. – PhD student of the Department «Construction», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Kazakhstan

Tleulenova G.T. – corresponding author, PhD, Associate Professor of the Department «Construction», L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010008, Astana, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Обзорная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-53-64>

Технологическое обеспечение качества строительных процессов и системный контроль параметров строительства

Г.А. Баймаханов¹ , А.М. Иисова^{2,3} , Д.Д. Каражанова^{*1,2,3} 

¹ *Satbayev University, Алматы, Казахстан*

² *Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан*

³ *Казахская головная архитектурно-строительная академия, Алматы, Казахстан*

*E mail: g.baimakhanov@satbayev.university, d.karazhanova@kazgasa.kz,
a.iisova@kazgasa.kz*

Аннотация. В статье рассматриваются инженерно-технологические подходы к обеспечению и контролю качества в строительной отрасли. Основное внимание уделено интеграции методов управления качеством в технологические процессы строительства, включая контроль параметров выполнения работ, анализ дефектов и обеспечение соответствия проектной документации и нормативным требованиям. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и долговечности строительных объектов за счет внедрения системного контроля качества на всех этапах жизненного цикла — от проектирования до сдачи объекта в эксплуатацию. Целью работы является разработка подхода к обеспечению качества строительной продукции на основе совмещения принципов систем менеджмента качества с инженерными методами контроля и анализа технологических процессов. Научная новизна заключается в рассмотрении системы качества как элемента технологической системы строительства, обеспечивающего управление параметрами процессов и снижение вероятности дефектов. Практическая значимость состоит в возможности применения предложенных подходов для повышения эффективности строительных работ, снижения производственных рисков и обеспечения стабильного качества возводимых объектов. Предложенные решения способствуют оптимизации строительного контроля, повышению безопасности объектов и совершенствованию управления качеством строительного производства в современных инженерно-технологических условиях эксплуатации.

Ключевые слова: строительная отрасль, технологические процессы, качество строительства, контроль параметров, дефекты строительства, инженерный контроль, строительные технологии.

Ведение

Качество строительной продукции является ключевым параметром, определяющим надежность, безопасность и долговечность зданий и сооружений. В современных условиях обеспечение качества в укладывает рамки организационного управления и рассматривается как результат корректного функционирования технологических процессов строительства.

Основное влияние на качество оказывает параметры выполнения работ: точность геометрии, соблюдение технологических режимов, характеристики применяемых материалов и согласованность этапов строительного процесса. Нарушение этих параметров приводит к возникновению дефектов, увеличению затрат и снижению эксплуатационных характеристик объектов. В этой связи система менеджмента качества рассматривается не только как управленческий инструмент, но и как часть инженерной системы, обеспечивающей контроль и регулирование технологических процессов. Реализация качества в строительстве основывается на последовательном выполнении этапов:

- установление требований к параметрам качества;
- контроль выполнения технологических ;
- анализ отклонений и дефектов;
- корректировка процессов.

В качестве инструментов контроля применяются методы инженерного анализа, включая мониторинг параметров процессов, статистическую обработку результатов, анализ причин дефектов, использование контрольных карт, диаграмм Парето и методов оценки затрат на качество [1]. Система управления качеством в строительстве формирует единую структуру, объединяющую производство работ и контроль их результатов. Ее основная задача заключается в обеспечении соответствия выполняемых работ проектной документации, нормативным требованиям и заданным эксплуатационным характеристикам объекта.

Таблица 1. Ключевые компоненты управления качеством

Система менеджмента качества	Политика и цели в области качества	Планирование качества	Обеспечение качества	Улучшение качества
Структурированная система решений, процессов и процедур для управления проектом и обеспечения соответствия работ требованиям.	Разработка и утверждение политики и целей, которые определяют стандарты качества для конкретного проекта.	Определение требований к качеству, стандартам и процедурам на протяжении всего проекта.	Процессы, которые помогают гарантировать соответствие установленным стандартам качества.	Постоянный процесс поиска и внедрения улучшений для оптимизации процессов и снижения количества дефектов.

С инженерной точки зрения обеспечение качества в строительстве целесообразно рассматривать как задачу управления отклонениями технологических параметров. Каждый строительный процесс характеризуется набором допустимых значений (допусков), выход за пределы которых приводит к формированию дефектов. В этой связи предлагается подход, основанный на идентификации критических параметров процессов

и их систематическом контроле с использованием методов статистического анализа и мониторинга. Это позволяет перейти от постфактум контроля качества и предупреждению дефектов за счет стабилизации технологических режимов выполнения работ.

В Казахстане при введении систем управления качеством в сфере строительства применяют стандарт СТ РК ISO 9001-2016 «Системы управления качеством. Требования». Этот национальный стандарт строится на общих принципах ISO 9001. Он полностью учитывает специфику строительной отрасли. Используемый стандарт применим ко всем организациям, задействованным в строительной сфере.

Если внедрить международные стандарты ISO, у компании появятся следующие привилегии: компания получит официальный сертификат, что соответственно улучшит качество стройматериалов и работ на объектах; количество несчастных случаев на производстве снизится; шансы выиграть тендеры вырастут, увеличатся инвесторы; репутация компании окрепнет; компания сможет выйти на зарубежные рынки.

Методология

При внедрении на предприятии принципов управления качеством производитель обязан учитывать все правила для процессов, что влияют на качество продукции или услуги. В разработке нужно следовать требованиям стандарта. Компания может взять одну готовую систему, применить несколько или создать интегрированную. [2].

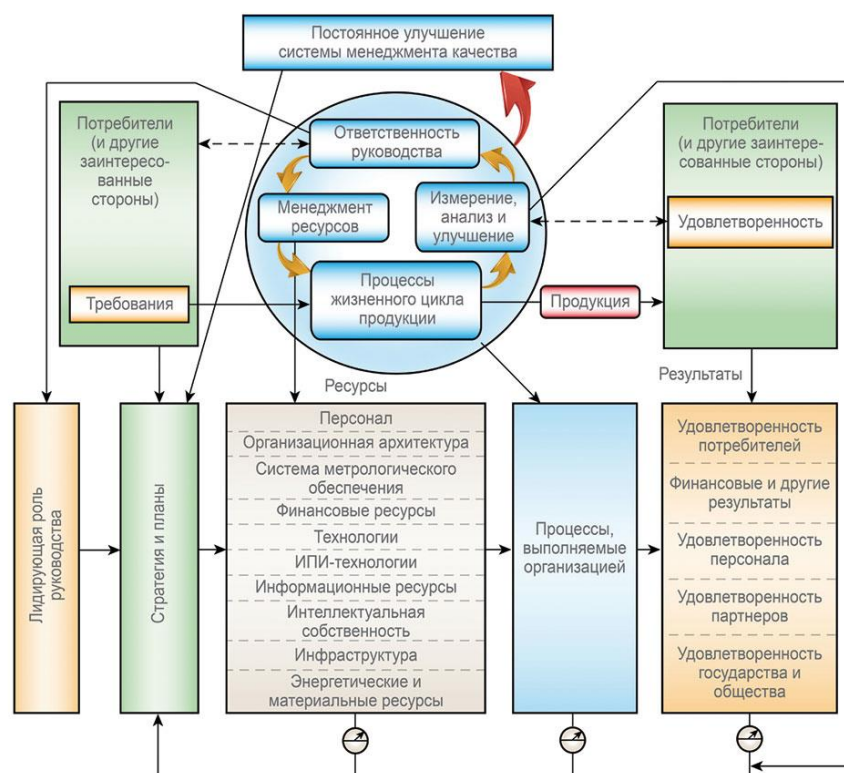


Рисунок 1. Модель системы менеджмента качества

Среди бизнеса популярны ISO 9001, ISO 14001, ISO 22000 и OHSAS 18001. Выбор системы зависит от целей, которых хочет достичь владелец через её работу. Принципы работы каждого стандарта меняются в зависимости от специфики и отрасли предприятия. Но все они строятся на нормах базового стандарта качества ISO 9001. Основная схема работы СМК представлена на рисунке 1. Схематическое изображение любого процесса иллюстрирует взаимосвязь элементов процесса. Контрольные точки мониторинга и измерения, необходимые для управления, являются специфическими для каждого процесса и будут варьироваться в зависимости от соответствующих рисков

Результаты и Обсуждение

Процессы, которые затрагивает внедряемая система менеджмента качества, сопровождающие документы.

В разработку СМК и ее внедрение могут включаться: анализ планов будущих работ; разработка системы минимизации рисков, связанных с производственным травматизмом и внешними факторами; проверка качества имеющегося строительного оборудования; внедрение методов, способствующих энерго- и ресурсосбережению; контроль поступающих стройматериалов, деталей и конструкций; контроль всех работ, выполняемых подрядчиками; окончательный контроль на этапе сдачи объекта заказчику; выбор поставщиков и подрядчиков на основании их предварительной оценки; анализ требований заказчиков и их удовлетворенности от выполненных работ.

Организация, функционирующая в строительной отрасли, при внедрении системы менеджмента качества должна обеспечить разработку и поддержание в актуальном состоянии ряда ключевых документов. К ним относятся: оформленное руководство по функционированию СМК, адаптированное к специфике конкретного предприятия; перечень процедур, регламентирующих содержание и функционирование СМК; экземпляры нормативной документации, положения которой имеют прямое отношение к предоставляемым организацией услугам и выполняемым видам работ; проектная документация на все объекты, находящиеся в процессе работы сотрудников; технологические карты; а также различные виды нормативной документации. В эту категорию могут входить строительные нормы и правила, требования и положения, касающиеся пожарной безопасности, исполнительная документация, а также заключенные договора и контракты с заказчиками или подрядными организациями. Эти документы должны содержать информацию о требованиях к качеству выполняемых работ. Кроме того, важной частью внутренней документации организации являются акты о приемке и сдаче выполненных объектов, над которыми работали сотрудники, а также отчеты различной направленности [3].

Внедрение системы менеджмента качества - это не разовый шаг, а непрерывный цикл улучшений. Оно требует вклада от всех работников компании. Система менеджмента качества похожа на живое существо. Ей нужен постоянный контроль, проверка и доработка. Стоит иметь в виду: система менеджмента качества - не самоцель. Она служит средством и инструментом для реализации задач компании. Внедрение должно повышать качество товаров и услуг и помогает работать эффективнее и укрепляет репутацию компании.

В таблице 2 отображены основные этапы внедрения СМК в строительной отрасли и их краткое описание, т.е. представлен ясный обзор всего процесса внедрения системы качества в строительстве. Согласно принципам управления качеством в производстве строительных работ команда выступает качественным лидером, обеспечивает устойчивую

работу коллектива и систему контроля.

Таблица 2. Основные этапы внедрения СМК в строительной отрасли

Этап внедрения СМК	Описание этапа
Подготовительный этап	Определение целей и задач внедрения СМК. Анализ существующего состояния предприятия. Выявление проблемных зон и рисков. Формирование команды по внедрению СМК. Определение полномочий и ответственности команды.
Разработка документации	Разработка политики в области качества. Разработка руководства по СМК; Разработка процедур и инструкций. Разработка форм документации.
Обучение персонала	Обучение принципам и методам работы в соответствии с требованиями СМК. Обучение работе с документацией СМК. Обучение проведению внутренних аудитов СМК.
Внедрение СМК	Практическое применение разработанных документов и процедур. Контроль эффективности внедренных процессов. Внесение корректировок в СМК.
Аудит СМК	Проведение внутренних аудитов СМК. Проведение внешних аудитов СМК. Анализ результатов аудитов. Внесение корректирующих и предупреждающих действий.
Сертификация СМК	Получение сертификата соответствия требованиям международного стандарта ISO 9001. Проведение сертификационного аудита.
Постоянное совершенствование	Анализ полученных результатов. Выявление новых возможностей для улучшения качества продукции и услуг. Адаптация СМК к изменяющимся условиям рынка. Внесение изменений в СМК.

Это позволяет соблюдать технические и временные нормативы при сдаче объектов, а также применять грамотные навыки общения со смежными отделами, клиентами и подрядчиками. Важную роль в управлении качеством в этой отрасли играет имидж команды и имидж самой фирмы. Бостонский институт исследований проблем менеджмента провел анализ строительных фирм. Отчет содержит пятибалльную шкалу,

основанную на опросах для оценки СМК в строительных проектах [4]. В нем были вопросы о применении инструментов качественного управления и норм качества на объектах. Результаты указывают, что показатели качества улучшаются, когда внедрение СМК подкреплено разумной и практичной политикой начальства.

В данном случае внутренняя система качества включает действия, которые дают уверенность в работе организации, а внешняя система качества ведет к мерам по укреплению доверия клиента. Они убеждают, что система поставщика выдаст товар или услугу, подходящие для клиента. Правильное планирование в строительстве подразумевает четкую организацию ресурсов и работ. Оно включает программу работ, план затрат, схему качества проекта, данные о рабочих, материалах и других ресурсах, а также график производства. Поэтому ключевым ориентиром для строителей служит контроль и оценка. Это могут быть процессы измерения соответствия и эффективности. Основным ориентиром и задачей качества в планировании отрасли являются привлечение нужных участников (консультанты, субподрядчики и поставщики). При выполнении плана надо учитывать затраты и усилия, внесения правок в документации. Для разработки рабочего плана необходима компетентная команда, а также учет нужды заказчика. Строительство – это сложный процесс с участием множества фирм для одного проекта, где успех зависит от исполнителей, консультантов и клиентов.

Таким образом, подрядчики служат мостом между государственным и промышленным секторами экономики. Они выступают основным публичным лицом строительной отрасли и их действия, политика, процессы и методы напрямую влияют на всех участников отрасли. Организованные процессы в строительной отрасли повышают эффективность работы подрядчиков, что приносит пользу всей индустрии. Контроль и оценка качества играет ключевую роль в достижении нужного уровня производительности на стройке, в том числе подрядчику помогают создавать стратегии для улучшения качества работ. При работе с заказчиком подрядчик должен обеспечивать надежность продукта или услуги, должны учитываться компетентность, честность и быстрая работа персонала и поддержки. Все эти параметры и соблюдение норм меняет подход к бизнесу и приоритет отдается режиму работы, а не быстрой выгоде.

Система менеджмента качества активно используется в строительстве как на уровне компании или отдельного проекта в целом. Важную роль в строительстве играет контроль качества для сохранения нужного уровня работ по возведению и отделке здания. Это помогает удовлетворить заказчика, растёт сила компании на рынке и шансы на успех бизнеса. Система охватывает не только главного исполнителя, она включает всех подрядчиков и субподрядчиков в проекте [5].

СМК представляет собой структурированную систему решений, процессов и процедур, предназначенную для управления проектом и обеспечения соответствия работ положениям технических и проектных документов, требованиям заказчика и стандартам качества. На каждом этапе строительства проводится аудит технической документации и отчетных документов, а также контроль работ и используемых материалов.

Методы контроля качества в строительстве. В строительной отрасли применяются разнообразные методы контроля качества, включая визуальный осмотр, испытания материалов и измерение размеров объектов. Для осуществления этих проверок используются специализированные инструменты, такие как геодезические приборы, термометры и электронные уровни. Выбор методов контроля определяется требованиями

конкретного проекта и желаемыми показателями качества строительства.

В процессе оценки качества строительных работ персонал применяют следующие методы [6]:

1. Входной контроль рабочей документации - включает проверку чертежей, таблиц и описаний технологических процессов.

2. Входной контроль материалов, инженерного оборудования и строительной техники - осуществляется для проверки соответствия используемых ресурсов условиям хранения и требованиям проекта. Для оценки качества материалов могут проводиться различные испытания, целью которых является подтверждение их соответствия проектным требованиям и стандартам качества.

3. Контроль технологии выполнения работ - включает соблюдение геометрических параметров зданий и/или отдельных конструкций, проверку и приемку скрытых работ и ответственных конструкций, а также подтверждение соответствия результатов каждого вида строительной работы условиям проектной документации.

4. Экспертиза исполнительной строительной документации - проводится для проверки наличия и правильного оформления всех документов, входящих в состав данной документации.



Рисунок 2. Виды действующего контроля

5. Аудит объемов выполненных работ и оказанных услуг - осуществляется для проверки их стоимости на соответствие договорам между заказчиком и генеральным подрядчиком.

6. Контроль соблюдения подрядными организациями требований органов государственного и авторского надзора - направлен на обеспечение соответствия выполненных работ установленным нормам и стандартам.

Таким образом, комплексный подход к контролю качества в строительстве позволяет обеспечить высокие стандарты и безопасность возводимых объектов.

В строительстве имеется система, направленная на контроль качества, на рисунке 2 приведены виды действующего контроля.

Важность контроля качества в строительстве. Контроль качества в строительстве представляет собой ключевой аспект, обладающий множеством преимуществ [7]. К числу основных из них можно отнести: 1. Своевременное исправление ошибок: На этапе проектирования могут возникать ошибки, способные существенно повлиять на устойчивость конструкций и характеристики будущего здания. Эффективный контроль качества позволяет выявить и устранить такие недочеты на ранних стадиях. 2. Избежание дефектов и дополнительных затрат: Контроль качества способствует минимизации дефектов, что, в свою очередь, предотвращает возникновение дополнительных расходов на исправление ошибок в процессе выполнения строительных работ. 3. Повышение безопасности на строительной площадке: Систематический контроль качества обеспечивает соблюдение стандартов безопасности, что снижает риски несчастных случаев и травматизма на рабочем месте[15]. 4. Улучшение эксплуатационных характеристик готового объекта: Независимо от типа сооружения - будь то жилое здание или инженерное сооружение - контроль качества способствует повышению его эксплуатационных характеристик. 5. Повышение эффективности строительного процесса: Эффективность строительного процесса, в свою очередь, напрямую влияет на качество выполняемых работ. 6. Критерии, по которым можно оценить качество, включают: соответствие выполненных работ требованиям проектной документации; соблюдение сроков выполнения работ; снижение стоимости строительства при сохранении объемов производства; обеспечение безопасности работников и охраны окружающей среды; устойчивость и долговечность объекта.

Заключение

Контроль качества в строительстве является неотъемлемой частью успешной реализации проектов, способствуя не только повышению качества работ, но и обеспечению безопасности и экономической эффективности.

Современные технологии представляют собой эффективное решение для оптимизации контроля за строительством зданий. В частности, применение дронов и специализированного программного обеспечения позволяет осуществлять визуальный мониторинг обширных территорий и проводить детальные обследования высотных конструкций, что способствует быстрому выявлению и устранению дефектов. Кроме того, активно используется система моделирования информации о здании (Building Information Modeling, BIM), которая значительно улучшает процессы планирования, организации и координации строительных работ. Тем не менее, несмотря на многочисленные преимущества технического надзора в строительстве, данный процесс также имеет свои условные недостатки. Например, операционный контроль может привести к увеличению затрат на строительство и потребовать больше времени. Кроме того, в случае возведения уникальных зданий может возникнуть сложность в согласовании требований проекта с установленными стандартами качества, что может вызвать дополнительные

бюрократические трудности в будущем.

Внедрение и поддержание СМК в строительной отрасли является критически важным условием для обеспечения высокого качества, безопасности и надежности строительных проектов. СМК, основанная на принципах ISO, позволяет оптимизировать процессы, снизить затраты на исправление ошибок и улучшить удовлетворенность клиентов. Контроль качества включает проверку материалов и работ на всех этапах, а внедрение СМК требует корректировки документации, оптимизации процессов и вовлечения всего персонала. Это позволяет не только соответствовать законодательным требованиям и стандартам, но и повышать конкурентоспособность, оптимизировать процессы и укреплять репутацию компании на рынке. СМК — это не конечная цель, а непрерывный процесс постоянного улучшения, который позволяет строительной организации достигать устойчивого успеха в долгосрочной перспективе.

Вклад авторов

Баймаханов Г.А. – постановка научной задачи, сбор и анализ теоретических данных, написание основного текста статьи.

Иисова А.М. – подготовила таблицы, приведенные в статье, проанализировала результаты.

Каражанова Д.Д. – редактирование текста статьи, анализ и формулирование инженерных рекомендаций.

Список литературы

1. Попов Ю.Л. Управление качеством в строительстве: учебное пособие. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. -255 с.
2. Михеева, Е.Н. Управление качеством: учебник /Е. Н. Михеева, М. В. Сероштан. - Москва: Дашков и К, 2014. -532 с.
3. Изотов В.С. Метрология, стандартизация, сертификация и государственный надзор в строительстве: учебное пособие. - Казань: КТАСУ, 2011. - 123 с.
4. СТ РК ИСО 9001:2015 «Система менеджмента качества. Требования».
5. Система менеджмента качества строительных организаций: учеб. пособие / Н. Т. Мазаник, Б. М. Басин. - 2-е изд., перераб. и доп. - Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – 95 с.
6. Манжиловская С.Е., Евлоева И.А. Система и модели организационного инжиниринга: актуальные проблемы и пути их решения // Технические науки – от теории к практике / Сб. ст. по материалам XLVI междунар. науч. практ. конф. № 5 (42). Новосибирск: Изд. «СибАК», -2015. С. 57–63.
7. Серяпин, М. А. Роль системы менеджмента качества в деятельности строительной организации / М. А. Серяпин, О. Д. Гриник // Лидерство и менеджмент. – 2025. -Т. 12, -№ 2. С. 413-428. <https://1economic.ru/lib/122669>, DOI 10.18334/lim.12.2.122669
8. Боброва, Н. Е. Системы менеджмента качества как основной вид контроля качества в строительстве / Н. Е. Боброва, Л. В. Волкова. -Текст: непосредственный // Молодой ученый. -2019. -№ 46 (284). С. 54-57. <https://moluch.ru/archive/284/63994>
9. Пшеунова, Л. И. Строительный контроль и управление качеством в строительстве: учебно-методическое пособие для обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство / Л. И. Пшеунова. – Черкесск: БИЦ СКГА, 2024. – 92 с.
10. Свидерский А.К., Свидерская Д.С., Кызылбаев Н.К. Контроль качества в строительстве

- // Вестник Инновационного Евразийского университета. -2014. -№3. С. 83-87.
https://vestnik.ineu.edu.kz/files/old-articles/article_139.pdf
11. Zhuman Y., Juman J., Makulova A., Kalaganov B., Tagay A., Bastarova U. Mechanism of introduction of quality management system at the enterprises of the construction industry: case of the Republic of Kazakhstan // Business, Management and Economics Engineering. 2024. Vol. 22. No. 2. P. 240–254. DOI: 10.3846/bmee.2024.20792.
 12. Кашкинбаев И. З., Кашкинбаев Т. И. Технология и организация контроля качества строительно-монтажных работ: учебник. — Нур-Принт, 2016. -219 с.
 13. Advanced Information Technologies for High-precision Quality Control in Building Engineering // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 101. 111918. DOI: 10.1016/j.jobee.2025.111918.
 14. Молчанов Н.А., Темкин Д.М., Полхоевская Т.М. Оценка эффективности и совершенствования системы качества предприятия // Методы менеджмента качества. - 2001. - № 10 - С. 24-29.
 15. Соколов Г. К., Филатов В. В., Соколов К. Г. Контроль качества выполнения строительно-монтажных работ: справ. пособие. - М.: Академия, 2009. - 384 с.

G.A. Baimakhanov¹, A.M. Iisova^{2,3}, D.D. Karazhanova^{*1,2,3}

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

² International educational corporation, Almaty, Kazakhstan

² Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, Almaty, Kazakhstan

Technological support for the quality of construction processes and systematic control of construction parameters

Abstract. This article examines engineering and technological approaches to quality assurance and quality control in the construction industry. The focus is on integrating quality management methods into construction processes, including monitoring work parameters, analyzing defects, and ensuring compliance with design documentation and regulatory requirements. The relevance of this research stems from the need to improve the reliability and durability of construction projects by implementing systematic quality control at all stages of the life cycle—from design to commissioning. The aim of this work is to develop an approach to ensuring the quality of construction products by combining the principles of quality management systems with engineering methods for monitoring and analyzing technological processes. The scientific novelty lies in examining the quality system as an element of the construction process, ensuring the control of process parameters and reducing the likelihood of defects. The practical significance lies in the possibility of applying the proposed approaches to improve the efficiency of construction work, reduce production risks, and ensure the consistent quality of constructed projects. The proposed solutions contribute to the optimization of construction supervision, increased safety of facilities, and improved quality management of construction production in modern engineering and technological operating conditions.

Keywords: Construction industry, technological processes, construction quality, parameter control, construction defects, engineering control, construction technologies.

References

1. Popov Yu.L. Upravlenie kachestvom v stroitelstve: uchebnoe posobie. Volgograd: VolgGASU, 2013. -255 s.
2. Miheeva, E.N. Upravlenie kachestvom: uchebnik /E. N. Miheeva, M. V. Seroshtan. - Moskva: Dashkov i K, 2014. -532 s.
3. Izotov V.S. Metrologiya, standartizaciya, sertifikaciya i gosudarstvennyj nadzor v stroitelstve: uchebnoe posobie. - Kazan: KTASU, 2011. - 123 s.
4. ST RK ISO 9001:2015 «Sistema menedzhmenta kachestva. Trebovaniya».
5. Sistema menedzhmenta kachestva stroitelnyh organizacij: ucheb. posobie / N. T. Mazanik, B. M. Basin. - 2-e izd., pererab. i dop. - Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2013. – 95 s.
6. Manzhilevskaya S.E., Evloeva I.A. Cistema i modeli organizacionnogo inzhiniringa: aktualnye problemy i puti ih resheniya // Tehnicheskie nauki – ot teorii k praktike / Sb. st. po materialam XLVI mezhdunar. nauch. prakt. konf. № 5 (42). Novosibirsk: Izd. «SibAK», - 2015. S. 57–63.
7. Seryapin, M. A. Rol sistemy menedzhmenta kachestva v deyatelnosti stroitelnoj organizacii / M. A. Seryapin, O. D. Grinik // Liderstvo i menedzhment. – 2025. -T. 12, -№ 2. S. 413-428. <https://1economic.ru/lib/122669>, DOI 10.18334/lim.12.2.122669
8. Bobrova, N. E. Sistemy menedzhmenta kachestva kak osnovnoj vid kontrolya kachestva v stroitelstve / N. E. Bobrova, L. V. Volkova. -Tekst: neposredstvennyj // Molodoj uchenyj. - 2019. -№ 46 (284). S. 54-57. <https://moluch.ru/archive/284/63994>
9. Psheunova, L. I. Stroitelnyj kontrol i upravlenie kachestvom v stroitelstve: uchebno-metodicheskoe posobie dlya obuchayushihsysya po napravleniyu podgotovki 08.03.01 Stroitelstvo / L. I. Psheunova. – Cherkessk: BIC SKGA, 2024. – 92 s.
10. Sviderskij A.K., Sviderskaya D.S., Kyzylbaev N.K. Kontrol kachestva v stroitelstve // Vestnik Innovacionnogo Evrazijskogo universiteta. -2014. -№3. S. 83-87. https://vestnik.ineu.edu.kz/files/old-articles/article_139.pdf
11. Zhuman Y., Juman J., Makulova A., Kalaganov B., Tagay A., Bastarova U. Mechanism of introduction of quality management system at the enterprises of the construction industry: case of the Republic of Kazakhstan // Business, Management and Economics Engineering. 2024. Vol. 22. No. 2. P. 240–254. DOI: 10.3846/bmee.2024.20792
12. Kashkinbaev I. Z., Kashkinbaev T. I. Tehnologiya i organizaciya kontrolya kachestva stroitelno-montazhnyh rabot: uchebnik. — Nur-Print, 2016. -219 s.
13. Advanced Information Technologies for High-precision Quality Control in Building Engineering // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 101. 111918. DOI: 10.1016/j.jobee.2025.111918.
14. Molchanov N.A., Temkin D.M., Polhoeskaya T.M. Ocenka effektivnosti i sovershenstvovaniya sistemy kachestva predpriyatiya // Metody menedzhmenta kachestva. - 2001. - № 10 - S. 24-29.
15. Sokolov G. K., Filatov V. V., Sokolov K. G. Kontrol kachestva vypolneniya stroitelno-montazhnyh rabot: sprav. posobie. - M.: Akademiya, 2009. - 384 s.

Сведения об авторах:

Баймаханов Г.А. - кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Satbayev University, ул. Сатпаева, 22, г. Алматы

Иисова А.М. - магистр технических наук, ассоциированный профессор, Казахская головная архитектурно-строительная академия, ул. Рыскулбекова, 28, г. Алматы

Каражанова Д.Д. - автор для корреспонденции, кандидат педагогических наук, ассоциированный профессор, Казахская головная архитектурно-строительная академия, ул. Рыскулбекова, 28, г. Алматы

Baimakhanov G.A. - PhD (Chemistry), Associate Professor, Satbayev University, 22 Satpayev Street, Almaty

Iisova A.M. - Master of Engineering Sciences, Associate Professor, Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, 28 Ryskulbekov Street, Almaty

Karazhanova D.D. - Corresponding Author, PhD (Pedagogy), Associate Professor, Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, 28 Ryskulbekov Street, Almaty



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



A Simplified Approach for Bending Analysis of Beams Resting on a Two-Parameter Elastic Foundation

S. Akhazhanov^{1*} , **A. Kassenova²** , **B. Nurlanova¹** , **N. Medeubaev¹** 

¹*Buketov Karaganda National Research University, Karaganda, Kazakhstan,*

²*Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan*

*E mail: sungatahazanov@gmail.com, a.kassenova@ttu.edu.kz,
nurlanova.b.m@gmail.com, medeubaev65@mail.ru*

Abstract. This paper presents a simplified method for analyzing beams interacting with two-parameter elastic foundations. The study develops and examines a refined mathematical model that captures the mechanical interaction between the beam and the elastic foundation, providing an accurate description of the beam's stress-strain state. The scientific novelty and practical significance lie in deriving analytical expressions for vertical displacements, bending moments, shear forces, and the distributions of normal and shear stresses along the beam. The methodology is based on theoretical analysis using an enhanced model of the two-parameter elastic foundation. As a result, analytical solutions are obtained, enabling evaluation of how the foundation's stiffness parameters influence structural behavior. The study establishes that the distributions of deflection and bending moment are symmetric about the midspan, whereas the distributions of shear forces and shear stresses are antisymmetric. Findings indicate that increasing foundation stiffness reduces deflections but maintains the overall pattern of internal force distribution. Particular attention is given to the case where $\alpha < 1$, which reveals specific characteristics of the beam's stress-strain behavior.

Keywords: beam, vertical displacements, deflections, bending moments, shear forces, modulus of elasticity, stress-strain state

Introduction

The analysis of beams on elastic foundations is a classical problem in structural mechanics, and its rigorous formulation reduces to solving a contact interaction problem between a structure and its foundation. A beam resting on an elastic foundation represents a statically indeterminate system, since the equilibrium condition alone, equating the external load to the total reaction of the foundation, is insufficient to determine the distribution of this reaction along the beam length and to evaluate internal forces in its cross-sections [1-2]. The beam on elastic foundation model is widely used in the analysis of the interaction between structures and soil in geotechnical, road, and railway engineering, as well as in structural mechanics. The simplest and most widely used approach is the one-parameter model proposed by Winkler, in which the foundation is represented as a system of independent vertical elastic springs. Despite its simplicity and practical convenience, the Winkler model does not account for interaction between adjacent foundation elements, which leads to discontinuities in the displacement field and reduces the accuracy of calculations [3-5].

Subsequently, more advanced models of elastic foundations were developed, taking into account shear interaction and the physical properties of the soil, as well as calculation methods based on variational principles and the theory of elasticity. A significant contribution to the development of this field has been made by numerical methods, primarily the finite element method, which enables the analysis of nonlinear material behavior, contact phenomena, and variations in foundation stiffness. More advanced mechanical models, such as those proposed by Pasternak, Kerr, Vlasov, and Reissner, provide greater physical accuracy; however, their practical application is often limited by the complexity of determining model parameters [6-7]. Classical works by Vlasov, Leontiev, and their followers laid the theoretical foundations for the investigation of beams on elastic foundations, incorporating variational methods and analytical solutions. In most of these studies, the modulus of subgrade reaction was assumed to be constant along the length of the structure, which significantly simplifies the analysis but does not always reflect the actual heterogeneity of the foundation. In [8], the influence of symmetric heterogeneity of the foundation within the Winkler model on the stress-strain state of a beam was investigated. The subgrade modulus was defined as a quadratic function along the span, and the degree of heterogeneity was characterized by a specific parameter. The calculations were performed using the Ritz-Timoshenko variational method. Modern studies pay considerable attention to the analysis of one- and two-parameter elastic foundation models, in which, in addition to the subgrade reaction modulus, an additional parameter characterizing the shear stiffness of the soil is introduced. These include, in particular, the Pasternak model and models based on representing the foundation as an elastic layer of finite thickness [9]. In [10], a refined model of the contact layer was proposed for analyzing the stress-strain state of a multilayer beam. Unlike earlier studies, this model accounts for the nonlinear distribution of displacements across the thickness of the contact layer, ensuring correct satisfaction of boundary conditions, in particular, the zero shear stress condition at corner points. The foundation is considered as an elastic layer of finite thickness resting on a rigid base. In contrast to simplified approaches, this model does not neglect any components of stresses, strains, or displacements in the soil base [11]. In recent years, considerable attention has been devoted to the development of simplified yet sufficiently accurate models aimed at practical engineering applications. In this direction, combined analytical-numerical approaches, iterative methods, boundary element schemes, and modified finite element models have been proposed, providing good agreement with classical solutions and experimental data. A simplified analytical method based on a modified two-parameter foundation model exceeds the classical Winkler model in accuracy while being less complex than the Vlasov model [12-14].

In study [15], a simplified method for analyzing beams on a two-parameter elastic foundation was proposed. The foundation was characterized by two elastic parameters, and a simplified governing differential equation of beam bending was derived. The validity of the approach was verified by comparison with the classical Winkler and Vlasov models. The results showed good agreement with established elastic foundation theories, confirming the reliability of the proposed analytical method.

Modern research is focused on the development of universal numerical methods that can account for arbitrary beam and foundation models, nonlinear material behavior, contact discontinuities, and spatial variability of parameters, all without a significant increase in computational cost. In this context, a promising approach is based on the independent discretization of the beam and the foundation, followed by a reduction in the number of variables, which improves the accuracy and efficiency of the analysis while preserving universality and ease of implementation within the framework of standard finite element formulations [16-18]. In [19], a refined mathematical model of a beam on a two-parameter elastic foundation was developed, together with the governing equilibrium equation and its analytical solutions for various boundary and loading conditions. The study focused on deflections, bending moments, shear forces, and normal and shear stresses, with a comparison to the classical Winkler model. The results confirm that the proposed approach is reliable, practically applicable, and more accurate in capturing stress-strain behavior than classical models.

Based on the analysis of existing calculation methods, which are often characterized by increased complexity, as well as the limitations of the classical Winkler model, this paper proposes a new simplified method for analyzing a beam on a two-parameter elastic foundation. The developed model allows for the determination of vertical displacements, bending moments, and shear forces, as well as the evaluation of normal and shear stresses in beam cross-sections while accounting for interaction with the elastic foundation. An important advantage of the proposed method over existing models is its improved accuracy compared to the widely used Winkler model, along with reduced computational complexity relative to the Vlasov model, which ensures its practical applicability in engineering analysis.

The aim of this study is to develop and justify a simplified method for analyzing a beam on a two-parameter elastic foundation that improves the accuracy of determining deflections, internal forces, and normal and shear stresses in beam cross-sections compared to the Winkler and Vlasov models, while maintaining computational efficiency and simplicity of implementation.

The methodology

The elastic foundation of thickness h and modulus of elasticity E is modeled as an elastic half-space and is considered in a Cartesian coordinate system $(-\infty \leq x_1 \leq \infty, 0 \leq x_3 \leq \infty)$. A beam of length l , thickness h_0 , and modulus of elasticity E is considered within the coordinate domain $\left(-\frac{l}{2} \leq x_1 \leq \frac{l}{2}\right), \left(-\frac{h_0}{2} \leq x_3 \leq \frac{h_0}{2}\right)$. The beam rests on the surface of the elastic foundation and interacts with it along the contact interface (Fig. 1).

To determine the stress-strain state of the elastic foundation, the displacement function method is applied. In deriving the governing relations, the fundamental equations of two-dimensional elasticity theory are used, establishing the relationships between stresses, strains, and displacements in an elastic medium. Taking into account the modulus of elasticity of the

foundation and the shear modulus of the beam material, the standard differential equation of elasticity theory describing the stress-strain state of the system is adopted:

$$\nabla^2 \nabla^2 = \frac{\partial^4 F}{\partial x_1^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x_1^2 \partial x_3^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial x_3^4} = 0 \quad (1)$$

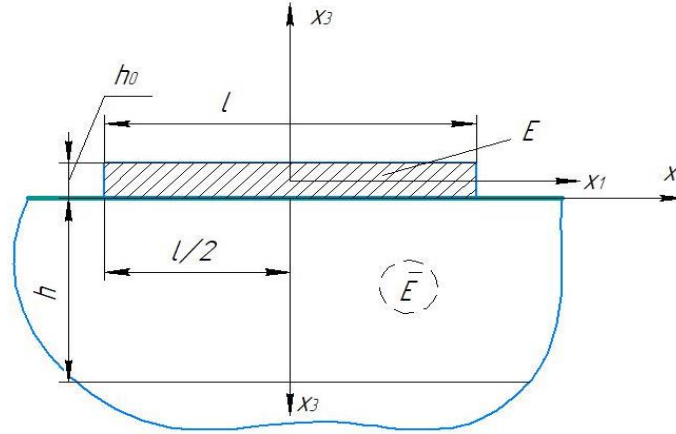


Figure 1. Beam on an elastic foundation

To obtain the solution of the biharmonic equation (1), the displacement function $F(x_1, x_3)$ is assumed in the following form:

$$F(x_1, x_3) = \delta(x_3) \cdot W(x_1) \quad (2)$$

where $\delta(x_3)$ – is the distribution function;

$W(x_1)$ – is the deflection function of the elastic foundation.

Using the displacement function (2) and the relations:

$$\frac{d^2 W(x_1)}{dx_1^2} = -k^2 W(x_1), \quad \frac{d^4 W(x_1)}{dx_1^4} = -k^4 W(x_1),$$

The displacement and stress components are determined.

Displacement components:

$$U_1(x_1, x_3) = -h \cdot \varphi(z_0) \frac{dW(x_1)}{dx_1}$$

$$U_3(x_1, x_3) = f(z_0) \cdot W(x_1)$$

$$\varphi(z_0) = \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \delta'(z_0) \quad (3)$$

$$f(z_0) = \delta''(z_0) - \frac{2}{(1-\nu)} k^2 \delta(z_0)$$

$$\delta(z_0) = (C_1 + C_2 z_0) e^{-kz_0}, \quad z_0 = \frac{x_3}{h}, \quad k^2 = k^2 \cdot h^2$$

where ν – is Poisson's ratio;

z_0 – is the dimensionless transverse coordinate in the elastic foundation;

$\varphi(z_0), f(z_0)$ – describe the distribution of displacements (U_1, U_3);

k – is the deformed state parameter, which depends on boundary conditions.

Stress components:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= -\frac{Eh}{12} \cdot \psi'(z_0) \frac{d^2 W(x_1)}{dx_1^2} \\ \tau_{13} &= \frac{Eh^2}{12} \cdot \psi(z_0) \frac{d^3 W(x_1)}{dx_1^3} \\ \sigma_3 &= -\frac{Eh^3}{12} \cdot \alpha(z_0) \frac{d^4 W(x_1)}{dx_1^4}\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\psi(z_0) &= 12 \left[\delta(z_0) + \frac{\nu}{k^2} \delta'''(z_0) \right] \\ \alpha(z_0) &= \frac{12}{k^4} [\delta'''(z_0) - (2 + \nu)k^2 \delta'(z_0)]\end{aligned}$$

where $\psi'(z_0), \psi(z_0), \alpha(z_0)$ – are functions that characterize the voltage distribution $\sigma_1, \tau_{13}, \sigma_3$.

When the displacement function (2) is inserted into equation (1), we get an expression of the following kind:

$$\begin{aligned}\delta(x_3) \cdot \frac{d^4 W(x_1)}{dx_1^4} + 2\delta''(x_3) \cdot \frac{d^2 W(x_1)}{dx_1^2} + \delta^{IV}(x_3) \cdot W(x_1) &= 0 \\ \left[\delta^{IV}(z_0) - 2 \cdot k^2 h^2 \delta''(z_0) + k^4 h^4 \delta(z_0) \right] \cdot W(x_1) &= 0\end{aligned}\quad (5)$$

$$\delta^{IV}(z_0) - 2 \cdot k^2 h^2 \delta''(z_0) + k^4 h^4 \delta(z_0) = 0$$

To determine the unknown constants A_0, B_0, C_0 , the following conditions are adopted:

Boundary conditions: $z = \frac{1}{2}$

$$\begin{aligned}\tau_{13}^0 &= 0; \psi_0\left(\frac{1}{2}\right) = 0, A_0 - \frac{C_0}{2} + \frac{1}{8} = 0 \\ \sigma_3^0 &= q; Eh_0^3 \delta_0\left(\frac{1}{2}\right) \frac{d^4 W_0(x_1)}{dx_1^4} = q \\ \delta_0\left(\frac{1}{2}\right) &= B_0 - \frac{A_0}{2} + \frac{C_0}{8} - \frac{1}{48}\end{aligned}\quad (6)$$

where $q(x_1)$ – is the intensity of the external distributed load acting on the beam.

Under contact conditions, when the beam deflection coincides with the deflection of the elastic foundation surface $W_0(x_1) = W(x_1)$, a system of equations for determining the unknown

parameters is obtained:

$$\begin{aligned}
 1 &= f(0), \quad C_0 + \frac{1}{2} = \frac{h}{h_0} \varphi(0) \\
 A_0 + \frac{C_0}{2} + \frac{1}{8} &= \frac{1}{12} \frac{Eh^2}{Eh_0^2} \beta_0; \beta_0 = \psi(0) \\
 B_0 + \frac{A_0}{2} + \frac{C_0}{8} + \frac{1}{48} &= -\frac{1}{12} \frac{Eh^3}{Eh_0^3} \alpha_0; \alpha_0 = \alpha(0)
 \end{aligned} \tag{7}$$

From the basic conditions using (7), the unknown constants are determined:

$$\begin{aligned}
 C_0 &= \frac{1}{12} \frac{Eh^2}{Eh_0^2} \beta_0, \quad A_0 = -\frac{1}{8} + \frac{1}{24} \frac{Eh^2}{Eh_0^2} \beta_0 \\
 B_0 &= \frac{1}{24} - \frac{1}{32} \frac{Eh^2}{Eh_0^2} \beta_0 - \frac{1}{12} \frac{Eh^3}{Eh_0^3} \alpha_0
 \end{aligned} \tag{8}$$

where β_0, α_0 are the values of the stress distribution functions (τ_{13}, σ_3) of the elastic foundation at the contact point.

Taking into account the functions obtained by the displacement function method, according to expression (3) and the values of their derivatives at the point $z_0=0$, the following equations are obtained from the first two expressions of conditions (7):

$$\begin{aligned}
 1 &= \delta''(0) - \frac{2k^2}{1-\nu} \cdot \delta(0) \\
 \frac{1}{12} \frac{Eh^2}{Eh_0^2} \beta_0 + \frac{1}{2} &= \frac{h}{h_0} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \delta'(0)
 \end{aligned} \tag{9}$$

The general solution of this equation can be obtained using three different types of solutions:

$$\lambda^2 = k^2(1 \pm \sqrt{1-\alpha}); k_\omega^4 = \alpha \cdot (k^2)^2$$

$$1. \alpha = 1: \delta(z_0) = (C_1 + C_2 z_0) e^{-kz_0} + (C_3 + C_4 z_0) e^{kz_0} \tag{10}$$

$$2. \alpha > 1: \delta(z_0) = [C_1 \cos(\beta_1 z_0) + C_2 \sin(\beta_1 z_0)] e^{-\alpha_1 z_0} + [C_3 \cos(\beta_1 z_0) + C_4 \sin(\beta_1 z_0)] e^{\alpha_1 z_0} \tag{11}$$

$$3. \alpha < 1: \delta(z_0) = C_1 e^{\alpha_2 z_0} + C_2 e^{-\alpha_2 z_0} + C_3 e^{\beta_2 z_0} + C_4 e^{-\beta_2 z_0} \tag{12}$$

where

$$\alpha_1 = k \sqrt{\frac{\alpha+1}{2}}, \quad \beta_1 = k \sqrt{\frac{\alpha-1}{2}}$$

$$\alpha_2 = k\sqrt{1 - \sqrt{1 - \alpha}}, \quad \beta_2 = k\sqrt{1 + \sqrt{1 - \alpha}}$$

The general solution of system (10)-(12) is determined depending on the value of parameter α . Three different cases are considered, for each of which appropriate calculation methods are applied. Previous studies examined in detail the first case $\alpha=1$, and the second $\alpha>1$, for which analytical calculations and analysis of results were performed [13, 15, 19, 20].

In the present study, particular attention is paid to the third case corresponding to the condition $\alpha<1$, for which the necessary computational investigations are carried out. When applying the general solution to an elastic foundation ($z_0 \rightarrow \infty, \delta(z_0)=0$), it takes the following form:

$$\delta(z_0) = C_2 e^{-\alpha_2 z_0} + C_4 e^{-\beta_2 z_0} \quad (13)$$

Thus, when using the proposed method, if the functions $W(x_1)$ and $\delta(z_0)$ are given, the stress-strain state of the elastic foundation can be determined relatively simply.

If a distributed load acts normally $\sigma(x_1)$ and tangentially $\tau(x_1)$ on the elastic foundation ($z_0 = 0$), the boundary conditions (4) are written as follows:

$$\begin{aligned} \tau_{13} = \tau: \beta_0 \frac{Eh^2}{12} \frac{d^3 W(x_1)}{dx_1^3} &= \tau(x_1), \psi(0) = \beta_0 \\ \sigma_3 = \sigma: \alpha_0 \frac{Eh^3}{12} \frac{d^4 W(x_1)}{dx_1^4} &= \sigma(x_1), \alpha(0) = \alpha_0 \end{aligned} \quad (14)$$

where α_0, β_0 – are parameters of the normal and shear distributed loads.

In general form, for $\beta_0 \neq 0, \alpha_0 \neq 0$, boundary conditions (14) using expressions (4) are written as:

$$\begin{aligned} \psi(0) = \beta_0: \frac{\beta_0}{12} &= \delta(0) + \frac{\nu}{k^2} \delta''(0) \\ \alpha(0) = \alpha_0: \frac{k^4}{12} \alpha_0 &= \delta'''(0) - (2 + \nu)k^2 \delta'(0) \end{aligned} \quad (15)$$

Let us determine the values of the main function (13) and its derivatives at $z_0=0$.

$$\begin{aligned} \delta'(z_0) &= -\sqrt{2}C_4 k e^{-\sqrt{2}kz_0} \\ \delta''(z_0) &= 2C_4 k^2 e^{-\sqrt{2}kz_0} \\ \delta'''(z_0) &= -2\sqrt{2}C_4 k^3 e^{-\sqrt{2}kz_0} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\delta(0) = C_2 + C_4, \quad \delta'(0) = -\sqrt{2}C_4 k, \quad \delta''(0) = 2C_4 k^2, \quad \delta'''(0) = -2\sqrt{2}C_4 k^3$$

Substituting (16) into (15), the following system is obtained:

$$C_2 = -\frac{\sqrt{2}k\alpha_0 - 2v\beta_0 + 2\sqrt{2}kv\alpha_0}{24v}, \quad C_4 = \frac{\sqrt{2}k\alpha_0}{24v} \quad (17)$$

Substituting constants (17) into (13), the main function is obtained $\delta(z_0)$:

$$\delta(z_0) = -\frac{\sqrt{2}k\alpha_0 - 2v\beta_0 + 2\sqrt{2}kv\alpha_0}{24v} \cdot e^{-\alpha_2 z_0} + \frac{\sqrt{2}k\alpha_0}{24v} \cdot e^{-\beta_2 z_0} \quad (18)$$

Solving equations (9), the parameters of stress distribution functions are determined:

$$\alpha_{1k} = \frac{\sqrt{2}k^3}{12v} + \frac{\sqrt{2}k^3(1+2v)}{12v(1-v)} - \frac{\sqrt{2}k^3}{12v(1-v)} - \frac{2k^2}{(1-v)} \cdot \frac{Eh_0}{Eh} \cdot \frac{k^2(1+v)}{12v(1-v)}$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{\alpha_{1k}} - \left[1 + \frac{k^2 E h_0^2}{(1-v) E h^2} \right] \quad (19)$$

$$\beta_{1k} = \frac{h}{h_0} \cdot \frac{k^2(1+v)}{12v(1-v)} \alpha_0 - \frac{1}{2} \quad \beta_0 = \frac{12Eh_0^2}{Eh^2} \beta_{1k}$$

where v – is Poisson's ratio;

κ – is a dimensionless parameter of the stress-strain state.

Taking into account relation (8), from boundary condition (6), the governing differential equation for beam deflection is obtained:

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{Eh^2}{Eh_0^2} \beta_0 - \frac{Eh^3}{Eh_0^3} \alpha_0 \quad (20)$$

where J – is the moment of inertia of the beam cross-section.

The parameters of the bending stiffness of the beam, taking into account (3), (8), and (19), are written as:

$$g_2 = 12 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \left(A_0 - C_0 \cdot z + \frac{z^2}{2} \right) dz = -g_0$$

$$g_2 = 12 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \left(-\frac{1}{8} + \frac{1}{24} \frac{Eh^2}{Eh_0^2} \beta_0 - \frac{1}{12} \frac{Eh^2}{Eh_0^2} \beta_0 \cdot z + \frac{z^2}{2} \right) dz = -g_0 \quad (21)$$

$$g_0 = 1 - 6\beta_{1k}, \quad z = \frac{x_3}{h_0}$$

where β_{1k} – is the parameter of the elastic foundation.

z – is the dimensionless transverse coordinate along the height of the beam.

Detailed derivations of the expressions for the bending moment M , shear force Q , and the normal σ_1^0 and shear stresses τ_{13}^0 of a beam on a two-parameter elastic foundation can be found in

our previous publications [15,19]. Therefore, only the final governing relations adopted in the present study are given below.

$$\begin{aligned}\sigma_1^0 &= h_0 \cdot \varphi_0(z) \frac{M}{J}, \quad \tau_{13}^0 = -h_0^2 \cdot \psi_0(z) \frac{Q}{g_0 J} \\ M &= -EJ \frac{d^2 w_0(x_1)}{dx_1^2}, \quad Q = -EJ g_0 \frac{d^3 w_0(x_1)}{dx_1^3}\end{aligned}\quad (22)$$

Findings/Discussion

This study considers a beam interacting with a two-parameter elastic foundation. The beam is subjected to a uniformly distributed load $q=1\text{kN/m}$. The geometric parameters of the beam are as follows: length $l=10\text{m}$, height $h_0=0.25\text{m}$, and modulus of elasticity of the material $E=1 \cdot 10^3\text{Pa}$.

Table 1. Values of vertical displacements for foundation elastic modulus $E = 1\text{Pa}$, $E = 10\text{Pa}$, $E = 100\text{Pa}$

x	$W_1(x),$ $E = 1\text{Pa}$	$W_2(x),$ $E = 10\text{Pa}$	$W_3(x),$ $E = 100\text{Pa}$
0	0	0	0
1	10.391	5.373	0.109
2	19.659	10.166	0.207
3	26.914	13.918	0.283
4	31.521	16.3	0.331
5	33.1	17.116	0.348
6	31.521	16.3	0.331
7	26.914	13.918	0.283
8	19.659	10.166	0.207
9	10.391	5.373	0.109
10	0	0	0

The main parameters of the elastic foundation: $E = 1\text{Pa}$, $E = 10\text{Pa}$, $E = 100\text{Pa}$, $\nu = 0.25$ and $h = 1\text{m}$, $\alpha = 0$. The adopted parameters make it possible to evaluate the stress-strain state of the beam on the elastic foundation and the influence of foundation characteristics on the distribution of internal forces and deflections. The performed analytical and numerical study provided the distributions of deflections, bending moments, shear forces, and stresses in the beam. It was shown that for $\alpha < 1$, the stress-strain state of the beam changes significantly due to the specific features of beam-foundation interaction.

The results of the vertical displacement analysis are presented in Table 1 and Figure 2. The deflection distribution $W(x)$ is symmetric with respect to the midspan, with maximum values occurring at the beam center ($x=l/2$). The analysis shows that increasing the elastic modulus of the foundation E significantly reduces beam deflections along the entire span. The largest displacements correspond to $E = 1Pa$, whereas increasing the foundation stiffness to $E = 100Pa$ results in a considerable reduction in deflections.

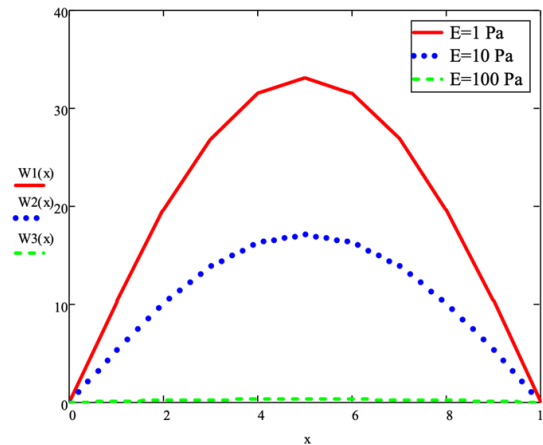


Figure 2. Distribution of vertical displacements $W(x)$ for different values of the foundation elastic modulus E .

The results of the calculation of the bending moment $M(x)$ and shear force $Q(x)$ are presented in Table 2, while their distribution along the beam span is shown in Figure 3, respectively. As follows from the data in Table 2 and the corresponding graphical dependencies, the distribution of the bending moment $M(x)$ is symmetric with respect to the midspan. The maximum bending moment occurs in the central part of the beam ($x=l/2$), whereas it reduces to zero at the supports, which is consistent with classical beam bending theory. In contrast, the distribution of the shear force $Q(x)$ exhibits an antisymmetric pattern: the maximum absolute values are observed in the regions near the supports, while at the midspan the shear force becomes zero. When passing through the midspan, the sign of the shear force changes, reflecting the variation in the internal force distribution within the beam.

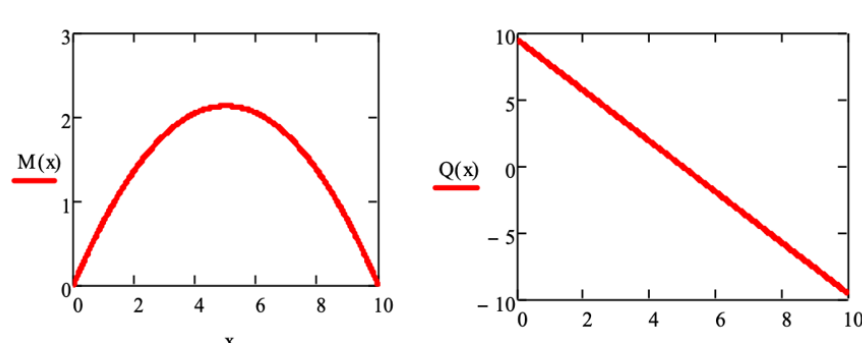


Figure 3. Distribution of the bending moment $M(x)$ and shear force $Q(x)$ along the beam length

The results of the calculation of normal and shear stresses in the beam on an elastic foundation are presented in Table 3 and Figures 4-5.

Table 2. Bending moment $M(x)$ and shear force $Q(x)$ values

x	$M(x)$	$Q(x)$
0	0	9.528
1	0.77	7.622
2	1.369	5.717
3	1.797	3.811
4	2.054	1.906
5	2.14	0
6	2.054	-1.906
7	1.797	-3.811
8	1.369	-5.717
9	0.77	-7.622
10	0	-9.528

The distribution of normal stresses $\sigma_{10}(x,z)$ is symmetric with respect to the midspan, with maximum values observed in the central part of the beam, corresponding to the region of maximum bending moment.

Table 3. Variation of normal stresses $\sigma_{10}(x,z)$ along the beam length

x	$\sigma_{10}(x, -\frac{1}{2})$	$\sigma_{10}(x, 0)$	$\sigma_{10}(x, \frac{1}{2})$	$\sigma_{10}(x, 1)$
0	0	0	0	0
1	175.816	249.759	323.702	397.645
2	312.562	444.016	575.47	706.924
3	410.237	582.771	755.305	927.838
4	468.842	666.024	863.205	$1.06 \cdot 10^3$
5	488.378	693.775	899.172	$1.105 \cdot 10^3$
6	468.842	666.024	863.205	$1.06 \cdot 10^3$
7	410.237	582.771	755.305	927.838
8	312.562	444.016	575.47	706.924
9	175.816	249.759	323.702	397.645
10	0	0	0	0

The shear stresses $\tau(x,z)$ vary both along the beam length and across the thickness of the cross-section, vanishing at the boundaries and reaching maximum values near the neutral axis. The obtained stress distributions are consistent with the classical behavior of beams on elastic foundations.

The obtained analytical and numerical results provide a comprehensive analysis of the stress-strain state of a beam on a two-parameter elastic foundation. The developed method demonstrates reliable results consistent with the classical theory of beams on elastic foundations.

The deflection distribution $W(x)$ is symmetric with respect to the midspan, with maximum values occurring in the central region of the beam

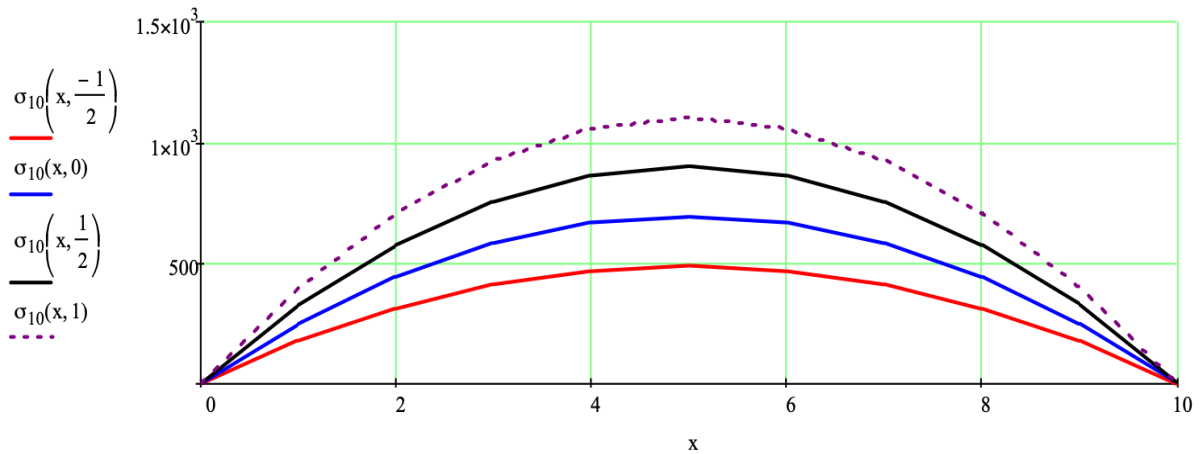


Figure 4. Distribution of normal stresses $\sigma_{10}(x, z)$

An increase in the elastic modulus of the foundation E leads to a significant reduction in beam deflections. The bending moment distribution is symmetric with a maximum at the midspan, whereas the shear force distribution is antisymmetric and becomes zero at the center of the beam. The stress analysis showed that normal stresses $\sigma_{10}(x, z)$ are symmetrically distributed and attain maximum values in the region of maximum bending moment. Shear stresses $\tau(x, z)$ exhibit a nonuniform distribution across the beam length and cross-section thickness, vanishing at the boundaries and reaching extreme values near the neutral axis. Calculations for the case $\alpha < 1$ revealed specific features of the beam-foundation interaction and demonstrated a significant influence of foundation parameters on the stress-strain state of the beam. The proposed simplified model provides reliable results with relatively simple implementation.

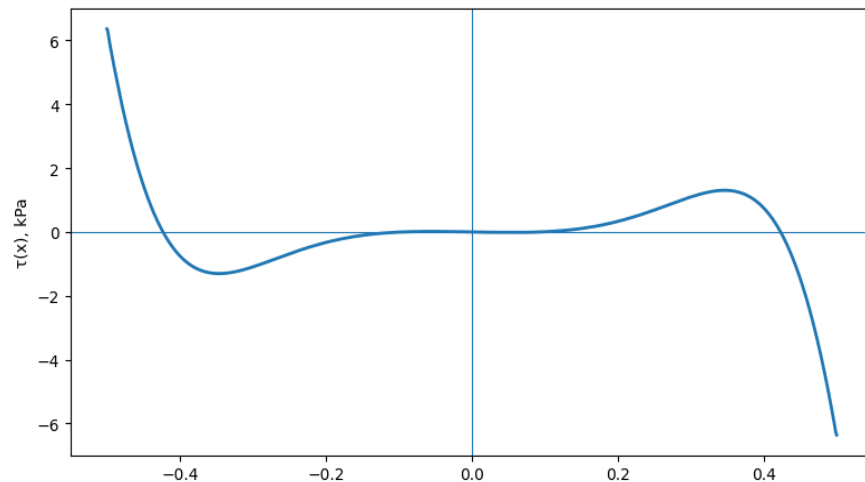


Figure 5. Distribution of shear stresses $\tau(x, z)$

The graphical dependencies obtained using Mathcad clearly illustrate the behavior of the investigated quantities and confirm the reliability of the obtained results. The presented

distributions are consistent with the behavior of bending elements on an elastic foundation and can be used for further analysis and practical design calculations.

Conclusion

A simplified method for analyzing a beam on a two-parameter elastic foundation has been developed, allowing the interaction between the beam and the elastic foundation to be taken into account. As a result of the performed calculations, analytical relationships were obtained for determining vertical displacements, bending moments, shear forces, as well as normal and shear stresses in the beam. It was established that the distributions of deflections and bending moments are symmetric with respect to the midspan, whereas the distributions of shear forces and shear stresses are antisymmetric, which is consistent with the classical behavior of bending elements. The analysis of the obtained results showed that an increase in the stiffness of the elastic foundation leads to a reduction in deflections along the entire beam length. At the same time, the general pattern of displacement and internal force distribution is preserved, and the minimum displacement values are observed at the highest values of the foundation elastic modulus. Particular attention was given to the case $\alpha < 1$, in which the specific features of the interaction between the beam and the elastic foundation are most pronounced. In this case, a more significant change in the stress-strain state of the structure is observed. The obtained results may serve as a basis for the further development of refined models describing the interaction between structures and elastic foundations.

The contribution of the authors

S. Akhazhanov – drafting, methodology, modeling

A. Kassenova - data collection, analysis

B. Nurlanova - analysis, interpretation

N. Medeubaev – data collection, article design.

References

1. М.А. Гаджиев, “Разработка инженерной методики расчета балок и рам на упругом основании и в упругой среде.” Автореферат, Азербайджанский Университет Архитектуры и Строительства, Баку, Азербайджан, 2012. – 150 с.
2. Worku, M. Asce “Calibrated analytical formulas for foundation model parameters.” *International journal of geomechanics*, 13(4), 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000214), pp. 340–347, USA.
3. Ю. Цвей, Балки и плиты на упругом основании, МАДИ, Москва, 2014. -96с.
4. D. Froio, · E. Rizzi “Analytical solution for the elastic bending of beams lying on a variable Winkler support.” *Acta Mechanica*, 227(4), 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00707-015-1508-y>, pp.1157–1179, Italy.
5. SD. Akbaş “Free vibration and bending of functionally graded beams resting on elastic foundation.” *Research on Engineering Structures and Materials*, 1(1), 2015, DOI: <https://doi.org/10.17515/resm2015.03st0107>, pp. 25-37, Turkey.
6. D. Banic, G. Turkalj, J. Brnic “Finite element stress analysis of elastic beams under non-uniform torsion.” *Transactions of Famena*, 40(2), 2016, DOI: <https://doi.org/10.21278/TOF.40206>, pp. 71–82, Croatia.
7. Leontyev, K. Balandina “Influence of Inhomogeneity of the Foundation on the Stress-strain State of the Design Located on it.” *Moscow State University of Civil Engineering*, 196, 2018,

- DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819601009>, pp.01009, France.
8. S. Essa "Analysis of elastic beams on linear and nonlinear foundations using finite difference method." *Eurasian Journal of Science & Engineering*, 3(3), 2018, DOI: <https://doi.org/10.23918/eajse.v3i3p92>, pp.92–101, Iraq.
 9. M. Balabusic, B. Folic, S. Coric "Bending the Foundation Beam on Elastic Base by Two Reaction Coefficient of Winkler's Subgrade." *Open Journal of Civil Engineering*, 09(02), 2019, DOI: <https://doi.org/10.4236/ojce.2019.92009>, pp.123–134, Bosnia and Herzegovina.
 10. R.A. Turusov, V. Andreev, N. Tsybin "The contact layer stiffness influence assessment on the stress-strain state of a multilayer beam." *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 913(3), 2020, DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/3/032053>, pp.032053, Russia.
 11. Worku, B. Habte "Analytical formulation and finite-element implementation technique of a rigorous two-parameter foundation model to beams on elastic foundations." *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1), 2020, DOI: <https://doi.org/10.1080/17486025.2020.1827162>, pp.1–14, Ethiopia.
 12. Wstawska, K. Magnucki, P. Kedzia "Analytical investigation of a beam elastic foundation with nonsymmetrical properties." *Engineering Transactions*, 70(1), 2022, DOI: <https://doi.org/10.24423/EngTrans.1254.20220314>, pp. 77 – 93, Poland.
 13. О. Хабидолда, С.К. Ахмедиев, С.Р. Жолмагамбетов, С.К. Кожасов, Б.С. Адекенов "Численный метод расчета балки переменного сечения, лежащей на упругом основании." *Труды университета*, 2(87), 2022, DOI: https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_2_188, с.188–194, Казахстан.
 14. S.B. Akhazhanov, N.I. Vatin, S. Akhmediyev, T. Akhazhanov "Beam on a two-parameter elastic foundation: simplified finite element model." *Magazine of Civil Engineering*, 121(5), 2023, DOI: <https://doi.org/10.34910/MCE.121.7>, pp.12107, Russia.
 15. S. Akhazhanov, B. Bostanov, A. Kaliyev, T. Akhazhanov and A. Mergenbekova "Simplified method of calculating a beam on a two parameter elastic foundation." *International Journal of Geomate*, 25(111), 2023, DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.111.3898>, pp.33–40, Japan.
 16. X. Min, Zh. Wanling, W. Zhengzhong, Wu. Lang, Y. Xiaosong, C. Hao, G. Jianrui "Frost-heaving mechanical Analysis of Frost Heave in Winter Water Conveyance Trapezoidal Channels Based on the Winkler-Pasternak Model." *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 39(10), 2023, DOI: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202212075>, pp.88-95, China.
 17. J.C. Molin0a-Villegas "A Green's function driven mesh reduction technique for obtaining closed-form solutions of uniform Euler-Bernoulli beams on two-parameter elastic foundations." *Finite Elements in Analysis and Design*, 251, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2025.104418>, pp.104418, Mexico.
 18. P. Giorgio, B. Federico, S. Pietro "Beams on elastic foundation: A variable reduction approach for nonlinear contact problems." *European Journal of Mechanics*, 111, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.105514>, pp.105514, Italy.
 19. S. Akhazhanov, N.Vatin, A. Kasimov, A. Kassenova "Refined Methodology for the Analysis of Beams on Elastic Foundations." *Technobius*, 5(3), 2025, DOI: <https://doi.org/10.54355/tbus/5.3.2025.0088> pp.88, Kazakhstan.
 20. С.Б. Ахажанов, "Серпимділі негіздегі арқалықты есептеу әдісі." Монография, Қарағанды: «Типография Арко» ЖШС баспасы, Қарағанды, Қазақстан, 2020, -166б.

Information about the authors:

Akhazhanov S. – corresponding author, PhD, Associate Professor, Research Laboratory Applied Mechanics and Robotics, Buketov Karaganda National Research University, Universitetskaya 28a str., 100024, Karaganda, Kazakhstan

Kassenova A. – PhD Student, Department of Building Materials and Technologies, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Nursultan Nazarbayev 56 ave., 100022, Karaganda, Kazakhstan

Nurlanova B. - PhD Student, Department of algebra, mathematical logic and geometry named after Professor T.G. Mustafin, Buketov Karaganda National Research University, Universitetskaya 28a str., 100024, Karaganda, Kazakhstan

Medeubaev N. - PhD, Department of algebra, mathematical logic and geometry named after Professor T.G. Mustafin, Buketov Karaganda National Research University, Universitetskaya 28a str., 100024, Karaganda, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Review

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-80-93>

Participatory Budgeting in Urban Planning: A Mechanism for Prioritizing Public Space Development Projects

S. G. Kazhenov¹  , A.S.Yermukhanova² 

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

*E mail: *saken.kazhenov@gmail.com, albina-yermukhan256@mail.ru*

Abstract. Participatory budgeting is increasingly used to involve citizens in decisions on local urban development. This study examines participatory budgeting not only as a governance mechanism, but also as a micro-urban planning tool for identifying and prioritizing public space deficits in Almaty. Drawing on project-level data from the city's official participatory budgeting platform, the research analyses 197 project proposals across eight districts. Using descriptive statistics and pattern identification, the analysis compares voting intensity, project categories, budget allocation, population shares, housing price indicators, and implementation status. The findings reveal uneven civic activation across districts, differentiated demand for neighbourhood-scale improvements, and disproportions between budget shares and demographic weight. Project typologies show that residents primarily use participatory budgeting to address everyday spatial needs, including courtyard improvements, playgrounds, greening, sports facilities, and small-scale public spaces. The study contributes by reframing participatory budgeting as an evidence base for spatial equity monitoring and more responsive micro-urban planning. This perspective helps municipalities connect citizen priorities with practical decisions on public space development.

Keywords: Micro-urban Design, Public spaces, Participatory Budgeting (PB), Citizen Participation, Urban Governance, Budget Allocation.

Introduction

Contemporary urbanization is characterized by an escalating demand for public spaces that provide essential ecosystem services, strengthen social cohesion, and facilitate the development of sustainable urban environments [1–3]. Areas of Public Space and Meeting (APSM)—encompassing parks, squares, sports facilities, and landscaping projects—have become fundamental indicators of urban life quality [4,5]. However, the provision of these spaces frequently lags behind the pace of urban growth, resulting in a persistent supply-demand imbalance and the reinforcement of socio-spatial inequalities [5–9].

An analysis of urban improvements, such as those across the districts of Almaty, reveals significant disparities in the scale and direction of infrastructure development. While some areas, such as the Zhetysu District, show a high concentration of sports facilities and architectural forms, more densely populated districts like Auezov and Almaly demonstrate limited indicators of improvement, suggesting a high risk of infrastructure deficits. These findings indicate that resource distribution does not always correlate with demographic patterns or actual social needs, highlighting the limitations of traditional "top-down" planning methods [10–12].

To address these imbalances, it is essential to transition toward participatory governance, where residents are actively engaged in decision-making processes. In order to confront the systemic socio-spatial inequalities of modern urban development, this research explores the integration of Citizen Participation as a fundamental mechanism for inclusive governance, the regulation of Project-Level Privatization to prevent the prioritization of elite interests over communal utility, and the restructuring of Budget Management to ensure that resource allocation corresponds to actual demographic needs rather than centralized "top-down" planning. Ultimately, there is a critical need to develop a methodological framework for citizen participation in APSM management to ensure more equitable resource distribution, enhance transparency, and foster a sustainable urban environment that genuinely reflects the needs of local communities [3,12,13].

The aim of this study is to examine how participatory budgeting can function as a micro-urban planning mechanism for identifying, prioritizing, and addressing local public space deficits in the districts of Almaty.

The central research question is: how do participatory budgeting projects reveal spatial priorities, infrastructural deficiencies, and budgetary disproportions in the development of neighbourhood-scale public spaces?

To answer this question, the study analyses project-level data from Almaty's participatory budgeting platform, focusing on the distribution of projects across districts, voting intensity, functional project typologies, budget allocation, population shares, and apartment price indicators. This approach makes it possible to interpret participatory budgeting not only as a form of citizen involvement, but also as a source of planning evidence for improving the spatial equity of public space development.

Taxonomy of participation and governance models. Participatory urban planning is fundamentally a socio-technical assemblage of knowledge-making [12]. A primary framework for understanding this collaboration is the Quadruple Helix model, which integrates the institutional functions of government, university, industry, and civil society to drive regional innovation. This model fosters a knowledge democracy, where the fourth helix (citizens) transitions from passive consumers to active co-creators of urban value[14].

The depth of this engagement is often categorized using the IAP2 spectrum, summarized in the table below:

Table 1. The IAP2 Framework for Public Participation

Level	Goal	Mechanism/Technique	Exemplary references
Inform	Provide objective information to assist public understanding.	Fact sheets, websites, open houses.	[13]
Consult	Obtain community feedback on analysis or decisions.	Online surveys, focus groups, public meetings.	
Involve	Work directly with the public to ensure concerns are considered.	Thematic workshops, deliberative polling.	[15]
Collaborate	Partner with the community in each aspect of decision-making.	Consensus-building, citizen advisory committees.	[14]
Empower	Place final decision-making in the hands of the community.	Citizen juries, ballots, delegated decision-making.	[1,13]

Introduction and conceptual evolution. The contemporary shift in urban and regional planning represents a departure from technocratic, top-down projections toward integrated management frameworks that prioritize the physical, social, and economic resources of a territory [6,7]. This "participatory turn" is grounded in the necessity of increasing transparency and accountability within governance while improving the quality of state decision-making [6,10]. Historically, metropolises were often constructed "brick by brick" by working classes outside formal planning circuits; however, modern frameworks institutionalize this through a "pact" between the population and its territory, aiming to redress entrenched spatial and social inequalities [7].

The role of participatory design in urban architecture. In the realm of architecture and design, participation redefines the professional as a mediator and facilitator rather than an isolated expert [15]. Key roles and impacts include:

- Relational Design (RD) and Ethics of Care: Emerging paradigms advocate for a shift from standard participatory design to relational design, which prioritizes long-term trust-building and interdependency. Using a feminist ethics of care, designers employ reflectivity and "care-full" facilitation to support those most in need, transforming planning into a repairing practice [5].
- Defining Cultural Significance: In heritage planning, participation is vital for establishing consensus on attributes (the physical resources to list) and values (the reasons they are important), preventing historians or architects from being the sole arbiters of significance [13].

- **Collective Imagination and Scenario Planning:** Methods such as participatory scenario planning move beyond technical forecasting to integrate "co-futuring" and collective imagination into the design of future mobility and infrastructure [3].
 - **Operational Roles for Planners:** In Dutch planning, professionals adopt accommodative roles as brainstormers, professional companions, or co-creators to proactively address citizen disagreement and humanize the planning process [15].
- Methodological innovations. Planners increasingly utilize quali-quantitative tools to elicit «situated knowledge»:
- **Companion Modelling (ComMod):** Uses role-playing games and multi-agent systems to facilitate social learning and dialogue regarding complex environmental trade-offs [4].
 - **Public Value Spheres:** Leveraging Natural Language Processing (NLP) and spatial clustering, researchers can identify archetypical "value conflicts" (e.g., gentrification vs. affordability) geolocated in urban space (Herzog et al., 2024).
 - **Dynamic Spatial Modelling:** Platforms like Ocelet allow stakeholders to simulate land-use trajectories, such as balancing food and electricity self-sufficiency in island contexts [16].

Challenges and theoretical tensions. The literature warns against the risks of tokenism and the reinforcement of neoliberal logics that prioritize efficiency over genuine empowerment. Digital participation platforms can create epistemic enclosures, restricting the scale and temporality of legitimate urban knowledge through majoritarianism [5,12]. Furthermore, in authoritarian contexts, "authoritarian deliberation" may be utilized by the state as a strategic policy instrument to mitigate conflict and maintain social order without fundamentally challenging hegemonic power relations [9]. Finally, scholars highlight the "local trap," the erroneous assumption that hyper-localized knowledge is inherently more democratic, which can lead to insular and exclusionary decision-making [12].

The methodology

The contribution of this study is threefold. First, it reframes participatory budgeting as a diagnostic instrument for micro-urban planning rather than only as a mechanism of citizen participation or municipal finance. Second, it links citizen-submitted projects to specific urban planning functions through the L1–L5 typology, including playgrounds, courtyard improvements, sport facilities, greening, and small public spaces. Third, it applies a budget-to-population proportionality ratio to assess whether participatory budgeting allocations correspond to the demographic weight of urban districts. In this way, the study offers a practical analytical framework for interpreting participatory budgeting data as evidence for spatial equity and neighbourhood-scale public space planning.

Research Design This study employs an exploratory quantitative design to investigate patterns of citizen activity, project prioritization, and budget allocation within participatory budgeting (PB) initiatives. This approach aligns with the "Idea Impact" phase of the participatory budgeting journey, which seeks to evaluate how citizen input translates into tangible resource allocation and policy innovation (Bartocci et al., 2023). The focus remains on identifying distributions and relationships across districts rather than testing causal effects, reflecting the comparative analysis often used to understand local governance dynamics in varying urban contexts (Sondou et al., 2025).

Unit of Analysis The unit of analysis is the individual project proposal submitted through the participatory budgeting program, representing the "tangible product" of the citizen engagement process. The dataset encompasses 197 projects distributed across 8 districts. District-level indicators were calculated through aggregation, a method used to determine the scale or area of influence for urban structural elements.

$$Y_d = \sum_{i=1}^{n_d} y_i \quad [1]$$

Where

Y_d - represents the aggregated indicator for district d .

The data for this study comes from official municipal participatory budgeting platforms. These platforms help collect and share information online on a large scale (Afzalan & Muller, 2018). The dataset includes the number of submitted projects, projects receiving more than 50 votes, allocated budgets, and district population. Additionally, the average apartment price per square meter was collected as a proxy for socio-economic status, as research suggests that the demographic and economic profile of a city significantly influences participation levels and the "digital divide" (Jiménez-Caldera et al., 2024). Only projects exceeding the 50-vote threshold were included in the prioritization and budget analysis to focus on initiatives with verified community support.

$$V_i > 50$$

Project Classification and Analysis. Following established methods for the typological characterization of urban spaces, projects were classified into five levels based on their scope and public orientation:

- L1 – Playground;
- L2 – Apartment block yard;
- L3 – Sport facilities;
- L4 – Planting of greenery;
- L5 – Alleys, small architectural forms, and parks.

Citizen activity was assessed by ranking districts based on project submission and approval levels, mirroring the "ladder of participation" by examining the intensity of community engagement (Sondou et al., 2025). Project prioritization was analyzed through frequency distribution across the L1–L5 categories to identify which spatial demands are most prevalent among users (Yu & Zhang, 2025).

Ranking formula:

$$Rank_d = rank(X_d) \quad [2]$$

Where X_d - indicator of submission or approval level for district d .

At the final stage, we examined how the budget is distributed across districts. We also checked whether this distribution is related to population size and socio-economic factors, including apartment prices per square meter. This analysis aims to highlight potential socio-spatial disparities in how public funds are directed toward community-led urban improvements (Jiménez-Caldera et al., 2024).

Findings /Discussion

1. Votes per Project Across Districts. Figure 1 illustrates the distribution of votes per project across eight districts (D0–D7), with the vertical scale ranging from 0 to 300 votes.

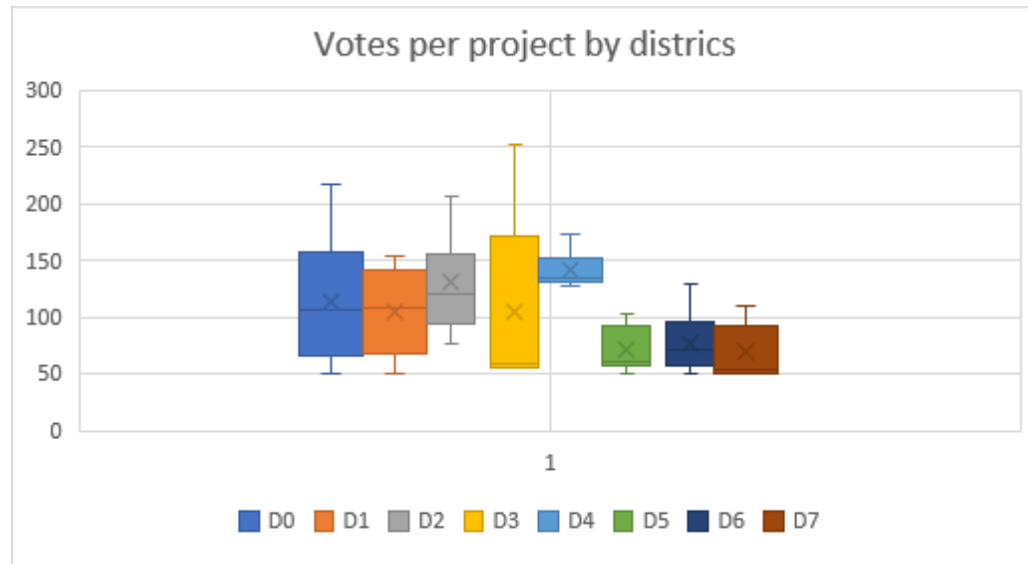


Figure 1. Distribution of submitted projects by district

From a planning perspective, differences in voting intensity indicate unequal levels of civic activation around local spatial problems.

The observed vote counts vary substantially between districts. District D3 demonstrates the widest dispersion, with projects receiving approximately 55 to 250 votes and a median of around 100–110 votes. Its interquartile range spans roughly from 60 to 170 votes, indicating considerable internal variation.

District D0 shows a range of approximately 50 to 215 votes, with a median close to 95–100 votes. Similarly, D2 ranges from about 75 to 205 votes, with a higher median near 120 votes. District D4 appears more concentrated, with vote values primarily between 125 and 170 votes and a median of around 140 votes.

By contrast, districts D5, D6, and D7 display lower and more compact distributions. Vote counts in D5 range approximately from 50 to 100, with a median near 70 votes. District D6 extends from roughly 50 to 130 votes, with a median around 75–80 votes, while D7 spans about 50 to 110 votes, with a median close to 70 votes.

Across districts, mean values (indicated in the figure) appear slightly higher than medians in several cases, reflecting the presence of higher-vote observations within the upper ranges.

Overall, project-level vote counts range from approximately 50 to 250 votes, with district medians varying between roughly 70 and 140 votes.

2. Projects reaching the 50-vote threshold by district. Figure 2 presents the number of projects in each district that exceeded the 50-vote participation threshold.

The number of projects exceeding the threshold can therefore be interpreted as an indicator of district-level capacity to formulate and mobilize support for micro-urban interventions.

Almalinsky district records the highest number of qualifying projects, with 51 initiatives surpassing the threshold. It is followed by Alatau with 32 projects and Auezovsky with 29 projects.

Zhetysusky and Nauryzbaysky demonstrate comparable levels of activity, with 25 and 24 projects, respectively.

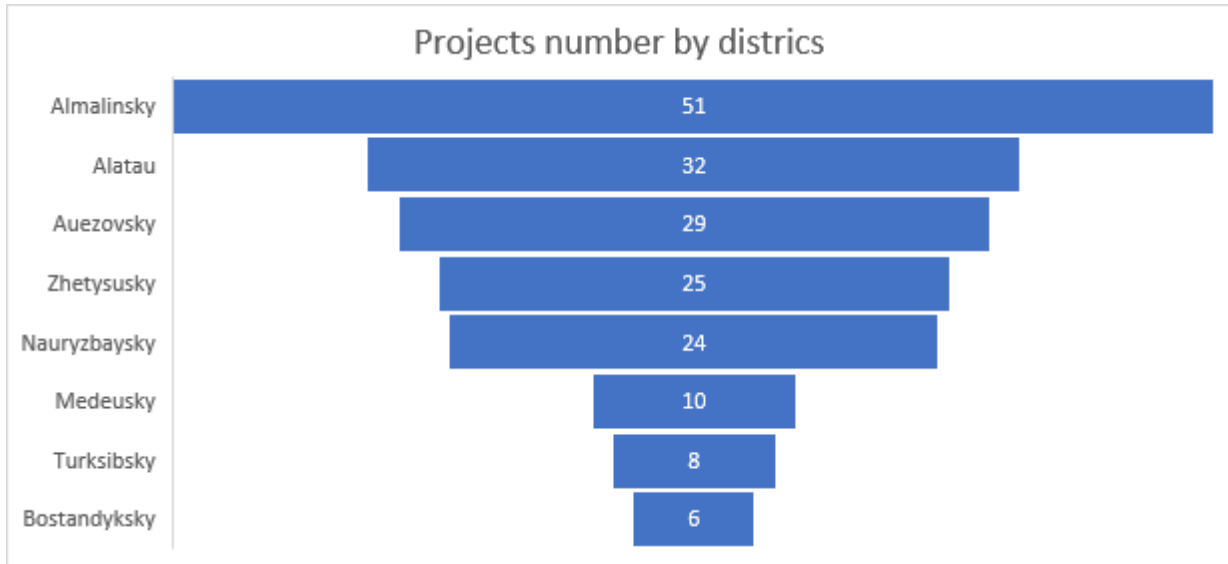


Figure 2. Share of projects exceeding 50 votes

Lower counts are observed in Medeusky (10 projects), Turksibsky (8 projects), and Bostandyksky (6 projects), the latter representing the smallest number of initiatives reaching the required voting level.

Overall, the number of projects exceeding the 50-vote threshold ranges from 6 to 51 projects across districts, indicating substantial variation in the volume of qualifying participatory initiatives.

3. Distribution of projects by functional level (L1–L5). Figure 3 presents the proportional distribution of projects by functional level (L1–L5) across districts that met the 50-vote threshold. The chart is displayed in percentage terms (0–100%), illustrating the internal composition of projects within each district.

Project categories are defined as follows:

- L1 – Playground;
- L2 – Apartment block yard;
- L3 – Sport facilities;
- L4 – Planting of greenery;
- L5 – Alleys, small architectural forms, and parks.

The composition of project levels varies across districts.

The dominance of L4 and L5 projects shows that residents primarily use participatory budgeting to address everyday public space quality, environmental comfort, and neighbourhood identity.

In Alatau, projects are distributed across all five categories, with noticeable shares in L1, L2, and L5.

Almalinsky is strongly dominated by L4 (planting of greenery), which constitutes the majority of projects, while other categories account for comparatively small proportions. In Auezovsky, L2 (apartment block yard improvements) represents the largest share, followed by L4.

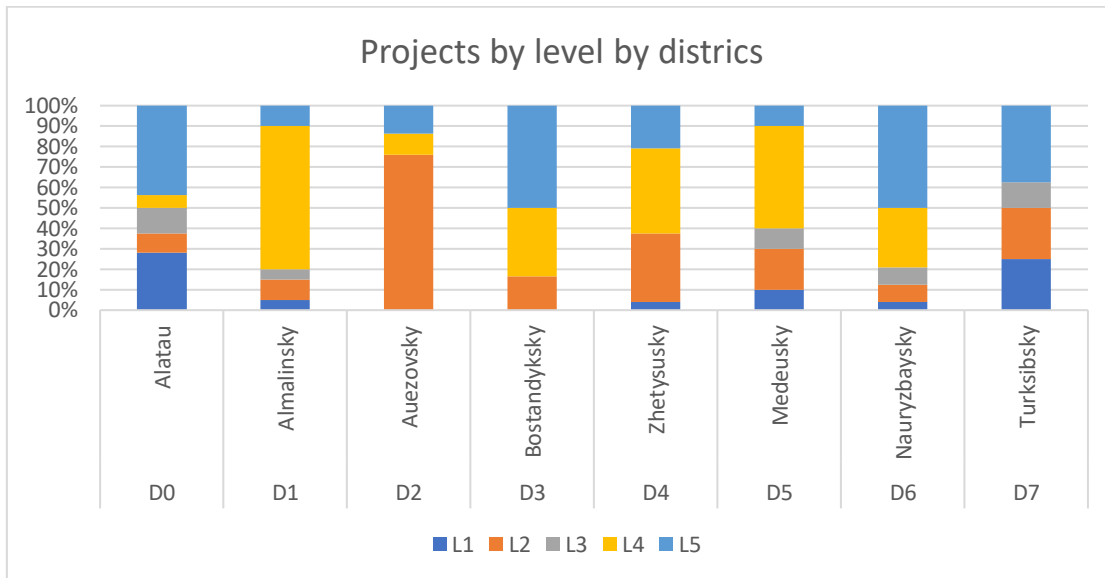


Figure 3. Distribution of projects by functional Level (L1–L5)

Bostandyksky shows a substantial proportion of L5 projects, alongside notable shares of L3 and L4.

Zhetysusky demonstrates a more balanced distribution, with visible shares in L2, L3, L4, and L5.

In Medeusky, L4 accounts for a large proportion of projects, while L1 and L2 contribute smaller shares.

Nauryzbaysky is characterised by a strong presence of L5 projects, while L1–L3 represent comparatively smaller proportions.

Finally, Turksibsky displays a mixed structure, with visible contributions from L1, L2, and L5.

Overall, the figure shows that project-level prioritisation differs across districts, with certain territories concentrating on specific functional categories, particularly L4 (greening) and L5 (public space and architectural improvements).

4. Budget allocation in relation to population and apartment prices. Figure 4 compares three normalised indicators across districts: the share of participatory budgeting allocation (B1), the share of total population (P1), and the share of average apartment price per m² (M2). All values are expressed as proportions within their respective totals.

The budget-to-population ratio reveals where participatory budgeting may reinforce or compensate for spatial inequalities in public space investment.

First, the distribution of budget shares is uneven across districts. One district (Almalinsky) accounts for the largest budget proportion (approximately 0.30), substantially exceeding its corresponding population and housing price shares (around 0.12–0.14). In contrast, several districts display comparatively modest budget proportions ranging between approximately 0.04 and 0.12.

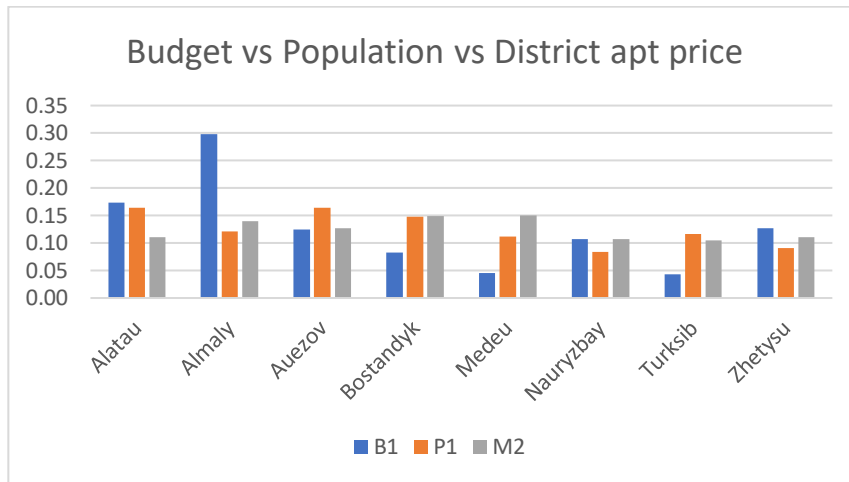


Figure 4. Average budget per project

Second, population shares are more evenly distributed across districts than budget shares. Most districts fall within a relatively narrow range (approximately 0.08–0.16), indicating a more balanced demographic distribution compared to the concentration observed in budgeting.

Third, apartment price shares also cluster within a moderate range (roughly 0.10–0.15) and appear more evenly spread than budget allocations. Overall, the figure demonstrates visible differences in how budget proportions align with demographic weight and housing price indicators across districts.

1. Spatial Differentiation of Civic Activation. The variation in votes per project reveals distinct spatial patterns of civic activation across districts [22,23]. Voting levels are different in each area. Some projects get many votes, while others receive fewer but more consistent participation [24]. From an urban planning perspective, this suggests that participatory dynamics are embedded within differentiated neighbourhood structures [24,25].

Districts characterised by mixed-use density, active public interfaces, and established community networks may generate stronger collective mobilisation around specific spatial interventions [22–24]. Conversely, districts with fragmented urban fabric or lower levels of public space interaction may exhibit more moderate or homogeneous engagement patterns [22,24,26]. The distribution of votes, therefore, reflects not only civic interest but also the spatial conditions that facilitate collective organization [22,24].

2. Threshold Attainment and Urban Territorial Capacity. The uneven number of projects surpassing the 50-vote threshold [27] indicates variation in territorial project-generation capacity [27]. Certain districts produce a high volume of qualifying initiatives, while others contribute relatively few [27].

In urban morphological terms, this may correspond to differences in block structure, residential density [24,28], and the availability of identifiable micro-territories (courtyards, playground clusters, local parks) that lend themselves to project-based intervention [22,27]. Areas with clearly defined spatial units may more easily translate spatial concerns into structured proposals [29,30], while more diffuse or infrastructurally dominated districts may struggle to articulate interventions within the participatory format [26,27]. Thus, the threshold operates not only as a participatory filter [26] but also as a spatial selector, privileging districts with stronger neighbourhood coherence [22,27].

3. Project Typology as Expression of Everyday Urbanism. The predominance of specific project categories—particularly greening (L4+), yard improvements (L2), playgrounds (L1), and small public space enhancements (L5)—reflects a clear orientation toward everyday urbanism [30]. Rather than proposing large-scale infrastructural transformation, residents prioritise incremental spatial upgrades within the immediate residential environment [31].

This typological pattern aligns with contemporary planning discourse that emphasises human-scale interventions, micro-public spaces, and tactical improvements to the urban realm [22]. The concentration in L4 (planting and greening) across multiple districts indicates demand for ecological enhancement and environmental comfort within dense residential areas [30,32]. Similarly, the presence of L5 (alleys, small architectural forms, parks) signals interest in placemaking and spatial identity at the neighbourhood level [27,32].

The variation in typology between districts suggests that urban form and landscape condition influence the type of spatial improvements perceived as most urgent [24,32]. 4. Budget allocation and spatial equity. The comparison between budget shares, population proportions, and apartment-price indicators reveals differentiated spatial investment patterns [33]. In some cases, budget allocation appears concentrated beyond demographic proportionality, while in others it remains comparatively modest relative to structural indicators [24,34].

From a planning standpoint, this raises questions of spatial equity and distributive justice in the urban environment [23,33]. If participatory budgeting is understood as a micro-infrastructure redistribution tool, then alignment between financial allocation and territorial need becomes a key design consideration [24]. Discrepancies may reflect differences in project scale, land availability, or spatial feasibility rather than purely demographic factors [28,31].

Moreover, districts with higher land values may face greater implementation costs for similar spatial interventions, potentially influencing the proportional budget distribution [24,28,33].

To strengthen the descriptive interpretation of the district-level differences, additional proportionality indicators were calculated. In particular, the analysis uses the ratio between the budget share and the population share in each district. This indicator allows us to assess whether the budget allocation is proportionally aligned with the demographic weight of each district.

The disproportionality ratio was calculated as follows:

$$\text{Budget-to-population ratio} = \text{Budget share} / \text{Population share} \quad [3]$$

A value above 1 indicates that a district receives a higher budget share relative to its population share, while a value below 1 indicates a lower budget share relative to its demographic weight.

The results indicate that budget allocation is unevenly distributed in relation to population shares. The most pronounced deviation is observed in Almaly district, where the budget-to-

population ratio reaches approximately 2.50. This means that the district's budget share is about 2.5 times higher than its population share.

Table 2. Budget-to-population proportionality ratio by district

District	Budget share	Population share	Budget-to-population ratio
Alatau	0.17	0.16	1.06
Almaly	0.30	0.12	2.50
Auezov	0.12	0.16	0.75
Bostandyk	0.08	0.15	0.53
Medeu	0.04	0.11	0.36
Nauryzbay	0.11	0.08	1.38
Turksib	0.04	0.12	0.33
Zhetysu	0.13	0.09	1.44

A relatively high ratio is also observed in Zhetysu and Nauryzbay districts. By contrast, Medeu, Turksib, and Bostandyk districts demonstrate ratios below 1, indicating comparatively lower budget allocation relative to their population shares. These results provide additional descriptive statistical support for the conclusion that budget allocation is not fully proportional to the demographic distribution across districts. At the same time, given the limited number of district-level observations, these results should be interpreted as descriptive evidence of spatial disproportionality rather than as proof of a causal relationship.

Conclusion

This study demonstrates that participatory budgeting in Almaty can be interpreted not only as a mechanism of citizen participation, but also as a micro-urban planning instrument for identifying and prioritizing local public space problems. The analysis of 197 project proposals across eight districts shows that residents primarily use participatory budgeting to address everyday spatial needs, including playgrounds, courtyard improvements, sport facilities, greening, alleys, small architectural forms, and local parks.

The findings reveal three key planning-relevant patterns. First, civic participation is spatially uneven: some districts generate a significantly higher number of qualifying projects and stronger voting activity, while others remain weakly represented. This suggests that participatory budgeting outcomes depend not only on formal access to the platform, but also on the ability of local communities to articulate spatial problems and mobilize support. Second, the functional structure of projects shows that participatory budgeting is especially relevant for neighbourhood-scale public space development. The concentration of projects in greening, courtyard improvements, playgrounds, and small public spaces indicates that residents use this mechanism to address deficiencies in the everyday urban environment rather than large-scale infrastructure transformation.

Third, the comparison between budget shares and population shares reveals disproportions in the territorial allocation of resources. The budget-to-population ratio shows that some districts receive a higher budget share relative to their demographic weight, while others remain

comparatively underfunded. This indicator can therefore be used by municipal authorities as a simple planning tool for monitoring spatial equity in participatory budgeting.

The practical implication of the study is that participatory budgeting data can support urban planning decisions when it is interpreted not only administratively, but spatially. Municipalities can use project categories, voting patterns, and proportionality indicators to identify underserved districts, adjust funding priorities, provide design support to underrepresented areas, and develop typology-sensitive guidelines for small-scale public space improvements.

The study is limited by its descriptive design and by the available project-level data. It does not measure the physical quality of implemented projects or long-term social outcomes. Future research should combine participatory budgeting data with spatial indicators such as green space per capita, accessibility to playgrounds and sport facilities, courtyard density, pedestrian connectivity, and implementation quality. Nevertheless, the present analysis shows that participatory budgeting can serve as an evidence base for more equitable and responsive micro-urban planning.

The contribution of the authors

S. G. Kazhenov — conceptualized the study, developed the research methodology, designed the data collection approach, collected and systematized the data, conducted the analysis, interpreted the findings, and contributed to drafting the manuscript.

A. S. Yermukhanova — contributed to data cleaning and verification, assisted in organizing the dataset, reviewed and edited the manuscript, improved the clarity and structure of the text, and supported the final preparation of the article.

References

1. Xu J. Environmental discourses in China's urban planning system: A scaled discourse-analytical perspective // *Urban Studies*. SAGE Publications Ltd, 2016. T. 53, № 5. C. 978–999. DOI: 10.1177/0042098015571054.
2. Majale M. Employment creation through participatory urban planning and slum upgrading: The case of Kitale, Kenya // *Habitat International*. Elsevier Ltd, 2008. T. 32, № 2. C. 270–282. DOI: 10.1016/j.habitatint.2007.08.005.
3. Mehta T. Imagining urban futures: Participatory scenario planning London's mobility to 2050 // *Urban Studies*. 2026.
4. Hardy P. Y. и др. Public policy design: Assessing the potential of new collective Agri-Environmental Schemes in the Marais Poitevin wetland region using a participatory approach // *Land use policy*. Elsevier Ltd, 2020. T. 97.
5. Hurtig M., Nielsen B. F., König T. Facilitating with care: reimagining participatory design through feminist ethics // *CoDesign*. 2026. C. 1–26.
6. Roman M., Fellnhöfer K. Facilitating the participation of civil society in regional planning: Implementing the quadruple helix model in Finnish regions // *Land Use Policy*. – 2022. – Vol. 112.
7. Caldeira T., Holston J. Participatory urban planning in Brazil // *Urban Studies*. SAGE Publications Ltd, 2015. T. 52, № 11. C. 2001–2017.

8. Herzog R. H. и др. Cities for citizens! Public value spheres for understanding conflicts in urban planning // *Urban Studies*. SAGE Publications Ltd, 2024. T. 61, № 7. С. 1327–1344.
9. Zhou X. и др. Examining collaborative planning processes and outcomes in urban regeneration: A deliberative turn in China? // *Urban Studies*. SAGE Publications Ltd, 2025. T. 62, № 4. С. 682–699.
10. Kourkouridis D., Frangopoulos I., Kapitsinis N. Urban governance and participatory planning in organizing and planning trade fairs. The case of Thessaloniki trade fair // *Cities*. Elsevier Ltd, 2024. T. 154.
11. Haklay M., Jankowski P., Zwoliński Z. Selected modern methods and tools for public participation in urban planning: a review // *Quaestiones Geographicae*. – 2018. – Vol. 37, No. 3. – P. 127–149.
12. Tseng Y. S., Becker C., Roikonen I. Dialectical approach to unpacking knowledge-making for digital urban democracy: A critical case of Helsinki-based e-participatory budgeting // *Urban Studies*. – 2024. – Vol. 61, No. 1. – P. 112–129.
13. Froughi M. et al. Public participation and consensus-building in urban planning from the perspective of heritage planning: A systematic literature review // *Cities*. – 2023. – Vol. 135.
14. Provenzano V., Seminara M. R. Democratic participatory networks and governance processes in Sicily // *Land use policy*. Elsevier Ltd, 2024. T. 144.
15. Özdemir E., Tasan-Kok T. Planners' role in accommodating citizen disagreement: The case of Dutch urban planning // *Urban Studies*. SAGE Publications Ltd, 2019. T. 56, № 4. С. 741–759.
16. Russeil V. и др. Food and electricity self-sufficiency trade-offs in Reunion Island: Modelling land-use change scenarios with stakeholders // *Land use policy*. Elsevier Ltd, 2023. T. 132.
17. Bartocci L. et al. The journey of participatory budgeting: a systematic literature review and future research directions // *International Review of Administrative Sciences*. – 2023. – Vol. 89, No. 3. – P. 757–774.
18. Sondou T. и др. Urban Planning Through Participatory Democracy: Analysis of Citizen Participation in Urban Planning in Ho (Ghana) and Kpalimé (Togo) // *Sustainability* (Switzerland). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. T. 17, № 3.
19. Afzalan N., Muller B. Online participatory technologies: Opportunities and challenges for enriching participatory planning // *Journal of the American Planning Association*. Taylor & Francis, 2018. T. 84, № 2. С. 162–177. DOI: 10.1080/01944363.2018.1434010.
20. Jiménez-Caldera J. и др. Methodological proposal for the inclusion of citizen participation in the management and planning of urban public spaces // *Cities*. Elsevier Ltd, 2024. T. 150.
21. Yu P., Zhang Y. A Satisfaction Study of Waterfront Public Spaces in Winter Cities from a Demand Perspective: A KANO-IPA Model Analysis Based on Northeastern China // *Land* (Basel). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. T. 14, № 1.
22. Heyik M. A. et al. Exploring citizens' perspectives on participatory design and planning: A comparative study across three capital cities // *Urban Governance*. – 2024. – Vol. 4, No. 2. – P. 101–112.

23. Schugurensky D., Mook L. Participatory budgeting and local development: Impacts, challenges, and prospects // *Local Development and Society*. Taylor and Francis Ltd., 2024. T. 5, № 3. C. 433–445.
24. Ahn B. и др. How Context Matters: Challenges of Localizing Participatory Budgeting for Climate Change Adaptation in Vienna // *Urban Plan*. Cogitatio Press, 2023. T. 8, № 1. C. 399–413.
25. Foroughi M. et al. Public participation and consensus-building in urban planning from the perspective of heritage planning: A systematic literature review // *Cities*. – 2023. – Vol. 135.
26. Atakhanova Z., Baigaliyeva M. Kazakhstan's Infrastructure Programs and Urban Sustainability Analysis of Astana // *Urban Science*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. T. 9, № 4.
27. Yu. V. Aidargazina. Comprehensive study of the implementation of the People's Participation Budget in the Republic of Kazakhstan. SP 'Primo, 2024.
28. OECD Urban Policy Reviews. 2017.
29. Akmentina L. E-participation and engagement in urban planning: experiences from the Baltic cities // *Urban Research & Practice*. – 2023. – Vol. 16, No. 4. – P. 624–657.
30. Szczepańska A., Zagroba M., Pietrzyk K. Participatory budgeting as a method for improving public spaces in major Polish cities // *Social Indicators Research*. – 2022. – Vol. 162, No. 1. – P. 231–252.
31. Cabannes Y. The impact of participatory budgeting on basic services: municipal practices and evidence from the field // *Environment and Urbanization*. – 2015. – Vol. 27, No. 1. – P. 257–284.
32. Costa C. S., Garcia-Esparza J. A., Kimic K. Participatory budgeting and placemaking: concepts, methods, and practices // *Urban Planning*. – 2024. – Vol.
33. Taylor C. R., Afshan S., Lawrence K. L. Participatory Budgeting for Social Equity: A Comparative Analysis // *Public Adm*. John Wiley and Sons Inc, 2025. T. 103, № 4. C. 1004–1021.
34. Ahn B. и др. How context matters: Challenges of localizing participatory budgeting for climate change adaptation in Vienna // *Urban Planning*. Cogitatio Press, 2023. T. 8, № 1. C. 399–413. DOI: 10.17645/up.v8i1.6067.

Information about the authors:

S. G. Kazhenov – PhD in the Management Engineering profile, Senior Lecturer, Department of «Organization of Transportation, Traffic, and Operation of Transport», Faculty of Transport and Energy, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

A.S.Yermukhanova – Master of Technical Sciences, Lecturer, Department of «Organization of Transportation, Traffic, and Operation of Transport», Faculty of Transport and Energy, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Review

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-94-108>

Principles of integrating education and production in the architecture of training and production complexes

U.N. Ismagulov* , **K.K. Arynov** , **A.M. Saurbayeva** 

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

E mail: ismagulov.un@gmail.com, arynov_kk@enu.kz, asaurbayeva_am_1@enu.kz

Abstract. This article examines approaches to the design of educational buildings and campuses that combine educational and industrial functions. Based on an analysis of international experience, principles for the architectural integration of education and industry have been identified. Case studies from France, Italy, the USA, and other countries are examined, where lecture theatres are located alongside workshops, laboratories, and production facilities. The key principles identified are: functional integration, spatial openness, adaptability of spaces, and partnership with industry. The authors justify the need to design flexible, multifunctional spaces that connect workshops, laboratories, classrooms, and industrial facilities through a common structural and spatial system. Projects and initiatives are used to demonstrate how architecture facilitates the convergence of theoretical education and real-world production practices, stimulating the 'academia-industry' innovation cycle. The results presented illustrate the importance of open learning spaces, visible interaction between students and industry, and infrastructural solutions for effective integration. The conclusions drawn can serve as a basis for developing design methods for educational and industrial complexes aimed at training highly qualified personnel.

Keywords: integration into architecture, educational complex, functional integrity, multifunctionality, collaborative spaces, flexible premises.

Introduction

The modern economics of buildings, the requirements of the fourth industrial revolution and specialised training make it necessary to combine educational and production functions in architecture and place new demands on educational systems. Due to the shortage of qualified personnel, there is growing interest in integrating learning and production (industrial practice) processes [1, 2]. New types of educational buildings are emerging – “knowledge factories” – where students learn not in isolated classrooms, but in conditions close to real production. The concept of “integration of education and production” implies a combination of theoretical training and practical activities, where educational programmes are closely linked to the real production cycle. In scientific literature, the concept of a ‘Learning Factory’ is described as a learning environment that includes authentic production processes, multi-module lines, real product manufacturing, and a mixed approach to learning (formal and informal) [3]. According to Ifenthaler and Roll (2021), such spaces simulate real production chains, facilitating the practical acquisition of competencies [3].

International experience demonstrates various architectural strategies where university research is intertwined with industrial enterprises to solve this problem. For example, since the 1970s, the United States has been implementing Cooperative Research Centres and Engineering Research Centres, which combine the scientific potential of universities and enterprises. Architect Frederick Fisher created Iovine & Young Hall (2019), which is called the ‘21st-century learning factory’. There, classic lecture halls coexist with workshops and maker spaces connected by common ‘collision’ zones for cross-disciplinary interaction [4]. In the 1980s, science parks and technology parks began to emerge at universities in Europe (e.g., Heriot-Watt University in Edinburgh, Trinity College in Cambridge, Louvain-la-Neuve in Belgium) [1, 2, 5]. In Italy, the Learning Factory project (architect Walter Nicolino, 2020) converted a former factory into a university for applied arts, preserving its large industrial spaces and ‘democracy of views’ through transparent partitions [6]. In Belgium, the T2 Academy (architect Kempe Thill, 2020) combines theory and practice in a single building with concert workshops and exhibition areas [7]. These trends have led to modern campuses increasingly being designed as ecosystems that combine teaching, research and production.

In domestic academic practice, the integration of education, science and industry is regarded as a key factor in the innovative development of Kazakhstan’s economy. It is noted that the integration of educational, research and industrial activities contributes to the formation of a complete cycle of specialist training—from the acquisition of knowledge to its application in actual industrial practice [8]. Researchers are also examining the architectural principles underlying the development of training and production centres. In particular, they highlight the need to integrate educational, industrial and public areas within a single spatial framework, as well as to establish a typological network of such facilities across different settlement levels [9].

Contemporary research also emphasises that, for the Republic of Kazakhstan, the integration of education, science, and industry should be regarded as the primary mechanism for modernising the economy and enhancing the competitiveness of national universities. In particular, emphasis is placed on the need to adapt international models of integration to local conditions and market needs [10].

In an architectural context, integration means creating spaces that simultaneously perform the functions of teaching and production. The aim of this research is to identify the principles of such integration based on foreign practices and examples. The article analyses examples of educational

institutions and scientific and production complexes, and highlights approaches to the design of educational and production spaces. The article is based on a review of literature and design publications, as well as case studies of well-known architectural projects in the field of ‘university-factory,’ ‘learning factory,’ and technology parks [11, 12]. Based on publications and descriptions of real projects, recommendations are formulated for the planning, design, and functional solutions of such complexes.

The methodology

The study was conducted using a combined approach, which included a systematic review of foreign literature and an analysis of architectural case studies on the topic of combining education and production. First, an analysis was conducted of scientific publications, reports, and monographs on the topic of combining educational and production systems (research on learning through practice and dual education models). Secondly, foreign architectural examples of campuses and educational institutions were examined, where classrooms, laboratories and production workshops are combined in a single complex. The selected case studies include projects in different countries and on different scales, demonstrating various aspects of integration: from digital production laboratories to large-scale campuses with industrial production areas. By comparing the characteristics of these examples, general principles for the design of ‘educational and production’ spaces in architecture have been formulated.

Findings/Discussion

An example of a hybrid campus and education-production centre.

The WBF Lab project (Teaching and Research Winery and August A. Busch III Brewing and Food Science Laboratory) at the University of California, Davis, exemplifies an architectural realisation of a model in which educational, research and production functions are integrated into a single spatial and technological system. The complex was originally conceived as an environment that ‘integrates laboratory research with applied process technologies’, enabling students and researchers to directly test theoretical hypotheses under conditions approximating industrial ones. The key idea behind the project is to bridge the gap between academic knowledge and industrial practice, which is achieved through the spatial and functional integration of the various stages of the production cycle [13].

One of the fundamental principles is the integration of so-called bench-top science (laboratory science) with applied process technologies. In architectural terms, this means that laboratories, teaching spaces and production lines are not isolated, but form a single chain in which:

- theoretical research transitions into experimentation;
- experimentation transitions into prototyping;
- prototyping transitions into pilot production.

This approach creates a continuous ‘research – development – production’ cycle, within which the educational process is integrated into real-world technological operations. As a result, students are given the opportunity to ‘directly test theories and validate new production processes [13].

The building’s layout (Figure 1) is governed not by formal composition, but by the logic of technological flows. The production areas (winery, brewery, food laboratories) are complemented by:

- analytical laboratories (quality control, diagnostics);
- teaching rooms;
- support areas (storage, refrigeration, raw material processing).

All these elements are integrated into a single system, in which each functional unit fulfils both an educational and a production role. At the same time, each production line is given a specialised spatial layout, whilst retaining shared infrastructure elements: laboratories, offices and storage areas [13].



Figure 1. Functional zoning of the WBF Lab project

Crucially, the layout ensures direct accessibility of production processes for teaching, visual and functional links between stages, and the ability to conduct research and production simultaneously.

The WBF Lab functions not only as a university facility but also as a platform for interaction with industry. The building is positioned as a 'link between academic research and industrial application' [14].

This manifests itself in several ways:

- the involvement of industry representatives in the development and testing of technologies;
- the use of the facility as a pilot site for testing production processes;

Access for external specialists to the laboratory and production infrastructure.

From an architectural perspective, this requires:

- flexibility in planning solutions,
- versatility of technological spaces,
- the ability to scale processes.

The result is a hybrid institutional model in which the educational environment becomes part of the production ecosystem.

Learning factory.

Contemporary architecture of educational spaces is characterised by a shift from traditional functional separation towards the integration of learning and practical activities. One of the key approaches is the Learning Factory concept, which involves creating an environment in which the educational process is directly linked to industrial practices. Such spaces provide the conditions for learning by doing and enable the simulation of real-world professional scenarios. In the academic literature, the Learning Factory is defined as an environment that combines learning, research and production processes into a single system for training specialists [15]. The theoretical basis for this approach is the concept of experiential learning, developed by David Kolb, according to which learning is a process based on experience and its reflection. Within this model, the direct interaction of the learner with a real or simulated professional environment plays a key role [16].

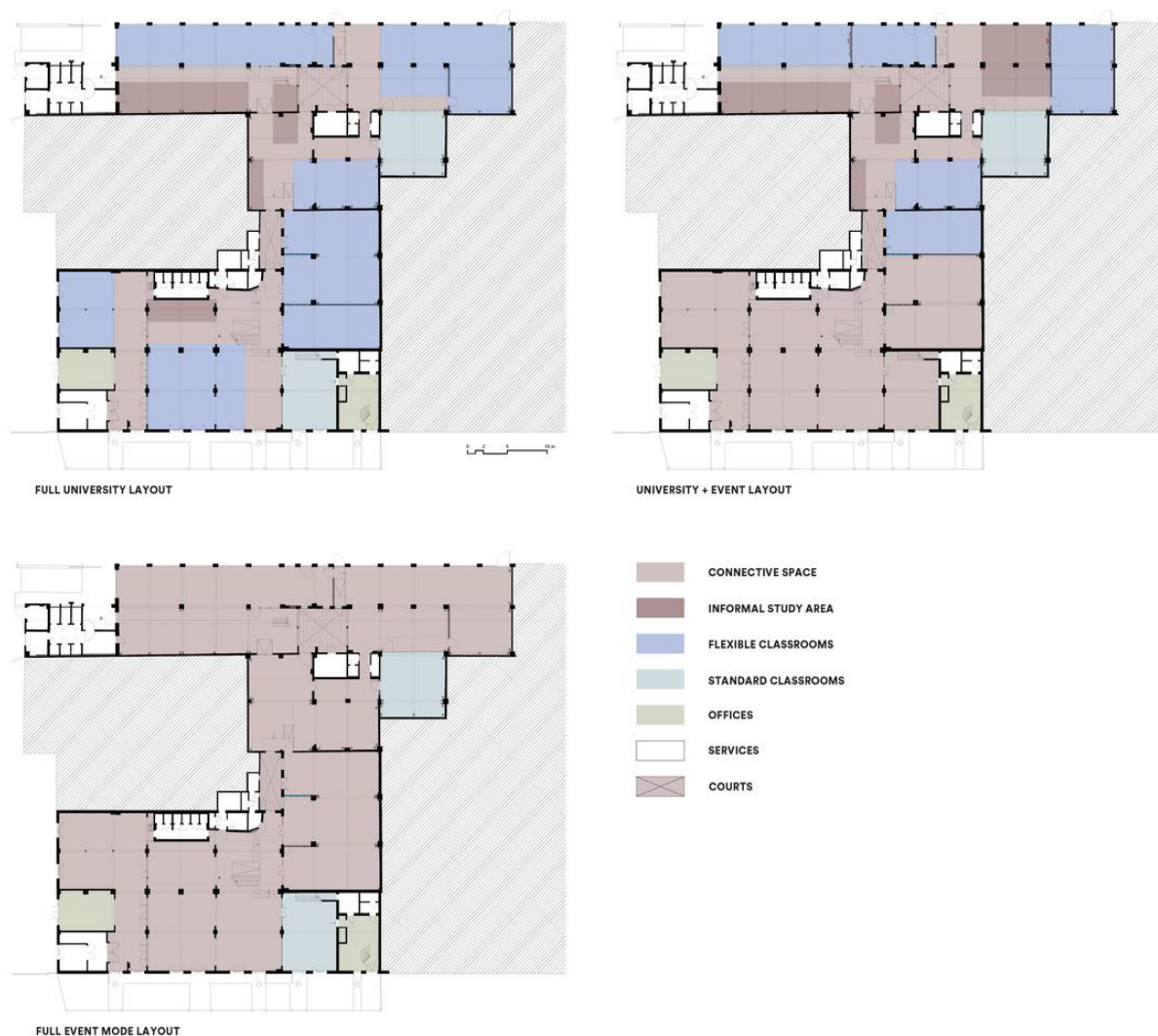


Figure 2. The zoning scheme of the Learning Factory* (WNA Walter Nicolino Architects, Italy)

In the project The Learning Factory* (WNA Walter Nicolino Architects, Italy), the integration of educational and production functions is achieved through spatial continuity and functional overlap. The architectural design comprises a single volume within which there is no rigid division

between classrooms and production workshops. The layout (Figure 2) is organised in such a way that the user's movement through the building becomes part of the educational process, ensuring constant contact with the production environment. The visual openness and accessibility of processes contribute to the formation of an intuitive understanding of technological operations and enhance student engagement [6].

Architectural integration in this project is achieved through continuous circulation routes, including ramps and transitional spaces that connect various functional zones. This aligns with contemporary approaches to designing educational environments, where openness, flexibility and the visual connectivity of spaces play a key role. Such characteristics foster the formation of interdisciplinary connections and enhance the effectiveness of learning [17].

In the Training Centre + Workshops for Apprentices project (Atelier Téqui, France), the integration of educational and production functions is achieved through vertical zoning (Figure 3). The production workshops are located on the ground floor, whilst the training facilities are situated on the upper floors. Despite this functional separation, the architectural design ensures a close connection between the levels through visual openings and compact circulation routes. This structure allows for the maintenance of specialised conditions for different types of activities, whilst simultaneously uniting them into a single educational system [18].



Figure 3. The zoning scheme of the Training Centre + Workshops for Apprentices project (Atelier Téqui, France)

Note: orange – production workshops, yellow – training facilities, blue – common spaces, purple – living areas

This model is consistent with contemporary research in the field of vocational education, which emphasises the need for a balance between functional specialisation and the integration of processes. An effective educational environment must simultaneously ensure safety, technological efficiency and accessibility for learning, which is achieved through thoughtful spatial organisation and visual connections between functions [19]. An analysis of the two projects reveals two main approaches to integrating educational and industrial functions: a horizontal approach, based on spatial integration, and a vertical approach, involving their distribution across different levels. Despite their differences, both approaches aim to create an environment in which learning becomes inseparable from practical activity. In this context, architecture acts as an active tool in

the educational process, determining the nature of the user's interaction with the industrial environment.

Architectural and spatial integration strategies

Circulation axis ('education-production axis'). Many projects integrating educational and production functions feature a single central axis or 'spinal' route along which user movement is organised. For example, at the İzmir Agriculture Development Centre (Sasalı Biolab), the key element is a bioswale – a forest-forming biochannel along which the educational and production areas are linearly arranged [12]. Movement from the entrance along this axis leads visitors first through the educational premises (classrooms, laboratories), then to the 'eco-market' (a combination of educational and agricultural areas), and further to the agricultural fields and greenhouses (Figure 4).

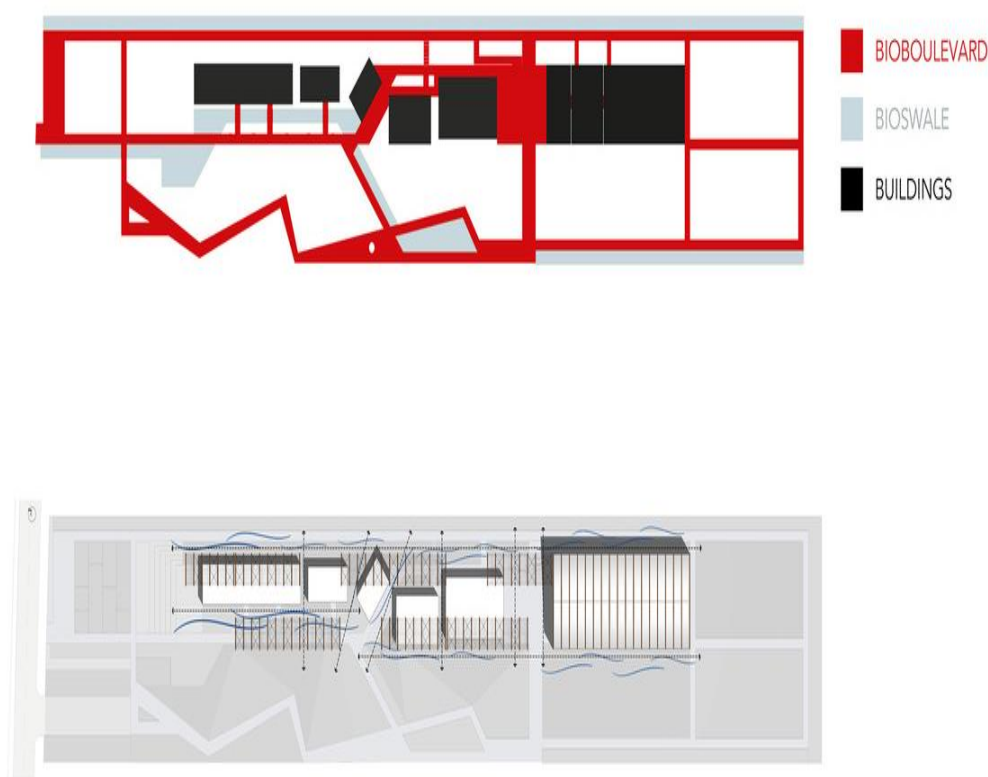


Figure 4. Diagram of connections and user routes at the İzmir Agriculture Development Centre

This approach ensures a transparent link between theory and practice: students physically pass through production areas, observe and participate in farming training processes. Similarly, at the Technical Campus Blue Gate (Belgium), training workshops and classrooms are located around a central core with a freight lift (Figure 5) [5]. The vertical 'vertex' of the building serves as an axis of movement – cargo and students are lifted to the upper floors to the workshops. This system allows students to constantly see the production process and facilitates the delivery of materials between levels (freight lifts, conveyors, fenced-off 'sectional' staircases) [5, 12].

Interference between educational and industrial functions. The architecture of integrated campuses often seeks to mix functions so that teaching spaces and production areas border or partially overlap visually.



Figure 5. Location of training workshops and classrooms around the core of the building
Note: blue – training workshops and classrooms, green – central core

At the Bologna Learning Factory (Italy), traditional closed classrooms are adjacent to flexible workshops separated from each other by transparent partitions (Figure 6) [6].



Figure 6. Cross-section of the Bologna Learning Factory

Glass walls between classrooms and other spaces ensure ‘democracy of views’ – students and teachers can see what is happening on both sides of the screen. This creates additional motivation and promotes the exchange of ideas: school lessons flow into practical work at workstations. Similarly, in the CMU (Carnegie Mellon) workshop laboratories, the openness and visibility of students’ model-making work helps teachers and industry partners observe the progress of projects. This strengthens the connection between theory and practice, as learning ‘in plain sight’ reveals meaningful connections.

Vertical integration (‘vertical factory’). Limited space may result in workshops and production facilities being located above teaching spaces. This is how the ‘vertical factory’ design came about in the Blue Gate project [5]. The designers realised that the responsibilities for ensuring technical regulations (ventilation, strength, safety) became more complicated on the upper floors, so the building was conceived as a “multi-storey factory” [5]. This creates a strong reinforced frame designed to withstand the weight of heavy equipment and possible redevelopment [5]. In architectural terms, this is reflected in a mixture of ‘heavy’ industrial elements (freight shafts, reinforced floors) and educational blocks: horizontal glazing for classrooms and tall windows for workshops (to maximise light and visual communication) [5]. This approach requires consideration of the engineering standards of an industrial building (damage resistance, fire safety, noise insulation, etc.), but allows functions to be synthesised in a limited area.



Figure 7. Transformable space Bologna Learning Factory

Flexibility and transformability of space. Projects integrating education and production require adaptability. Spaces must be easily reallocated for various educational and production tasks. At the Bologna Learning Factory, great attention is paid to the mobility of the interior:

partitions, hanging curtains and portable furniture allow the area to be quickly reconfigured from a lecture hall to an exhibition or laboratory (Figure 7) [6].

This allows for joint project sessions with industry partners and prototype exhibitions [6]. This approach facilitates the integration of learning with practice, as a group of students can switch to a real production task at any time.

Table 1. Analysis of the applied principles of integration of production and business in foreign projects

Project	Principles	Notes
Greenspoint Studios and Learning Commons (Houston, USA)	1. The 'bench-to-production' principle: continuity between educational and production processes	The spatial layout is organised around technological flows, integrating production, laboratory and teaching areas into a single system
	2. Spatial integration through technological logic	Teaching, research and production are integrated through spatial interconnectivity and operate as part of a unified process
	3. Integration with industry as a spatial and organisational principle	The building functions as a platform for interaction between the university and industry for joint research and technology implementation
Training Center + Workshops for Apprentices (Atelier Téqui, France)	4. The principle of spatial connectivity	Vertical zoning that maintains a visual and functional connection between the workshops on the ground floor and the teaching spaces on the upper floors, facilitating a smooth transition from theory to practice
İzmir Agriculture Development Center (Izmir, Turkey)	5. A single circulation system (vertical/ horizontal) connecting educational and production facilities	This system allows the student audience to constantly see the work of production and facilitates the supply of materials between levels (freight elevators, conveyors, enclosed "sectional" stairs)
Blue Gate (Antwerp, Belgium)		
Bologna Learning Factory (Bologna, Italy)	6. Creation of modular, flexible spaces (multi-transformable classrooms/laboratories)	The ability to quickly switch between training and research/production. This approach facilitates the integration of learning with practice, so that at any moment, a group of students can switch to the real task of production.
	7 The principle of 'learning by doing'	The creation of a single open-plan space in which teaching and production areas are integrated, and students are directly involved in real-world production processes
CMU (Pittsburgh, USA)	8. Visual and functional transparency between classes and production	Providing direct visibility of processes and products (for example, through glazing, viewing galleries, demonstration areas). This strengthens the relationship between theory and practice, as learning "in plain sight" reveals semantic connections.

Social and institutional integration. The architecture of the educational space should support not only technical but also social connections with production partners. The Blue Gate project deliberately mixes student contingents of different levels (work/learn school and adult courses) and neighbours with businesses in the business park [5].

This creates a favourable environment for internships and employment. For example, the 'public space' at Greenspoint Studios connects the educational programme with the local community, while the Learning Factory's demonstration areas encourage companies to visit the projects [13]. This convergence is architecturally realised through the presence of open galleries, conference rooms and laboratories with the participation of industry mentors.

Results of the analysis of the principles of integration in foreign projects.

Based on the analysis of foreign projects, unique principles of integration of production and education (Table 1) were identified in various aspects, ranging from the hybridisation and conversion of abandoned factories to the implementation of architectural strategies in new projects. Thus, the architectural design of educational and industrial complexes boils down to combining the 'building' and the 'factory' into a single organism. This is achieved through strategic zoning, engineering systems, interior design solutions, and the overall configuration of the building. Successful integration makes training more practical and quicker to adapt to industry demands, while enterprises gain useful scientific and human resources potential [1, 13].

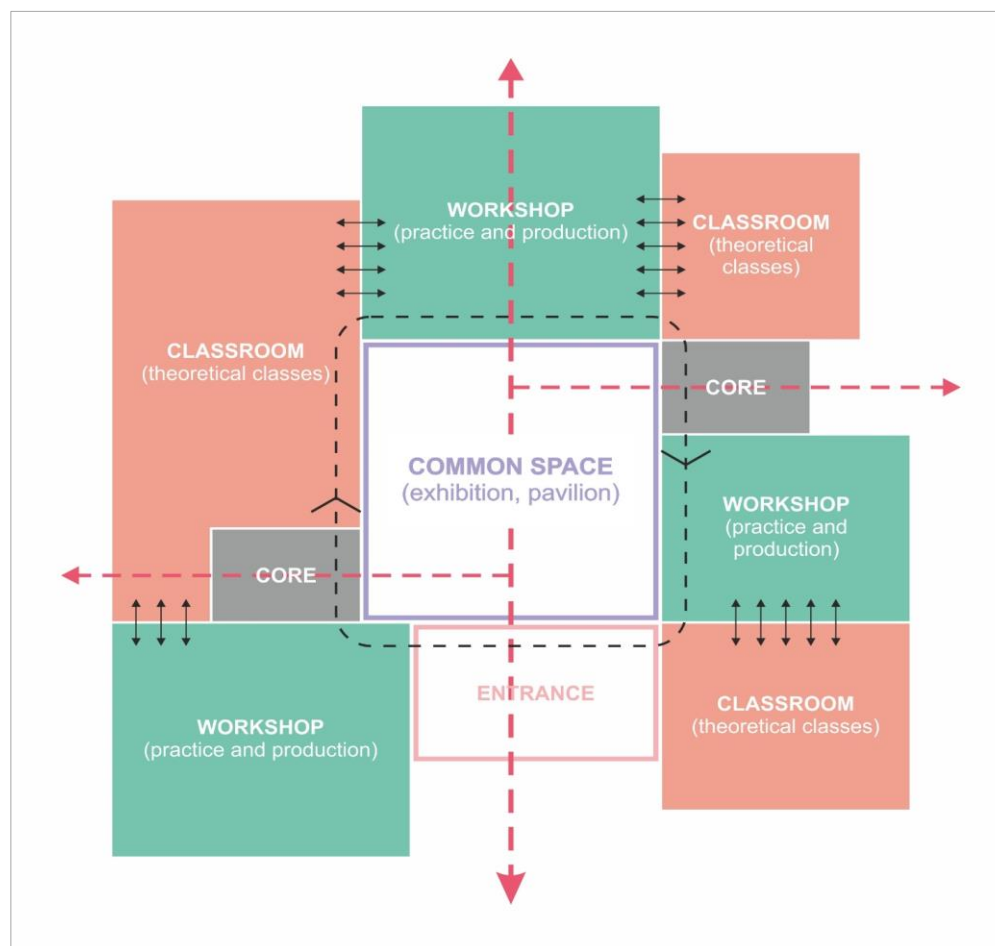


Figure 8. Conceptual model of integration of educational and production functions
Conceptual model of an educational and production complex.

Based on the analysis of foreign examples and the identified principles, a general conceptual model of the integration of educational and production functions can be formed through the implementation of accompanying principles, which is reflected in Figure 8.

This conceptual model can serve as a basis for the further design of new educational and production centres or the refurbishment/reconstruction of abandoned factories. The model is based on the following principles:

- **Structural integrity.** Creating a unified architectural structure in which educational and production facilities are organised as parts of a common 'cluster' or campus (e.g., through a common route or building core archdaily.com archdaily.com). This facilitates movement and exchange between classrooms, laboratories, and production areas.
- **Physical coupling of functions.** Designing buildings so that teaching spaces are directly adjacent to workshops, laboratories, and equipment areas. The boundaries between them can be transparent or movable so that teaching is closely linked to practice.
- **Shared spaces.** Designing common areas where students, teachers, and industry representatives can meet and work together. These 'interzonal' spaces (open labs, coworking spaces, exhibition galleries) connect educational and production units and stimulate interdisciplinary interaction.
- **Spatial openness and visual connection.** Effective interaction between educational and production areas is achieved through transparent divisions and large openings. This 'democracy of views' creates an open learning environment. Open atriums, courtyards and gaps between floors become places for collective communication, enhancing the exchange of ideas between students and production workers.
- **Flexibility of use.** The use of transformable and multifunctional spatial systems (movable partitions, modular furniture, universal laboratories) allows rooms to be adapted to various educational and industrial tasks.
- **Infrastructure provision.** Taking into account special engineering requirements: reinforced structures, ventilation, power supply, transport communications (e.g., freight lifts for delivering materials to training workshops). The architecture must provide for the possibility of placing heavy equipment and safe operation within the building.
- **Information and technical integration.** Inclusion of digital platforms and 'digital twins' in the project to simulate production processes. As the practice of Werk150 and other laboratories shows, the use of virtual production systems (3D printing, robots) is often closely linked to the architecture of the premises where these technologies are located.

Conclusion

The study shows that the integration of educational and industrial functions within architectural design is not merely a spatial or functional challenge, but also a strategic tool for modernising the higher education system. A key finding is that the effectiveness of such integration is determined by the creation of an architectural environment of the 'educational-industrial ecosystem' type, in which teaching, research and real-world industrial processes are combined into a single spatially and functionally interconnected structure.

From a practical perspective, the paper formulates a set of architectural and planning principles applicable to the design of modern university campuses in Kazakhstan. These include: the organisation of continuous spatial connections between educational and production zones, the introduction of flexible and transformable spaces, and the creation of open production areas

integrated into the educational environment. Implementing these solutions can significantly bridge the gap between theoretical training and practical skills, which is one of the key challenges facing higher education in the country.

At the national development level, the implementation of these principles could serve as a key tool for diversifying Kazakhstan's economy and reducing its dependence on the raw materials sector. Integrating production into the university system helps to train specialists who are attuned to the real needs of industry, whilst also stimulating the development of engineering, technological and applied disciplines. Furthermore, such spaces lay the foundation for building sustainable links between universities, industrial enterprises and the private sector, which is particularly relevant in the context of implementing industrial and innovation development programmes.

For universities in Kazakhstan, the research findings point to the need to move away from the traditional campus model with its rigid functional divisions towards hybrid educational environments based on the principle of 'learning by doing'. In this context, architecture takes on the role of an active pedagogical tool, creating the conditions for practical learning, interdisciplinary interaction and student participation in real-world production processes. The implementation of such approaches will improve the quality of graduate training and their competitiveness in both the national and international labour markets.

Prospects for further research relate to the development of methodologies for assessing the effectiveness of education-industry collaboration spaces in the Kazakh context, including their impact on the quality of specialist training, the level of engagement with industry, and their contribution to regional innovation. Another important area is the adaptation of these principles to the country's various sectoral contexts — from industrial manufacturing and construction to the agricultural sector and the creative industries.

Contribution of the authors.

Ismagulov U.N. – collected literature and case-study projects for further study, created a conceptual model for the integration of production and business based on the analysis and identified principles. Translated the article.

Arynov K.K. – participated in the critical revision of the content of the article and in the approval of the final version for publication.

Saurbayeva A.M. – conducted an analysis of the collected literature and world projects. Identified the unique principles of integration and systematized the results in a table.

References

1. Werk150 Learning Factory. Bridging Theory and Practice Through the 3DEXPERIENCE platform [Electronic resource]. Available at: <https://www.3ds.com/insights/customer-stories/werk150-learning-factory>
2. Sanakulov K.S., Bazarova S.D. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva na opyte Navoiyskogo gosudarstvennogo gorno-tekhnologicheskogo universiteta [Integration of science, education and production based on the experience of Navoi State Mining and Technological University], Aktual'nye issledovaniya, 2023, No. 7 (137), Part II, pp. 45–50. Available at: <https://apni.ru/article/5683-integratsiya-nauki-obrazovaniya-i-proizvodstv>
3. Abele E., Metternich J., Tisch M., Chryssolouris G., Sihn W., ElMaraghy H., Hummel V., Ranz F. Learning factories for research, education, and training, Procedia CIRP, 2015, Vol. 32, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.187>
4. University of Southern California Iovine Young Academy. Fisher Partners [Electronic

- resource]. Available at: <https://fisherpartners.net/project/university-of-southern-california-iovine-young-academy/>
5. Technical Campus Blue Gate / POLO.platform. ArchDaily, 2024 [Electronic resource]. Available at: <https://www.archdaily.com/1012250/technical-campus-blue-gate-polo>
 6. The Learning Factory / WNA Walter Nicolino Architects. ArchDaily, 2024 [Electronic resource]. Available at: <https://www.archdaily.com/1014213/the-learning-factory-wna-walter-nicolino-architects>
 7. 0167 Education Centre T2-campus. Atelier Kempe Thill [Electronic resource]. Available at: <https://atelierkempethill.com/projects/0167-education-centre-t2-campus/>
 8. Murzakhmetov B.B. Integratsiya nauki, obrazovaniya, proizvodstva i biznesa v razvityh stranah mira [Integration of science, education, production and business in developed countries of the world] [Electronic resource]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-nauki-obrazovaniya-proizvodstva-i-biznesa-v-razvityh-stranah-mira>
 9. Aryonov K.A. Integration of education, science and production in architectural environment formation, ISVS e-journal, 2021, Vol. 9, No. 5, pp. 276–289 [Electronic resource]. Available at: https://isvshome.com/pdf/ISVS_9-5/ISVS_9.5.20_Aryonov.pdf
 10. Integration of education, science and production as a factor of innovative development of Kazakhstan. (2017). International Journal of Applied and Fundamental Research.
 11. Szabó D., Csikós F., Panker V., Kovács I. Learning factories in practice: The example and development proposal of Mini Company located in the automotive science park based on international best practices, Engineering Proceedings, 2024, 79(1), 56. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079056>
 12. İzmir Agriculture Development Center – Sasalı Biolab / Mert Uslu Architecture. ArchDaily, 2021 [Electronic resource]. Available at: <https://www.archdaily.com/974092/izmir-agriculture-development-center-nil-sasali-biolab-mert-uslu-architecture>
 13. WBF Lab / Flad Architects. ArchDaily, 2011 [Electronic resource]. Available at: <https://www.archdaily.com/168716/wbf-lab-flad-architects>
 14. Teaching and Research Winery and the August A. Busch III Brewing and Food Science Laboratory (WBF). Flad Architects, 2013 [Electronic resource]. Available at: <https://www.flad.com/content/epubs/UC-Davis-WBF-ResearchInnovation.pdf>
 15. Anselmann S., Faßhauer U., Windelband L. Investigating learning factories as a learning environment in vocational education and training, Creative Education, 2024, 15(7), 1337–1358. Available at: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=134521>
 16. Kolb, D. A. (2015). Experiential learning: Experience as the source of learning and development (2nd ed.). Pearson Education.
 17. Oblinger D.G. (Ed.). Learning Spaces. EDUCAUSE, Boulder, CO, 2006. Available at: <https://www.educause.edu/research-and-publications/books/learning-spaces>
 18. Training Center Residence and Workshops for Apprentices / Atelier Tequi Architects. ArchDaily, 2024 [Electronic resource]. Available at: <https://www.archdaily.com/1024420/training-center-residence-and-workshops-for-apprentices-atelier-tequi-architects>
 19. Tisch M., Metternich J. Potentials and limits of learning factories in research, innovation transfer, education, and training, Procedia Manufacturing, 2017, 9, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.027>

Information about the authors:

Ismagulov U.N. – corresponding author, Master of Architecture, Faculty of Architecture and Civil Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 01000, Republic of Kazakhstan, Astana, st. Kazhymukan, 13

Arynov K.K. – doctor of Architecture, Professor of the Department of Architecture, Faculty of Architecture and Civil Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 01000, Republic of Kazakhstan, Astana, st. Kazhymukan

Saurbayeva A.M. – PhD, Senior lecturer at the Department of Architecture, Faculty of Architecture and Civil Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 01000, Republic of Kazakhstan, Astana, st. Kazhymukan, 13



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-109-127>

Алгоритмическое проектирование как методологическая основа оптимизации инсоляции и ветровых потоков на этапе эскизного архитектурного формообразования

М.Шегенова^{1*} , Г.Мауленова¹ , А.Султанова² 

¹*Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан*

²*Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*

*E mail: shegenova.M@stud.satbayev.university, g.maulenova@satbayev.university,
sultanova_a@rudn.ru*

Аннотация. Современная архитектурная практика сталкивается с необходимостью учета климатических факторов уже на ранних стадиях проектирования, когда закладываются ключевые параметры пространственной, функциональной и экологической эффективности будущего объекта. Предметом настоящего исследования выступает методологический потенциал алгоритмического проектирования как инструмента трансформации эскизного проектирования в аналитически обоснованный процесс. Исследование носит теоретико-методологический характер и базируется на сравнительном анализе инструментальных платформ, обобщении подходов к климатическому моделированию и рассмотрении принципов многокритериальной оптимизации в архитектуре. В результате предложена концептуальная модель итеративно-интегрированного проектирования, в которой анализ инсоляции и аэрации рассматривается как активный фактор формообразования, а выбор решений осуществляется в пространстве компромиссов между климатическими, энергетическими, функциональными и архитектурно-художественными критериями. Обосновано, что алгоритмическое проектирование может рассматриваться как методологическая основа для перехода к «вычислительному эскизированию», обеспечивающему более высокий уровень согласованности проектных решений с требованиями устойчивого и климатически адаптивного проектирования.

Ключевые слова: алгоритмическое проектирование, вычислительное проектирование, инсоляция, ветровые потоки, оптимизация, эскизное проектирование, Dynamo, Grasshopper, BIM

Received 20.04.2026. Revised 20.05.2026. Accepted 12.06.2026. Available online 30.03.2026

* the correspondence author

Введение

Обоснование выбора темы и актуальность исследования обусловлены трансформацией современной архитектурной практики, которая все в большей степени ориентируется на принципы устойчивого развития, климатической адаптации и междисциплинарной координации проектных решений. Одним из ключевых противоречий раннего этапа проектирования остается несоответствие между необходимостью учета большого числа взаимосвязанных технических, экологических и климатических параметров и преобладанием интуитивно-художественных методов формообразования, характерных для традиционного эскизирования. В этих условиях возрастает потребность в инструментах, способных интегрировать аналитические процедуры в сам процесс поиска архитектурной формы, не подменяя творческое решение, а дополняя его объективными данными.

Актуальность темы усиливается тем, что именно ранние проектные решения во многом определяют последующие показатели энергоэффективности, инсоляционного режима, аэрации и эксплуатационного качества здания. В связи с этим алгоритмическое проектирование рассматривается не просто как цифровой инструмент, а как новая логика организации проектного процесса, предполагающая переход от линейной модели «эскиз – анализ – корректировка» к итеративно-интегрированному подходу, в котором анализ становится частью самого формообразования.

Дополнительную актуальность исследованию придает тот факт, что здания продолжают оставаться одним из крупнейших источников энергопотребления и связанных с ним выбросов углекислого газа. В современной научной литературе подчеркивается, что на здания приходится около 36% мирового конечного энергопотребления и почти 39% энергетически обусловленных выбросов CO₂, что делает ранние проектные решения критически значимыми с точки зрения устойчивого развития. В этих условиях переход к алгоритмически поддерживаемому проектированию приобретает не только технологическое, но и экологическое значение, поскольку позволяет включать вопросы энергоэффективности в логику формообразования уже на стадии концепции [1].

Настоящая работа представляет собой теоретико-методологическое исследование, направленное на системную разработку и научное обоснование целостной модели применения алгоритмического проектирования для климатической оптимизации на стадии эскизного формообразования. В отличие от прикладных исследований, ориентированных на апробацию конкретного проектного кейса, данная статья сосредоточена на концептуализации принципов, инструментов и логики интеграции алгоритмических методов в ранние стадии архитектурного проектирования.

При этом важно подчеркнуть, что BIM в современном понимании представляет собой не просто программный инструмент трехмерного моделирования, а более широкую процессную парадигму, охватывающую координацию данных, взаимодействие участников проекта и сопровождение объекта на протяжении жизненного цикла. В таком контексте интеграция алгоритмического проектирования с BIM означает не добавление еще одного цифрового инструмента, а изменение самой логики принятия проектных решений, при которой аналитические данные становятся частью единого информационного контура проектирования [2].

Научная новизна исследования заключается в синтезе разрозненных подходов – параметрического моделирования, динамического анализа инсоляции, упрощенного моделирования ветровых потоков, многокритериальной оптимизации и BIM-интеграции –

в единую методологическую модель итеративно-интегрированного проектного процесса. Существенным элементом новизны является также акцент на ограничениях алгоритмического подхода и на определении кураторской роли архитектора в принятии проектных решений.

Целью исследования является разработка и теоретическое обоснование методологии применения алгоритмического проектирования в средах Grasshopper и Dynamo для учета инсоляционного и ветрового режимов зданий на этапе эскизного проектирования.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи исследования:

1. Провести сравнительный анализ инструментальных платформ Grasshopper и Dynamo в контексте их потенциала для климатического анализа.
2. Раскрыть теоретико-методологические основы интеграции анализа инсоляции и упрощенного CFD-моделирования в процесс архитектурного формообразования.
3. Разработать концептуальную модель многокритериальной оптимизации архитектурной формы с учетом инсоляции, ветровых потоков и экологических критериев.
4. Определить перспективы интеграции алгоритмического проектирования с BIM, искусственным интеллектом и технологиями IoT.

Объект исследования – процесс эскизного архитектурного проектирования.

Предмет исследования – методология применения алгоритмического проектирования для учета и оптимизации инсоляции и ветровых потоков на ранних стадиях архитектурного формообразования.

Обзор литературы.

Существенный вклад в переосмысление самой логики инсоляционного анализа внесли Перейра и Сильва, показавшие, что традиционная ориентация на фиксированную продолжительность инсоляции не отражает реального воздействия солнечной радиации на качество среды. Один и тот же показатель продолжительности солнечного освещения может соответствовать различной дозе радиации в зависимости от времени года, атмосферных условий, ориентации фасадов и характера окружающих затенений. В связи с этим исследователи предлагают опираться не только на продолжительность солнечного воздействия, но и на различие «желательной» и «нежелательной» радиации, что особенно важно для климатически адаптивного проектирования [3]. Концепция солнечного конверта в этом контексте выступает как один из наиболее показательных примеров перевода климатического анализа в язык формообразующих ограничений. В классической интерпретации солнечный конверт определяется как предельный объем, который может занять здание при сохранении доступа инсоляции к соседним участкам. Важно, что данная концепция рассматривается не как универсальная формула, а как часть более широкой системы градостроительного и архитектурного регулирования, где инсоляционные требования должны быть встроены в общий баланс проектных целей, а не абсолютизированы [3].

Современные исследования, включая работы Квока и др. [4], демонстрируют растущий интерес к интеграции мультizonального CFD-анализа с инсоляционным моделированием для повышения точности прогнозирования микроклимата. Вопросы устойчивости активно разрабатываются в контексте жизненного цикла материалов (LCA), где подход Гомеса де Косара и др. [5] показывает эффективность интеграции генеративных алгоритмов с базами данных для снижения углеродного следа.

Значительный вклад в развитие инструментария вносят исследования по интеграции BIM и параметрических сред [6, 7], а также по автоматизации процессов оценки энергоэффективности и комфорта [8, 9, 10]. Работы по применению генетических алгоритмов для многокритериальной оптимизации в архитектуре [11], а также исследования, посвященные использованию методов машинного обучения для прогнозирования солнечной радиации и энергетических показателей зданий [12, 13], формируют теоретический фундамент для следующего этапа эволюции АП – генеративного дизайна.

Отдельного внимания заслуживают исследования, посвященные интеграции генеративных алгоритмов и LCA в BIM-среду на ранней стадии проектирования. Как показывает работа Гомеса де Косара и соавт., в существующей практике автоматизация и генеративный поиск нередко внедряются слишком поздно, когда основные решения о форме, конструкции и материальности уже во многом зафиксированы. Между тем именно начальная стадия проектирования обладает наибольшим потенциалом для экологической оптимизации, поскольку позволяет варьировать форму и состав ограждающих решений до того, как проект приобретает инерционную жесткость [5].

Однако анализ литературы выявляет пробел в исследованиях, связанный с недостаточной систематизацией комплексной методологии, которая бы объединила анализ инсоляции и ветровых потоков в единый, управляемый алгоритмами процесс эскизного формообразования, явно описывала теоретическую модель оптимизации и ее ограничения, в частности риск «переоптимизации» в ущерб архитектурной образности. Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела.

Методология

Методологическая основа исследования базируется на принципах алгоритмического и параметрического проектирования, интегрированных с подходами климатического анализа, BIM-моделирования и многокритериальной оптимизации. Исследование носит теоретико-методологический характер и направлено не на экспериментальную верификацию конкретного проектного решения, а на построение концептуальной модели применения алгоритмических инструментов для учета инсоляции и ветровых потоков на стадии эскизного проектирования.

Ключевой исследовательский вопрос формулируется следующим образом: каким образом алгоритмическое проектирование может быть системно встроено в процесс архитектурного формообразования для учета климатических факторов и повышения обоснованности проектных решений на ранних стадиях разработки?

В рамках исследования предлагается концептуальная модель итеративно-интегрированного проектирования, включающая следующие этапы:

1. Параметризация архитектурной формы

Геометрия здания описывается как функция набора переменных параметров, включающих габариты, ориентацию, углы наклона, коэффициент остекления, конфигурацию объемов и иные характеристики, влияющие на инсоляционный и аэродинамический режим объекта. Такой подход позволяет рассматривать архитектурную форму как изменяемую систему и формировать множество альтернативных решений в пределах заданного параметрического пространства. Выбор параметров, описывающих архитектурную форму, не является произвольным. В исследованиях, посвященных энергоэффективности и тепловому комфорту, неоднократно показано, что форма здания, его ориентация,

коэффициент остекления и пространственная конфигурация функциональных зон образуют взаимосвязанную систему факторов, определяющих как характер естественного освещения, так и тепловое поведение оболочки. Следовательно, именно эти параметры должны рассматриваться как приоритетные переменные в алгоритмически управляемом пространстве проектных решений [14].

2. Интеграция климатических данных

В модель вводятся климатические параметры, включая траектории движения солнца, погодные данные, характеристики ветрового режима, направления преобладающих потоков и иные показатели, обеспечивающие связь проектируемой формы с реальными условиями окружающей среды. За счет этого климатические факторы становятся не внешними ограничениями, а активными переменными архитектурного анализа.

3. Формирование целевых функций

Оптимизация архитектурной формы рассматривается как задача согласования нескольких целевых критериев: максимизации полезной инсоляции в холодный период, минимизации избыточной солнечной радиации в теплый период, улучшения ветрового режима в пешеходной зоне, а также снижения энергетической и экологической нагрузки, связанной с эксплуатацией и жизненным циклом здания.

4. Многокритериальная оптимизация

Поиск проектных решений интерпретируется через методы многокритериальной оптимизации, включая генетические алгоритмы, позволяющие формировать множество Парето-оптимальных альтернатив. В рамках такой логики оптимизация рассматривается не как поиск единственного наилучшего варианта, а как выявление области компромиссных решений, в которой улучшение одного показателя сопряжено с допустимым ухудшением другого.

Существенным направлением развития алгоритмического проектирования становится переход от реактивной экологической оценки к проактивному экологическому формообразованию. По данным Гомеса де Косара и соавт., интеграция эволюционных алгоритмов в BIM-модели позволяет не просто сравнивать уже подготовленные варианты, а автономно исследовать пространство решений и в режиме, близком к реальному времени, выявлять комбинации параметров, снижающие экологическое воздействие. Тем самым экологическая оценка перестает быть внешней процедурой контроля и становится частью логики проектного поиска [5].

В логике многокритериальной оптимизации ключевым понятием становится Парето-фронт, представляющий собой множество недоминируемых решений, в которых улучшение одного показателя возможно лишь ценой ухудшения другого. Для архитектурного проектирования это принципиально важно, поскольку задачи инсоляции, теплового комфорта, аэродинамики, материалоемкости и стоимости редко согласуются между собой без конфликта. Поэтому оптимизация в архитектуре должна пониматься не как поиск единственного «идеального» решения, а как структурирование пространства компромиссов, внутри которого архитектор осуществляет профессиональный выбор [11].

5. Интерпретация и отбор решений

Полученное множество альтернатив анализируется архитектором, который выступает в роли куратора процесса и осуществляет выбор проектного решения на основе не только количественных показателей, но и архитектурно-художественных, функциональных, контекстуальных и композиционных факторов. Тем самым вычислительные методы

рассматриваются как средство расширения пространства поиска, а не как замена профессионального суждения.

В рамках предложенной методологии используются две взаимодополняющие платформы: Grasshopper – для генерации геометрии и проведения интегрированного климатического анализа на ранних стадиях, и Dynamo – для последующей параметрической настройки, координации и аналитической работы в BIM-среде.

Ограничения методологии

Следует подчеркнуть, что предложенная модель носит концептуальный характер и предназначена прежде всего для теоретического описания и структурирования процесса климатически ориентированного алгоритмического проектирования. Рассматриваемые в статье подходы к анализу инсоляции и ветровых потоков на ранних стадиях проектирования основываются на упрощенных расчетных представлениях и не подменяют собой детальные инженерные расчеты, выполняемые на последующих стадиях разработки проекта. Кроме того, алгоритмическая оптимизация не должна рассматриваться как автономный механизм принятия архитектурного решения, поскольку существует риск переоптимизации, при котором количественные показатели начинают доминировать над художественными, функциональными и контекстуальными качествами архитектуры. В связи с этим в предлагаемой модели ключевая роль сохраняется за архитектором, который интерпретирует результаты анализа и осуществляет итоговый отбор решений.

Следует учитывать, что ранняя стадия проектирования неизбежно связана с высокой степенью неопределенности. Как отмечается в исследованиях по BIM-ориентированному энергетическому моделированию, точный прогноз энергетических характеристик здания на начальном этапе затруднен в силу сложности самой системы здания и ограниченности исходных данных. Поэтому результаты ранних климатических и энергетических оценок следует трактовать не как окончательные инженерные значения, а как инструмент направленного сравнения альтернатив и уточнения проектной логики. В этом заключается методологическая ценность алгоритмического подхода: он повышает качество предварительного выбора, не отменяя необходимости дальнейшей детальной верификации [13].

Результаты и Обсуждение

1. Теоретико-методологические основы алгоритмического проектирования в архитектуре

Эволюция архитектурного метода от параметризма к вычислительному проектированию сопровождается изменением самой логики работы архитектора. Алгоритмическое проектирование становится инструментом работы не столько с конечной формой, сколько с правилами ее генерации, основанными на взаимосвязи параметров, ограничений и критериев оценки. В этом контексте проектирование смещается от модели «дизайна объекта» к модели «дизайна поведения», в которой архитектурная форма рассматривается как ответ на динамические воздействия окружающей среды, включая солнечную радиацию, ветровые потоки и температурные условия.

Сравнительный анализ инструментальных платформ показывает (Таб.1), что Grasshopper и Dynamo занимают разные, но взаимосвязанные позиции в общем цифровом процессе проектирования. Grasshopper представляет собой наиболее гибкую среду для

свободного исследования геометрических систем и раннего концептуального формообразования.

Таблица 1. Сравнительный анализ возможностей Grasshopper и Dynamo для задач климатического анализа на этапе эскизного проектирования.

Критерий сравнения	Grasshopper	Dynamo	Комментарий/Рекомендация по применению
Основная философия и цель	Свободное параметрическое моделирование и исследование формы. Идеален для генерации и изучения сложной, нестандартной геометрии.	Автоматизация и управление данными внутри BIM-модели. Ориентирован на интеграцию параметрических методов в информационное моделирование.	Grasshopper – для концептуального поиска и свободного формообразования. Dynamo – для оптимизации и анализа уже заданной BIM-модели.
Гибкость и глубина геометрического моделирования	Высокая. Ядро системы – работа с чистой геометрией (NURBS). Позволяет создавать любые формы с нуля, управляя их логикой построения.	Ограниченная. Работа ведется с BIM-элементами (стены, окна, крыши) и их параметрами. Создание сложной геометрии с нуля требует обходных путей или связи с другими пакетами.	Grasshopper – лучший выбор для алгоритмического «скульптуринга» формы под влиянием климатических данных.
Интеграция с BIM и сквозной процесс	Опосредованная. Экспорт геометрии в BIM-среды для дальнейшей разработки. Прямой двусторонней связи с данными BIM (например, спецификациями) нет.	Прямая и глубокая. Неотъемлемая часть Revit. Позволяет напрямую читать, модифицировать и создавать BIM-элементы, обеспечивая полную трассировку данных на всех этапах.	Dynamo – ключевой инструмент для BIM-сопровождения климатически оптимизированной формы на поздних стадиях эскиза и рабочем проектировании.
Анализ инсоляции и солнечной радиации	Отличная, через плагины (Ladybug). Позволяет проводить динамический анализ по часовым данным годовой погоды, строить «солнечные конверты», карты изолиний, диаграммы пути солнца.	Удовлетворительная, нативная и через пакеты. Имеет базовые инструменты для солнечных исследований. Для глубокого анализа требуются сторонние пакеты (например, Refinery + Insight), которые могут уступать Ladybug в гибкости.	Grasshopper (Ladybug) – неоспоримый лидер для комплексного и динамического инсоляционного анализа на этапе формообразования.

Моделирование ветровых потоков (CFD)	Хорошая, через плагины (Butterfly, др.). Позволяет запускать упрощенные симуляции (например, на основе OpenFOAM) для визуализации потоков вокруг зданий непосредственно в среде скетчинга.	Ограниченная. Прямые CFD-расчеты внутри Dynamo редки. Чаще используется для подготовки геометрии и данных для передачи в специализированные CFD-пакеты (Autodesk CFD, др.).	Grasshopper – для быстрой интегративной оценки аэрации в итеративный цикл. Dynamo – для подготовки и передачи данных в специализированный софт.
Многокритериальная оптимизация (MCO)	Отличная, через плагины (Octopus, Wallacei и др.). Прямая интеграция с генетическими алгоритмами (NSGA-II) для поиска Парето-фронта. Позволяет связать форму, инсоляцию, ветер и стоимость в одной модели.	Доступная, через Refinery и др. Позволяет проводить оптимизацию на основе параметров BIM-модели. Может быть менее гибкой в настройке сложных целевых функций, связанных с чистой геометрией.	Grasshopper – для комплексной генеративной оптимизации формы. Dynamo – для оптимизации параметров (WWR, ориентация, материалы) в уже утвержденной объемно-планировочной структуре.
Скорость освоения и входной порог	Высокий. Требуется понимание логики алгоритмов и работы с данными. Более крутая кривая обучения.	Средний. Более понятен для пользователей Revit, так как оперирует знакомыми объектами (уровни, стены). Логика визуального программирования схожа.	Для архитектора, владеющего Revit, начать работу с Dynamo может быть проще. Grasshopper требует больше времени на освоение, но дает большую свободу.
Итоговая рекомендация для этапа	Основной инструмент для раннего эскизного проектирования (концепт). Максимальная гибкость для итеративного поиска формы, напрямую «заточенной» под климатический анализ.	Основной инструмент для углубленного эскиза и перехода к BIM. Лучший выбор, когда форма в целом определена и требуется ее детализация, анализ и оптимизация в рамках BIM-парадигмы с учетом реальных конструкций и материалов.	Идеальный рабочий процесс: Генерация и первичная климатическая оптимизация формы в Grasshopper – экспорт/пересоздание базовой геометрии в Revit – детальная параметрическая настройка и анализ в Dynamo.

Примечание: составлено авторами на основе анализа научной литературы и практики применения платформ.

Благодаря развитой экосистеме плагинов она позволяет интегрировать климатический анализ непосредственно в процесс генерации архитектурной формы. Dynamo, в свою очередь, ориентирована на работу внутри BIM-среды и обеспечивает

параметрическое управление данными, объектами и аналитическими сценариями в рамках информационной модели здания.

Современные исследования микроклиматического архитектурного проектирования подтверждают, что связка Grasshopper и Dynamo целесообразна именно как взаимодополняющая система. Grasshopper обеспечивает гибкость параметрического моделирования и прямую связь с климатическими переменными, такими как солнечная радиация и ветровой режим, тогда как Dynamo усиливает BIM-компонент проектирования, позволяя насыщать модель данными и использовать их для дальнейшего анализа и координации. В результате климатические показатели перестают быть внешним фоном проектирования и включаются в саму логику генерации и уточнения архитектурной формы [7].

Таким образом, Grasshopper и Dynamo следует рассматривать не как конкурирующие, а как комплементарные инструменты. Первая платформа более уместна на стадии свободного концептуального поиска и генеративной оптимизации формы, тогда как вторая играет ключевую роль на этапе углубления эскиза, интеграции параметрических решений в BIM-модель и координации дальнейшего аналитического сопровождения проекта.

Интерфейсы обеих систем поддерживают использование Python-скриптов, что открывает возможности для создания сложных климатических граничных условий, обработки больших данных симуляций и реализации пользовательских алгоритмов оптимизации, делая передовые биоклиматические методики доступными для архитектора-практика.

2. Методология интеграции анализа инсоляции и ветровых потоков в процесс формообразования

Современный подход к оценке инсоляции существенно отличается от традиционной нормативной логики, основанной на проверке фиксированных временных показателей солнечного освещения. В рамках алгоритмического проектирования инсоляция рассматривается как динамический фактор, который может быть интегрирован в процесс генерации формы через анализ годовых циклов солнечной радиации, сезонных сценариев освещенности и пространственных ограничений, связанных с окружающей застройкой. Это позволяет интерпретировать инсоляцию не как внешнее ограничение, а как активный параметр формообразования.

Одним из ключевых инструментов такой интеграции становится концепция «солнечного конверта», задающая допустимые пределы объемно-пространственного решения с учетом сохранения нормативно и экологически обоснованного солнечного режима прилегающих территорий. Встраивание подобных расчетов в параметрическую модель создает возможность оперативно корректировать геометрию фасадов, глубину помещений, ориентацию объемов и коэффициент остекления в зависимости от климатических целей проекта.

Параллельно в процесс раннего формообразования включается анализ ветровых потоков, направленный на выявление зон дискомфорта, областей застоя воздуха и потенциальных аэродинамических конфликтов в городской среде. Даже при использовании упрощенных моделей такой анализ позволяет на концептуальном уровне принимать более обоснованные решения о взаиморасположении объемов, конфигурации открытых пространств, организации атриумов и формировании пешеходного микроклимата. Тем самым инсоляционный и ветровой анализ становятся

взаимосвязанными компонентами единой климатически ориентированной проектной логики (Рис.1).

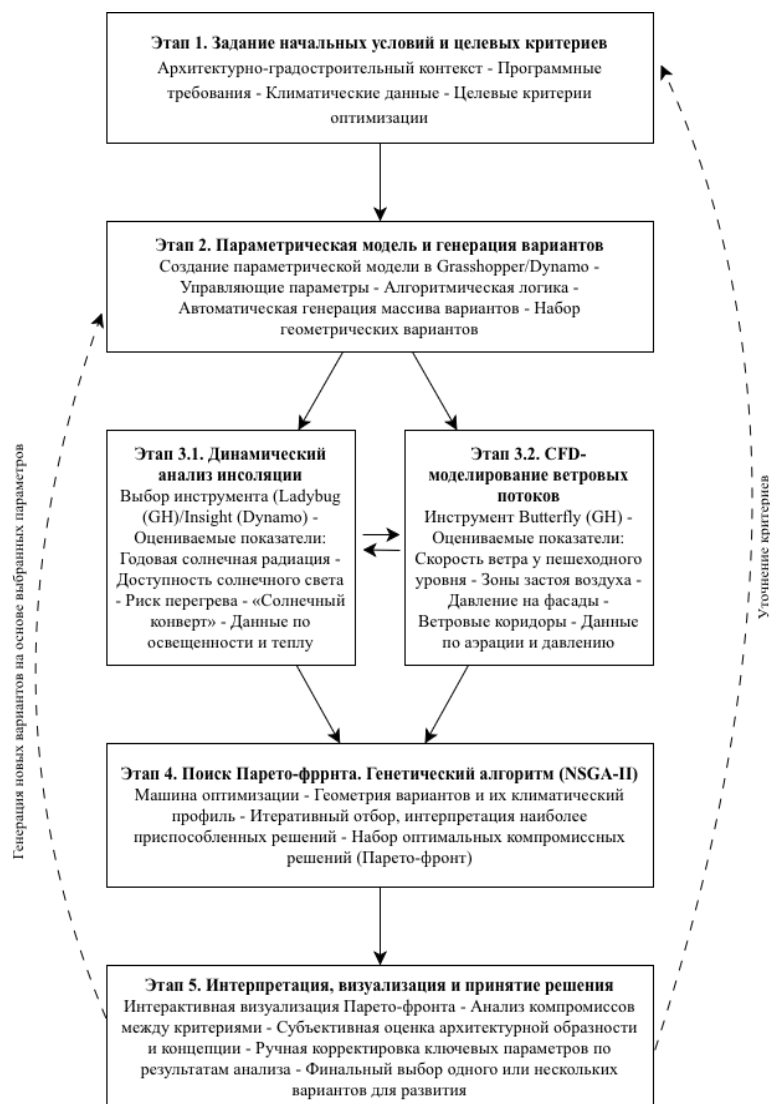


Рисунок 1. Схема итеративно-интегрированного алгоритмического проектирования с учетом климатических факторов на этапе эскизного формообразования.

Примечание: разработано авторами на основе [4, 5, 7, 11].

Дополнительным подтверждением продуктивности интегрированного подхода служат исследования, в которых солнечный анализ и BIM используются как основа для повышения достоверности CFD-моделирования. В частности, Квок и соавт. показали, что при моделировании многозональной внутренней среды учет солнечных теплопритоков, рассчитанных на основе геометрии, ориентации, материалов, местоположения и погодных данных, улучшает точность температурного прогноза. В этой схеме BIM выполняет не только функцию хранения геометрии, но и становится источником семантических данных, необходимых для формирования расчетной модели (Рис.2). Такой подход особенно важен для ранней стадии проектирования, где повышение точности возможно даже при

ограниченной исходной информации [4]. 3. Теоретическая модель процесса оптимизации и его ограничения

Теоретическая модель алгоритмической оптимизации в архитектуре исходит из того, что проектное решение должно рассматриваться как результат согласования нескольких, нередко противоречивых критериев. К ним относятся показатели полезной инсоляции, ограничения перегрева, параметры ветрового комфорта, энергетическая эффективность, экологические характеристики материалов и требования архитектурной выразительности. В этой связи принципиальное значение приобретает многокритериальная оптимизация, позволяющая анализировать не один «лучший» вариант, а множество альтернативных решений, находящихся в отношениях компромисса.

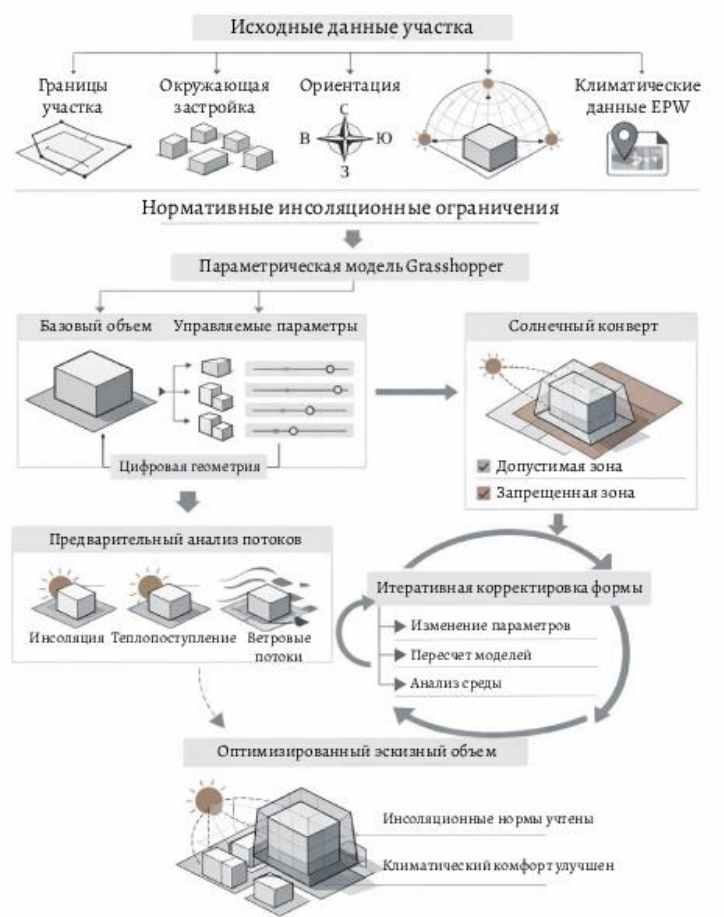


Рисунок 2. Схема построения солнечного конверта в параметрической модели с учетом климатических ограничений.

Примечание: разработано авторами на основе [3, 4].

Парето-фронт в данной логике выступает как теоретический инструмент интерпретации множества допустимых альтернатив, в рамках которого улучшение одного критерия сопровождается ухудшением другого. Такое представление особенно значимо для архитектурного проектирования, поскольку позволяет отказаться от иллюзии

единственно правильного решения и рассматривать форму как результат осмысленного выбора в пределах многомерного пространства параметров и ограничений (Рис.3).

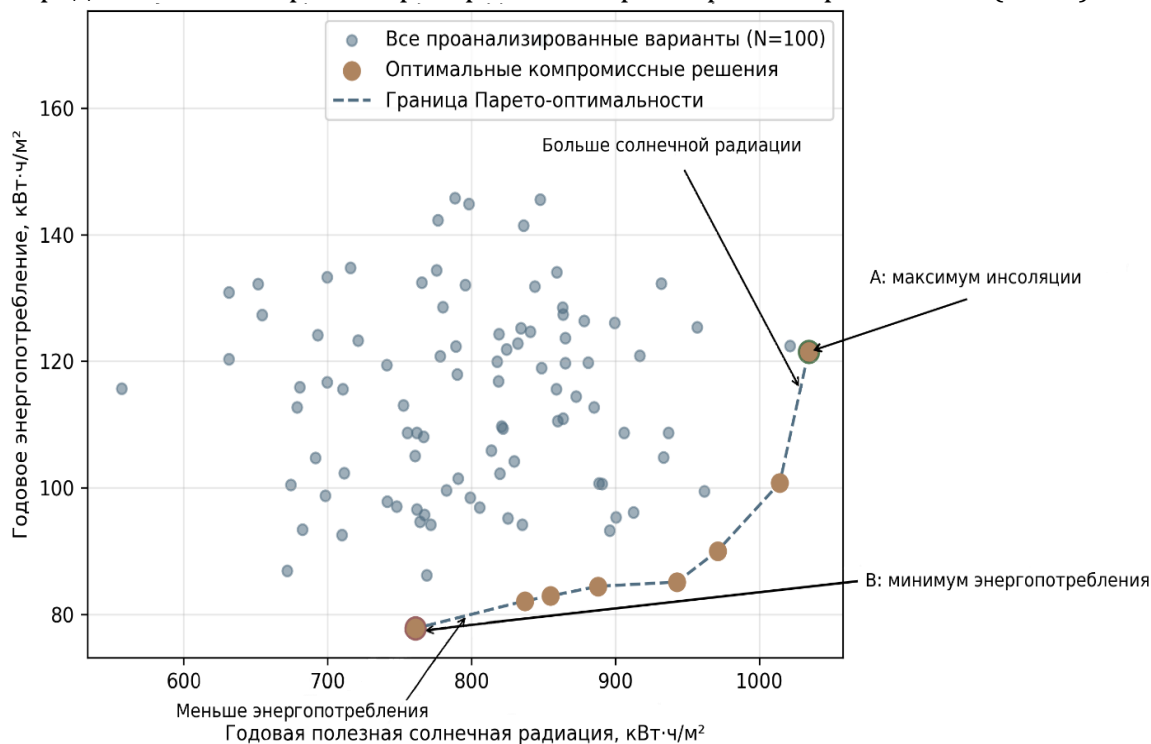


Рисунок 3. Схема Парето-оптимального выбора проектных решений в многокритериальном пространстве оценки.

Примечание: разработано авторами на основе [5, 11, 15].

В рамках предлагаемой методологической модели параметрическое проектирование рассматривается как способ описания архитектурной формы через систему управляемых параметров, определяющих геометрию, ориентацию, конфигурацию объемов и характеристики ограждающих конструкций. Использование многокритериальной оптимизации в данном контексте позволяет концептуально представить пространство проектных решений как множество альтернатив, различающихся по степени соответствия климатическим, энергетическим и композиционным требованиям.

При этом принципиально важно подчеркнуть, что алгоритмическая оптимизация не устраняет профессиональную роль архитектора. Напротив, она усиливает ее, переводя принятие решений из режима интуитивного перебора в режим аналитически поддержанного выбора. Архитектор в такой модели выступает в роли куратора, формулирующего цели, определяющего значимость критериев, интерпретирующего вычислительные результаты и осуществляющего окончательный синтез между числовыми показателями и качественными характеристиками архитектурного замысла. Следовательно, алгоритм становится не источником готовой формы, а инструментом расширения проектного мышления.

Потенциал сокращения трудоемкости климатического анализа на ранних этапах подтверждается и смежными исследованиями автоматизации BIM-ориентированных оценочных процедур. Так, в работе Дублевич и соавт., посвященной автоматизированной оценке дневного освещения в BIM-среде с использованием Dynamo, было показано

сокращение времени анализа на 40%, а в отдельных сценариях – до 80%. Хотя речь идет о частной задаче светового анализа, полученные результаты подтверждают общую тенденцию: перенос аналитических операций внутрь BIM-среды и их параметризация способны существенно ускорять принятие проектных решений [9].

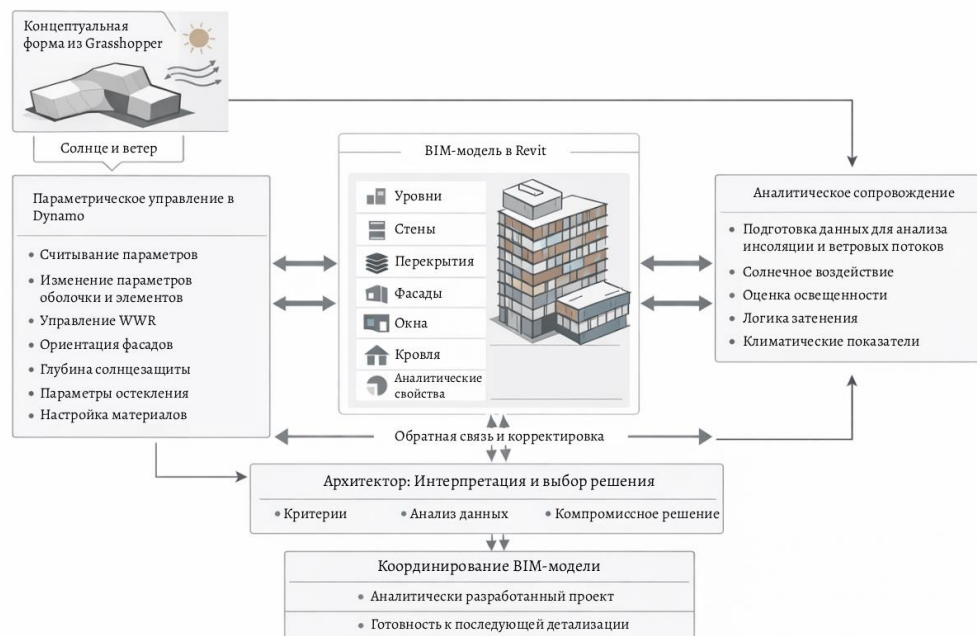


Рисунок 4. Схема параметрического управления и аналитического сопровождения BIM-модели в среде Dynamo.

Примечание: разработано авторами на основе [6, 7, 9].

Методологическая ценность алгоритмического подхода заключается не только в способности быстро генерировать и оценивать варианты, но и в выявлении взаимосвязей между параметрами проектного решения. Как показывают исследования в области BIM и планирование экспериментов, для проектировщика особенно значимы не отдельные численные значения, а понимание силы влияния факторов, их взаимодействий и устойчивых тенденций в пределах конкретной проектной задачи. В этом смысле алгоритмическое проектирование создает не только данные, но и знание о структуре проектной проблемы, тогда как интерпретация такого знания остается задачей архитектора-эксперта [15].

4. Интеграция алгоритмического проектирования с BIM-средой (на примере Dynamo)

На этапе перехода от концептуального формообразования к более детализированному проектированию ключевое значение приобретает интеграция алгоритмических методов с информационным моделированием зданий. В рамках предлагаемой методологии эта интеграция реализуется посредством использования среды Dynamo, обеспечивающей параметрическое управление геометрией, свойствами элементов и логикой обработки данных непосредственно внутри BIM-платформы.

В отличие от Grasshopper, ориентированного преимущественно на свободную генерацию и исследование геометрических систем, Dynamo функционирует в объектно-ориентированной структуре BIM, где архитектурные элементы представлены как семантически насыщенные объекты, обладающие набором параметров и связей. Это

позволяет осуществлять не только геометрическую, но и информационную оптимизацию проектных решений, включая работу с материалами, конструктивными характеристиками, показателями остекления и аналитическими сценариями.

Интеграция алгоритмического проектирования с BIM-средой включает несколько направлений: параметрическое управление элементами модели, согласование геометрии с результатами климатического анализа, подготовку данных для последующих специализированных расчетов, а также автоматизацию обработки и интерпретации проектной информации. В этом контексте Dynamo выступает как инструмент аналитической настройки и валидации проектных решений, обеспечивающий переход от абстрактной параметрической схемы к реалистичной информационной модели здания.

Таким образом, использование Dynamo в составе общей методологии формирует непрерывный цифровой контур проектирования, в котором данные, полученные на этапе концептуального анализа, не утрачиваются, а последовательно развиваются и уточняются. Это способствует повышению согласованности между ранними проектными решениями и их последующей реализацией, а также создает предпосылки для более эффективного междисциплинарного взаимодействия участников проектного процесса.

Существенным преимуществом такой логики является снижение зависимости от многоэтапной интероперабельности между различными программными средами. Как показывает практика BIM-ориентированного анализа, передача моделей во внешние расчетные программы нередко сопровождается потерей данных, ошибками преобразования и дополнительными временными затратами, вследствие чего аналитические процедуры откладываются на поздние стадии, когда проект уже менее податлив к изменениям. Использование встроенных средств визуального программирования, таких как Dynamo, позволяет удерживать анализ внутри BIM-среды и тем самым повышать непрерывность, оперативность и устойчивость проектного процесса [9].

Перспективным направлением дальнейшего развития предложенной методологии является ее сопряжение с системами BIM-IoT-ML, в которых цифровая модель здания перестает быть только проектным артефактом и начинает функционировать как динамическая среда для получения, обработки и интерпретации данных эксплуатации. Исследования последних лет показывают, что интеграция BIM и IoT позволяет организовать сбор и визуализацию данных о тепловом комфорте в реальном времени, включая построение тепловых карт и расчет PMV на основе актуальных измерений среды. Более того, в ряде работ делается шаг от нормативной модели комфорта к пользовательски ориентированной логике, где в расчет включаются не только стандартные показатели, но и реальные предпочтения пользователей здания, а алгоритмы машинного обучения используются для прогноза оптимальных условий. В таком развитии алгоритмическое проектирование получает выход за пределы стадии эскиза и начинает связывать замысел, модель и эксплуатационные данные в единую адаптивную систему принятия решений [8, 10, 16].

Заключение

В настоящем исследовании была предложена и теоретически обоснована методология применения алгоритмического проектирования для учета инсоляции и ветровых потоков на этапе эскизного архитектурного проектирования. Проведенный анализ показал, что включение алгоритмических инструментов в ранние стадии формообразования позволяет

рассматривать климатические параметры не как внешние ограничения, учитываемые постфактум, а как активные факторы, непосредственно влияющие на структуру проектного поиска и логику принятия пространственных решений. Тем самым эскизное проектирование приобретает более высокий уровень аналитической обоснованности и становится частью интегрированного процесса климатически ориентированного формообразования.

Теоретические результаты исследования позволяют сформулировать несколько ключевых выводов. Во-первых, Grasshopper и Dynamo следует рассматривать как взаимодополняющие, а не конкурирующие платформы, каждая из которых выполняет собственную функцию в едином цифровом контуре проектирования: Grasshopper обеспечивает гибкость параметрического моделирования, генерацию формы и проведение раннего климатического анализа, тогда как Dynamo выступает инструментом последующей параметрической настройки, координации и аналитического сопровождения решений в BIM-среде. Во-вторых, совмещение инсоляционного анализа, оценки ветровых потоков и многокритериальной оптимизации создает методологическую основу для перехода к климатически адаптивному эскизному проектированию, в котором выбор решения осуществляется не интуитивно, а в пространстве обоснованных альтернатив. В-третьих, алгоритмическая оптимизация не устраняет профессиональную роль архитектора, а, напротив, усиливает ее, поскольку окончательная интерпретация результатов, определение значимости критериев и синтез количественных и качественных характеристик остаются в сфере авторского проектного суждения.

Существенное значение имеет и то обстоятельство, что предложенная методология не претендует на замену детальных инженерных расчетов, выполняемых на последующих стадиях проектирования. Ее научная и практическая ценность заключается прежде всего в том, что она позволяет структурировать ранний этап проектной работы, расширить пространство поиска архитектурных решений и повысить качество предварительного выбора в условиях высокой неопределенности. В этом смысле алгоритмическое проектирование выступает не только как цифровой инструмент генерации вариантов, но и как методологический механизм согласования климатических, энергетических, функциональных и архитектурно-композиционных требований в рамках единой проектной логики.

Таким образом, предложенная в статье концептуальная модель может рассматриваться как теоретическая база для дальнейшего развития вычислительно поддерживаемого и климатически ориентированного архитектурного проектирования. Перспективы дальнейших исследований связаны с апробацией данной методологии на конкретных архитектурных кейсах, уточнением критериев многокритериальной оценки в зависимости от климатического контекста и типа объекта, а также с дальнейшей разработкой способов интеграции аналитических сценариев в непрерывный цифровой контур проектирования. В более широком смысле результаты исследования подтверждают, что алгоритмическое проектирование создает предпосылки для перехода от интуитивного эскизирования к аналитически поддержанному проектному мышлению, в котором архитектурная форма понимается как результат осмысленного выбора в системе взаимосвязанных параметров, ограничений и целей.

Благодарность, конфликт интересов

Исследование выполнено при поддержке Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Шегенова М.: разработка теоретической модели оптимизации, концептуализация, сбор и анализ литературы, проведение сравнительного анализа платформ, написание основного текста.

Мауленова Г.: руководство исследованием, методологический контроль, критический пересмотр и редактирование текста, утверждение финальной версии.

Султанова А.: визуализация концепций, дополнение разделов.

Список литературы

1. BIM-driven energy simulation and optimization for net-zero tall buildings: sustainable construction management / Sajjad M., Hu A., Alshehri A. M., Waqar A., Khan A. M., Bageis A. S., Elaraki Y. G., Shohan A. A. A., Benjeddou O. // *Frontiers in Built Environment*. 2024. Vol. 10. Art. 1296817. DOI: 10.3389/fbuil.2024.1296817.
2. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry // *Leadership and Management in Engineering*. 2011. Vol. 11, no. 3. P. 241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.
3. Pereira F. O. R., Silva C. A. N., Turkienikz B. A methodology for Sunlight Urban Planning: a computer-based solar and Sky Vault obstruction analysis // *Solar Energy*. 2001. Vol. 70, no. 3. P. 217–226. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00094-3.
4. Multi-zone indoor CFD under limited information: an approach coupling solar analysis and BIM for improved accuracy / Kwok H. H. L., Cheng J. C. P., Li A. T. Y., Tong J. C. K., Lau A. K. H. // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244. Art. 118912. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118912.
5. An approach to using life cycle assessment generative algorithm in buildings: optimisation of BIM models during the early design phase / Gómez de Cózar J. C., García-Martínez A., Morillo Merino B., Campón Tovar J. A., Rey-Álvarez B. // *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 530. Art. 146847. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146847.
6. Amoruso F. M., Dietrich U., Schuetze T. Integrated BIM-parametric workflow-based analysis of daylight improvement for sustainable renovation of an exemplary apartment in Seoul, Korea // *Sustainability (Switzerland)*. 2019. Vol. 11. Art. 2699. DOI: 10.3390/su11092699.
7. Khan H. Microclimatic architectural design by interfacing grasshoppers and Dynamo with Rhino and Revit // *Measurement: Sensors*. 2024. Vol. 33. Art. 101143. DOI: 10.1016/j.measen.2024.101143.
8. Automatic Indoor Thermal Comfort Monitoring Based on BIM and IoT Technology / Liang W., Qiang G., Fan L., Zhang H., Ye Z., Tang S. // *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 11. Art. 3361. DOI: 10.3390/buildings14113361.
9. BIM to BREEAM: a workflow for automated daylighting assessment of existing buildings / Dubljević S., Tepavčević B., Stefanović A., Anđelković A. S. // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 312. Art. 114208. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114208.
10. Kanna K., AIT Lachguer K., Yaagoubi R. MyComfort: An integration of BIM-IoT-machine learning for optimizing indoor thermal comfort based on user experience // *Energy and*

- Buildings. 2022. Vol. 277. Art. 112547. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112547.
11. Alothaimeen I., Arditi D., Türkakın O. H. Multi-objective optimization for LEED-new construction using BIM and genetic algorithms // Automation in Construction. 2023. Vol. 149. Art. 104807. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104807.
 12. Islam Md. S., Kabir Md. M., Kabir N. Artificial Neural Networks based Prediction of Insolation on Horizontal Surfaces for Bangladesh // Procedia Technology. 2013. Vol. 10. P. 482–491. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.386.
 13. Implementation of BIM Energy Analysis and Monte Carlo Simulation for Estimating Building Energy Performance Based on Regression Approach: A Case Study / Tahmasebinia F., Jiang R., Sepasgozar S., Wei J., Ding Y., Ma H. // Buildings. 2022. Vol. 12, no. 4. Art. 449. DOI: 10.3390/buildings12040449.
 14. Pathirana S., Rodrigo A., Halwatura R. Effect of building shape, orientation, window to wall ratios and zones on energy efficiency and thermal comfort of naturally ventilated houses in tropical climate // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2019. Vol. 10. P. 107–120. DOI: 10.1007/s40095-018-0295-3.
 15. Schlueter A., Geyer P. Linking BIM and Design of Experiments to balance architectural and technical design factors for energy performance // Automation in Construction. 2018. Vol. 86. P. 33–43. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.021.
 16. Internet of Things (IoT) for Integrating Environmental and Localization Data in Building Information Modeling (BIM) / Teizer J., Wolf M., Golovina O., Perschewski M., Propach M., Neges M., König M. // Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017). Taipei, Taiwan, 2017. P. 603–609. DOI: 10.22260/ISARC2017/0084.

M. Shegenova^{*1}, G. Maulenova¹, A. Sultanova²

¹*Satbayev University, Almaty, Kazakhstan*

³*RUDN University, Moscow, Russia*

Algorithmic design as a methodological framework for optimizing insolation and wind flows at the stage of conceptual architectural form generation

Abstract. Contemporary architectural practice faces the need to account for climatic factors already at the early stages of design, when the key parameters of the future object's spatial, functional, and environmental performance are established. The subject of this study is the methodological potential of algorithmic design as a tool for transforming conceptual design into an analytically grounded process. The aim of the article is to systematize and theoretically substantiate the methodology for applying the Grasshopper and Dynamo software environments to account for insolation and wind flows at the conceptual design stage. The study is theoretical and methodological in nature and is based on a comparative analysis of instrumental platforms, a synthesis of approaches to climate modeling, and an examination of the principles of multi-criteria optimization in architecture. As a result, a conceptual model of iterative integrated design is proposed, in which the analysis of insolation and aeration is considered an active form-generating factor, while design decisions are made within a space of trade-offs between climatic, energy-related, functional, and architectural-aesthetic criteria. It is substantiated that algorithmic design

can be regarded as a methodological foundation for the transition to “computational sketching”, which ensures a higher level of coherence between design decisions and the requirements of sustainable and climate-adaptive design.

Keywords: algorithmic design, computational design, insolation, wind flows, optimization, sketch design, Dynamo, Grasshopper, BIM.

References

1. BIM-driven energy simulation and optimization for net-zero tall buildings: sustainable construction management / Sajjad M., Hu A., Alshehri A. M., Waqar A., Khan A. M., Bageis A. S., Elaraki Y. G., Shohan A. A. A., Benjeddou O. // *Frontiers in Built Environment*. 2024. Vol. 10. Art. 1296817. DOI: 10.3389/fbuil.2024.1296817.
2. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry // *Leadership and Management in Engineering*. 2011. Vol. 11, no. 3. P. 241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.
3. Pereira F. O. R., Silva C. A. N., Turkienikz B. A methodology for Sunlight Urban Planning: a computer-based solar and Sky Vault obstruction analysis // *Solar Energy*. 2001. Vol. 70, no. 3. P. 217–226. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00094-3.
4. Multi-zone indoor CFD under limited information: an approach coupling solar analysis and BIM for improved accuracy / Kwok H. H. L., Cheng J. C. P., Li A. T. Y., Tong J. C. K., Lau A. K. H. // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244. Art. 118912. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118912.
5. An approach to using life cycle assessment generative algorithm in buildings: optimisation of BIM models during the early design phase / Gómez de Cózar J. C., García-Martínez A., Morillo Merino B., Campón Tovar J. A., Rey-Álvarez B. // *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 530. Art. 146847. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146847.
6. Amoruso F. M., Dietrich U., Schuetze T. Integrated BIM-parametric workflow-based analysis of daylight improvement for sustainable renovation of an exemplary apartment in Seoul, Korea // *Sustainability (Switzerland)*. 2019. Vol. 11. Art. 2699. DOI: 10.3390/su11092699.
7. Khan H. Microclimatic architectural design by interfacing grasshoppers and Dynamo with Rhino and Revit // *Measurement: Sensors*. 2024. Vol. 33. Art. 101143. DOI: 10.1016/j.measen.2024.101143.
8. Automatic Indoor Thermal Comfort Monitoring Based on BIM and IoT Technology / Liang W., Qiang G., Fan L., Zhang H., Ye Z., Tang S. // *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 11. Art. 3361. DOI: 10.3390/buildings14113361.
9. BIM to BREEAM: a workflow for automated daylighting assessment of existing buildings / Dubljević S., Tepavčević B., Stefanović A., Anđelković A. S. // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 312. Art. 114208. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114208.
10. Kanna K., AIT Lachguer K., Yaagoubi R. MyComfort: An integration of BIM-IoT-machine learning for optimizing indoor thermal comfort based on user experience // *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 277. Art. 112547. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112547.
11. Alothaimeen I., Arditi D., Türkakın O. H. Multi-objective optimization for LEED-new construction using BIM and genetic algorithms // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 149. Art. 104807. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104807.
12. Islam Md. S., Kabir Md. M., Kabir N. Artificial Neural Networks based Prediction of Insolation on Horizontal Surfaces for Bangladesh // *Procedia Technology*. 2013. Vol. 10. P. 482–491. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.386.

13. Implementation of BIM Energy Analysis and Monte Carlo Simulation for Estimating Building Energy Performance Based on Regression Approach: A Case Study / Tahmasebinia F., Jiang R., Sepasgozar S., Wei J., Ding Y., Ma H. // Buildings. 2022. Vol. 12, no. 4. Art. 449. DOI: 10.3390/buildings12040449.
14. Pathirana S., Rodrigo A., Halwatura R. Effect of building shape, orientation, window to wall ratios and zones on energy efficiency and thermal comfort of naturally ventilated houses in tropical climate // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2019. Vol. 10. P. 107–120. DOI: 10.1007/s40095-018-0295-3.
15. Schlueter A., Geyer P. Linking BIM and Design of Experiments to balance architectural and technical design factors for energy performance // Automation in Construction. 2018. Vol. 86. P. 33–43. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.021.
16. Internet of Things (IoT) for Integrating Environmental and Localization Data in Building
17. Information Modeling (BIM) / Teizer J., Wolf M., Golovina O., Perschewski M., Propach M., Neges M., König M. // Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017). Taipei, Taiwan, 2017. P. 603–609. DOI: 10.22260/ISARC2017/0084.

Сведения об авторах:

Шегенова М. – автор для корреспонденции, магистрант кафедры «Архитектура» Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И.Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, 050013, Алматы, Казахстан.

Мауленова Г. – кандидат архитектуры, ассоциированный профессор кафедры «Архитектура» Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И.Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, 050013, Алматы, Казахстан.

Султанова А. – старший преподаватель кафедры «Архитектура и реставрация» Инженерной академии Российского университета дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, 117198, Москва, Россия.

Shegenova M. – corresponding author, master's student, Department of Architecture, Satbayev University, 22 Satbayev St., 050013, Almaty, Kazakhstan

Maulenova G. – Candidate of Architecture, Associate Professor, Department of Architecture, Satbayev University, 22 Satbayev St., 050013, Almaty, Kazakhstan.

Sultanova A. – Senior Lecturer, Department of Architecture and Restoration, Engineering Academy, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St., 117198, Moscow, Russia.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-128-144>

Исследование динамики изменения параметров моторного масла и технического состояния системы смазки дизельного двигателя в процессе эксплуатации

**А.М. Табинбаев¹ , К.К. Жолдасова¹ , А.М. Биниязов^{2*} ,
А.С. Денисов³ **

¹*Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан*

²*Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, Уральск, Казахстан*

³*Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов, Российская федерация*

E mail: amanzhol.tabinbayev.84@mail.ru, k.joldassova@satbayev.unersity, abiniyazov@mail.ru, denisov0307@mail.ru

Аннотация. Целью данного исследования является детальный анализ взаимосвязи количественных и качественных параметров функционирования системы смазки дизельного двигателя и закономерностей их изменения в течение эксплуатационного периода. Понимание этой динамики критически важно для повышения надежности и долговечности дизельных агрегатов. Методология работы включала комплексное расчетно-аналитическое и экспериментальное исследование с использованием методов физико-химического анализа проб моторного масла и мониторинга эксплуатационных показателей двигателя. Установлено, что текущие изменения физико-химического состава моторного масла являются ключевым фактором, определяющим динамику всех количественных и качественных показателей системы смазки. Развитие процесса старения масла (включая его полимеризацию) напрямую влияет на скорость деградации компонентов, существенно сокращая его полезный ресурс и требуя строгого соблюдения регламента замены. В работе также выявлен риск: изменение технического состояния системы смазки может привести к попаданию масляных фракций в топливную систему. Это является серьезным нарушением эксплуатационных норм, вызывая нерасчетные режимы работы и многократно повышая риск преждевременного износа и отказа двигателя. Таким образом, динамика изменения показателей смазочной системы является сложной, многофакторной зависимостью, которую можно представить графической моделью. Практическая ценность

исследования состоит в разработке базы для оптимизации стратегий обслуживания и повышения эксплуатационной эффективности дизельных двигателей.

Ключевые слова: автотранспортная техника; проектирование агрегатов; износ двигателя; изменение свойств масла; расход масла на угар; регулирование расхода топлива.

Received 28.12.2025. Revised 06.04.2026. Accepted 28.05.2026. Available online 30.03.2026

* the correspondence author

Введение

Система смазки является одной из важнейших систем дизельного двигателя, надёжное и безаварийное функционирование которой во многом определяет надёжность работы всего двигателя в целом. На проблемы системы смазки приходится значительная часть всего объёма нарушений и отказов в работе двигателя, в то время как характер изменения количественных и качественных показателей данной системы существенным образом влияет на долговечность эксплуатации двигателя. В частности, нарушения работы дизельного двигателя, обусловленные спонтанным поступлением дизельного масла в систему смазки, вызывают ухудшение характеристик двигателя (как количественных, так и качественных), значительно снижают срок службы масла в смазочной системе, а также негативно сказываются на безопасности эксплуатации двигателя в целом [4]. При этом благоприятные изменения в работе системы смазки могут быть обусловлены своевременным форсированием дизельных двигателей. При этом происходит увеличение объёма картера двигателя и, следовательно, объёма потребляемого масла, отмечается значительное увеличение рабочего давления масла в двигателе, а также существенным образом изменяются параметры регулировки дизельного двигателя [1]. В целом, изучение проблематики влияния изменения показателей смазочной системы на функционирование дизельного двигателя имеет большую актуальность в контексте развития технического парка Республики Казахстан, учитывая то обстоятельство, что двигатели данного типа широко применяются в различных отраслях народного хозяйства страны, в частности в аграрном секторе, автомобильной промышленности, в железнодорожной сфере и т.д. Указанный спектр вопросов был рассмотрен в научных исследованиях А.М. Biniyazov, A.S. Denisov, (2023), V. Aulin, et al. (2024), J. Huniczet al, (2024), A. Zare et al, (2021), S. George,, S. Balla, M. Gautman, (2022), R.O., McClellan, T.W. Hesterberg, а также J.C. Woll (2022), Unver, I. Altin, S. Gurgen, (2021).

Ряд проблемных аспектов определения требований к параметрам диагностики работающего моторного масла дизельного двигателя рассмотрен в научном исследовании А.С. Денисова, А.М. Биниязова (2023). Авторы обращают внимание на тот факт, что важнейшими диагностическими параметрами, определяющими характер количественных и качественных изменений в системе смазки дизельного двигателя, являются щёлочность масла и уровень масла в картере двигателя. Их изменения во многом определяют характер функционирования двигателя и работу смазочной системы в целом.

В научном исследовании V. Aulin, et al. (2024) рассматриваются вопросы изучения причин изменения параметра мощности дизельного автомобильного двигателя, работающего в нестационарных условиях, при изменениях количественных и

качественных показателей топливной системы. Учёные отмечают, что эксплуатация автомобильных, дизельных двигателей в нестандартных условиях является одной из наиболее сложных задач транспортной системы любой страны. По мнению авторов, управление характером изменений количественных и качественных показателей системы смазки такого двигателя обеспечивает возможность решения задач по эффективному управлению функционированием двигателя в целом.

При этом дополнительного исследования требуют вопросы взаимосвязи различных нарушений изменения количественных и качественных показателей функционирования системы смазки дизельных двигателей с проблемами развития технических сфер Республики Казахстан, в которых такие двигатели нашли широкое применение.

Целью данной научной работы выступает исследование динамики изменений ключевых показателей работы смазочной системы дизельного двигателя внутреннего сгорания.

Методология

Подшипники коленчатого вала относятся к динамически нагруженным сопряжениям, в которых, кроме действия основных нагрузок, из-за наличия зазоров в сопряжениях появляются дополнительные динамические нагрузки, обусловленные ускоренным относительным перемещением деталей в пределах зазора. Приняв по результатам исследований М.М. Хрущова прямо пропорциональную зависимость интенсивности изнашивания α от давления p в зоне трения, Ф.Н. Авдонькин [4] получил прямо пропорциональную зависимость α от износа DS .

Решая это линейное дифференциальное уравнение, он обосновал, что общий износ в процессе эксплуатации возрастает по экспоненциальной зависимости:

$$S = S_0 e^{bl}, \quad (1)$$

а интенсивность изнашивания α с учетом уравнений возрастает также по экспоненциальной зависимости:

$$\alpha = \alpha_0 e^{bl}, \quad (2)$$

где α_0 , S_0 – соответственно интенсивность изнашивания и износ в конце приработки, приведенные к началу эксплуатации ($l = 0$); b – изменение интенсивности изнашивания на единицу износа деталей.

С учётом выражений (1) и (2) было получено выражение для определения зависимости давления масла в системе смазки от выработки дизельного двигателя:

$$P = \frac{\alpha}{S_0^m e^{mb l}} = P_0 e^{-bpl} \quad (3)$$

где параметр $P_0 = \alpha/S_0^m$ отображает давление на конечном этапе приработки деталей двигателя, приведенное на момент начала его эксплуатационного использования.

Для исследования информативности рабочих параметров масла в системе смазки была выведена формула:

$$\Delta S = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \cdot 100\% \quad (4)$$

где S_0 – начальное, а S_k – конечное значение расчётного параметра.

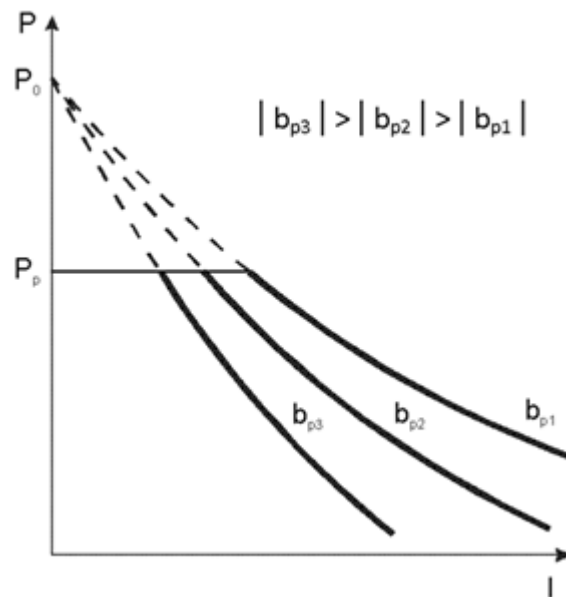


Рисунок 1. К понятию смысла параметров p_0 и b_p : p_p – давление, ограниченное редукционным клапаном

При низком скоростном режиме двигателя давление в системе смазки снижается сразу же с начала эксплуатации, а при номинальном скоростном режиме, когда давление ограничивается редукционным клапаном, давление некоторое время после начала эксплуатации остается постоянным (согласно регулировке редукционного клапана), а затем снижается по мере увеличения зазоров в подшипниках коленчатого вала. Геометрический смысл параметров p_0 и b_p показан на рис. 1 [5, 6].

Результаты и обсуждение

Параметры системы смазки претерпевают изменения в процессе работы дизельного двигателя. В общем виде они могут быть разделены на качественные и количественные. К числу качественных показателей смазочной системы относятся старение масла, а также его разжижение топливом и тосолом. Количественными показателями смазочной системы являются: производительность масляного насоса, потери на утечки и угар масла, а также износ и зазоры в подшипниках коленчатого вала двигателя [1]. Характер изменения количественных и качественных показателей системы смазки в процессе эксплуатации дизельного двигателя во многом оказывает влияние на его производительность, а также определяет общий срок службы агрегата с учётом особенностей его эксплуатации и технического обслуживания.

Процесс эксплуатации моторного масла при работе дизельного двигателя сопряжён с частичной регенерацией свойств, которая имеет место при доливке масла в объёме,

рекомендованном для данного типа смазочной системы, а также при фильтрации масла в дизельном двигателе. Поэтому, проводя анализ изменения количественных и качественных показателей смазочной системы при функционировании дизельного двигателя, следует принимать во внимание такие аспекты, как: полный комплекс процессов (как физических, так и химических), протекающих в процессе использования (старения масла), а также процесс обновления масла, посредством вливания свежего, до необходимого объёма.

Принимая во внимание тот факт, что в реальных условиях эксплуатационного использования двигателя не только качество претерпевает существенные изменения с течением времени, вследствие развития регенерационных процессов, но также под влиянием физических и химических процессов, происходящих в масштабах всего объёма масла дизельного двигателя, представляется, что объективно релевантным отображением кинетики изменений следует считать экспоненциальные кривые. Экспоненциальная зависимость отображена на рисунке 2. При этом её также следует считать определённым приближением среднего характера, преимущество которого заключается в том, что таким образом происходит относительно точное отображение общей тенденции изменений показателей качества моторного масла в процессе эксплуатации дизельного двигателя.

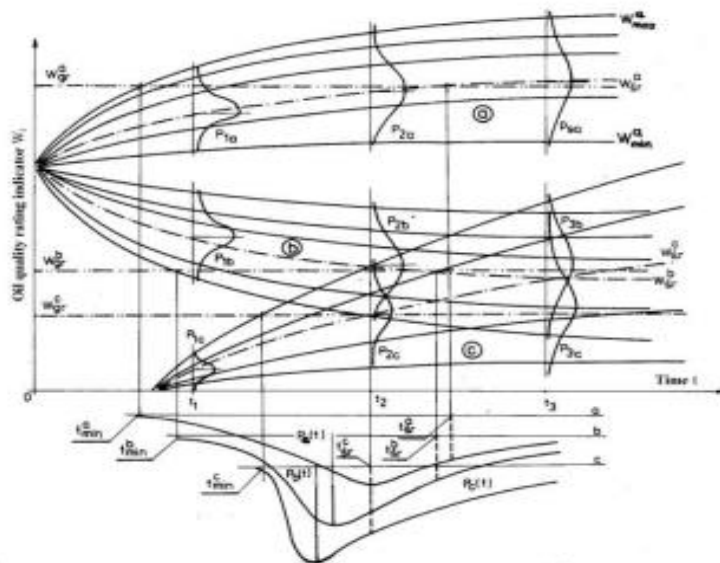


Рисунок 2. Кинетика изменений показателей оценки качества масла.

В частности, абсолютная разница параметров свежего моторного масла и этого же масла по истечении определённого промежутка времени его эксплуатационного использования даёт возможность провести оценку изменения свойств данного масла (состарившегося в процессе эксплуатации, по сравнению со свежими образцами). Последовательность изменений подобного рода представлена в виде формул Chmielewski, 2022):

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (P_0 - P_i)_p = \alpha \times \Delta t = 0,33 \times 122 = 40,26 \quad (5)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^n k^n = \alpha \times \Delta t \times k / 1 - k = 0,33 \times 122 \times 0,35 / 1 - 0,35 = 21,68 \quad (6)$$

где α – угол наклона прямой кинетики изменения показателя качества масла в системе смазки двигателя, Δt – время непрерывной работы двигателя между последовательными добавлениями масла в систему смазки, n – количество циклов циркуляции жидкости в

двигателе, k – выбранная единица объема свежего масла в смазочной системе двигателя при упорядоченном добавлении порционных объемов нового масла, P – анализ характеристик масла в системе смазки, которое для свежего, неиспользованного масла принимает значение параметра P_0 и при старении, без учета обновления, претерпевает прямолинейные изменения в зависимости от параметра времени эксплуатационного использования до принятия окончательного значения числа n в очередном рабочем цикле.

Математическая модель, описанная посредством выражений (5) и (6), даёт основания сделать вывод о том, что процесс старения моторного масла при работе дизельного двигателя не имеет прямой зависимости от параметра времени. При этом показатель кинематической вязкости моторных масел, функционирующих при рабочей температуре 100°C в любых эксплуатационных условиях, может быть использован для составления предварительных прогнозов поведения моторного масла на любом этапе работы дизельного двигателя. При этом необходимо принимать во внимание тот факт, что для получения полной картины текущих изменений, происходящих в моторном масле, следует соотносить параметр кинематической вязкости с параметром динамической вязкости (HTHS), а также учитывать степень окисления и показатель кислотности масла. Все перечисленные параметры способны оказать существенное влияние на надёжность функционирования дизельного двигателя на любом этапе эксплуатации, что обуславливает важность непрерывного наблюдения за процессом старения моторного масла. Кроме того, имеет значение характер эксплуатации дизельного двигателя в конкретных погодных условиях, а также особенности его запуска, прогрева, работы на холостом ходу, остановки и т.д. Следовательно, характер изменения количественных и качественных показателей смазочной системы при работе дизельного двигателя не всегда соответствует реальным изменениям, имеющим место в двигателе в процессе его эксплуатации в среднестатистических условиях, а также при усреднённых рабочих нагрузках.

Особое значение в контексте общей динамики количественных и качественных изменений системы смазки имеет показатель износа подшипников коленчатого вала дизельного двигателя. В процессе эксплуатации дизельного двигателя показатель общего износа возрастает по экспоненте [1]:

$$S = S_0 e^b = 3,23 \times 0,56 = 1,8088 \quad (7)$$

При этом параметр интенсивности изнашивания также возрастает в экспоненциальной зависимости:

$$A = A_0 e^b = 1,55 \times 0,56 = 0,868 \quad (8)$$

где A_0 и S_0 соответственно показатели интенсивности изнашивания и фактический износ

на этапе конечной приработки деталей, отмеченные на момент начала эксплуатационного использования дизельного двигателя; b – параметр изменения интенсивности изнашивания деталей на единицу их износа.

С учётом выражений (5) и (6) можно получить выражение для определения зависимости давления масла в системе смазки от выработки дизельного двигателя [1].

$$P = 0,33/3,23=0,102$$

(9)

где параметр $P_0 = \alpha/S_0^m$ отображает давление на конечном этапе приработки деталей двигателя, приведенное на момент начала его эксплуатационного использования.

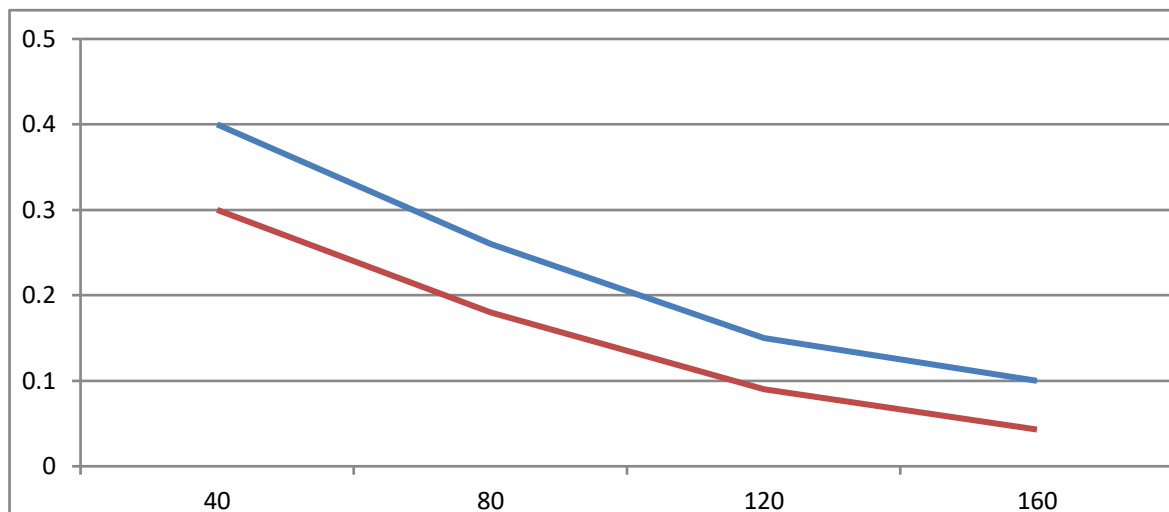


Рисунок 3. Зависимость параметра давления в смазочной системе от пробега двигателя ЯМЗ-236.

На рисунках 3 и 4 представлены диаграммы зависимости параметра давления масла в системе смазки от выработки дизельного двигателя с течением времени, полученная вследствие математической обработки выражения (9). Эксперимент был проведен с использованием двигателей ЯМЗ -236 и Мерседес 611.

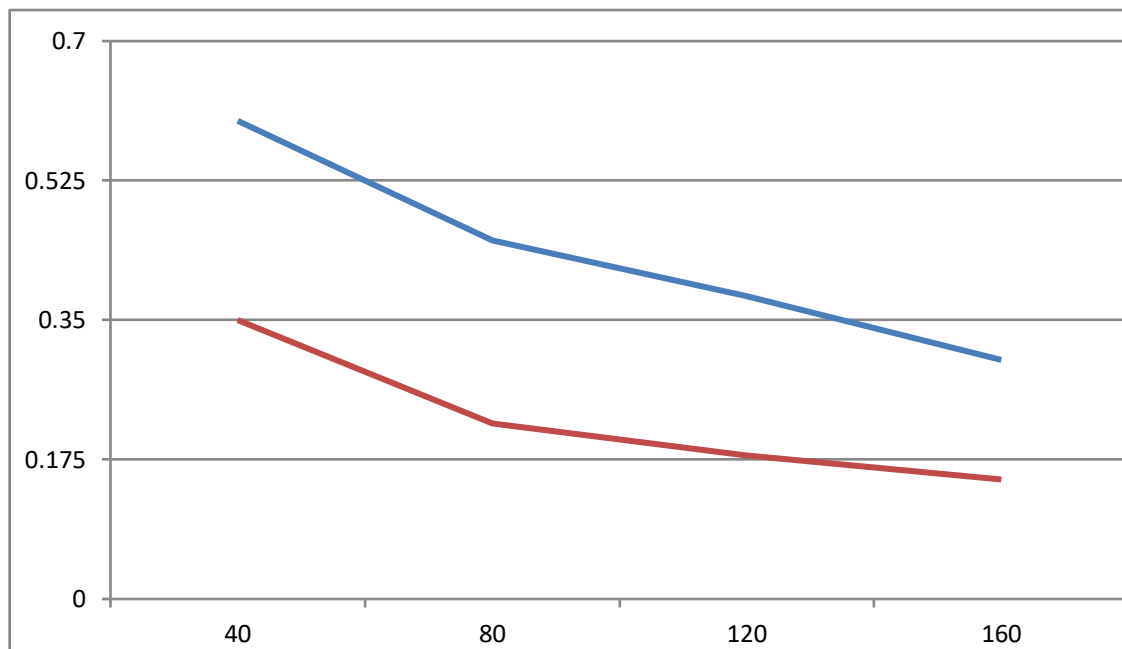


Рисунок 4. Зависимость параметра давления в смазочной системе от пробега двигателя Мерседес 611.

На рисунках 3 и 4 синим цветом отображены зависимости на номинальном режиме работы двигателя, красным цветом – на холостом ходу. При этом при снижении давления масла в системе смазки двигателя отмечается заметное изменение воздействия силы трения на подшипники коленчатого вала двигателя, что отображается на показателях его износа. Таким образом, проведенный эксперимент показывает заметное снижение параметра давления масла в системе смазки по мере пробега двигателя. При этом по мере увеличения пробега двигателя после 120000 км показатель давления масла в топливной системе снижается менее интенсивно, нежели при меньшем пробеге. Закономерно, что в данном случае отмечается значительно меньший износ трущихся частей, в частности подшипников коленчатого вала двигателя. Отмечается непосредственная взаимосвязь между равномерностью снижения показателя давления масла в картере двигателя и продолжительностью его срока службы, и износом в целом

Отдельного внимания заслуживает исследование характера изменений таких параметров моторного масла, как: щелочного числа S , показателя вязкости масла μ , температуры вспышки t , а также плотности ρ в зависимости от наработки двигателя в процессе его эксплуатационного использования. Для расчёта данных параметров была использована формула (6) [2].

В ходе эксперимента был исследован характер изменения указанных параметров дизельных двигателей ЯМЗ-236 и Мерседес 611 на 5000 километров пробега. При анализе проб масла определялись: кинематическая вязкость (сСт), температура вспышки в открытом тигле ($^{\circ}\text{C}$), щелочное число (мг КОН/г) масла, плотность при 20°C (г/дм^3). Параметры определялись в лаборатории по методикам ГОСТ.

Щелочное число масел выражено через количество (в мг) гидроокиси калия (KOH), эквивалентное содержанию всех видов щелочей в 1 г масла.

Кинематическая вязкость (сСт) определялась в соответствии с ГОСТ 33-2000 «Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости».

Температура вспышки в открытом тигле ($^{\circ}\text{C}$) определялась в соответствии с ГОСТ 4333-87 «Нефтепродукты. Метод определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле». Полученные результаты представлены соответственно в таблицах 1 и 2.

Как следует из данных, представленных в таблицах 1 и 2, на протяжении взятых для экспериментального исследования 5000 километров пробега наиболее существенно изменяются такие параметра масла, как объём масла в системе, щелочное число, вязкость и температура вспышки. Плотность масла подобных существенных изменений не претерпевает. Это относится к обоим типам двигателей, взятых для экспериментального исследования. При установленных предварительно величинах выбранного для исследования показателя в начале использования масла границу образов неисправностей двигателя определяет фактическая динамика изменения параметра работающего масла на любой стадии эксплуатации двигателя [2]. Она определяет и окончательную величину исследуемого показателя при установленном характере научного исследования.

Полученные в ходе экспериментального исследования показатели работающего масла на установленное количество километров пробега определяют характер развития неисправностей, возникающих при эксплуатации дизельного двигателя. В частности, изменения показателя уровня масла в картере дизельного двигателя (увеличение данного

параметра) может указывать на наличие неисправностей в работе топливной системы в целом. В ходе проведенного экспериментального исследования были получены показатели 35 литров масла для двигателя ЯМЗ-236 и 42 литра масла для двигателя Мерседес 611 со снижением данных параметров до уровня 19 и 20 литров соответственно. Кроме того, нарушения распыливания топлива в топливной системе может привести к попаданию части топлива в картер двигателя, что увеличивает объем масла и негативно сказывается на функционировании смазочной системы двигателя в целом.

Таблица 1. Характер изменения параметров масла в системе смазки двигателя ЯМЗ-236 на 5000 километров пробега.

Параметр	S_0	S_k	$\Delta S\%$
Объем масла в системе л	35	19	45,7
Щелочное число	18	14	22,2
Плотность масла, кг/м ³	875	868	0,8
Вязкость масла, мм ² /с	10,5	8,1	22,8
Температура вспышки, °С	225	210	6,6

Источник: составлено автором

Таблица 2. Характер изменения параметров масла в системе смазки двигателя Мерседес 611 на 5000 километров пробега.

Параметр	S_0	S_k	$\Delta S\%$
Объем масла в системе, л	42	20	52,3
Щелочное число	17	11	35,2
Плотность масла, кг/м ³	886	880	0,6
Вязкость масла, мм ² /с	10,6	8,2	22,6
Температура вспышки, °С	234	215	8,1

Источник: составлено автором

Щелочное число является вторым по значимости показателем работы масла в системе смазки дизельного двигателя. В ходе эксперимента были получены показатели снижения щелочного числа со значений 18 для двигателя ЯМЗ-236 и 17 для двигателя Мерседес 611 соответственно до показателей 14 и 11. В случае более интенсивного снижения рассматриваемого параметра может быть отмечен перегрев двигателя, что приведёт к его преждевременному выходу из строя. Вязкость масла является также важным показателем с точки зрения оценки общей эффективности функционирования масла в смазочной системе. В ходе проведенного эксперимента отмечено снижение данного показателя со значений 10,5 мм²/с для двигателя ЯМЗ-236 и 10,6 мм²/с для двигателя Мерседес 611

соответственно до показателей 8,1 мм²/с и 8,2 мм²/с. Более интенсивное снижение рассматриваемого параметра может стать индикатором нарушения целостности тракта впуска масла в системе. В то же время, увеличение данного параметра свидетельствует о высокой степени загрязнения фильтров системы смазки.

Температура вспышки масла является показателем, по которому можно судить о степени исправности топливной аппаратуры. В ходе проведенного экспериментального исследования были отмечено существенное снижение данного показателя со значений 225 °С для двигателя ЯМЗ-236 и 234 °С для двигателя Мерседес 611 соответственно до показателей 210 °С и 215 °С соответственно. В обоих случаях подобное снижение свидетельствует об имеющихся неисправностях функционирования топливной системы, которые требуют своевременного устранения.

Показатель плотности масла не претерпел существенных изменений в ходе проведенного эксперимента и его не следует принимать во внимание при оценке динамики изменения основных показателей функционирования смазочной системы.

Таким образом, характер изменения основных количественных и качественных показателей системы смазки при работе дизельного двигателя внутреннего сгорания отображает его текущее состояние и может считаться индикатором развития процессов, оказывающих непосредственное влияние на функциональность двигателя. По динамике изменения данных параметров можно судить о состоянии двигателя в целом и исправности отдельных его систем, что имеет значение с точки зрения обеспечения безаварийной эксплуатации дизельного двигателя и проведения его плановых ремонтов при возникновении подобной необходимости.

В ходе выполнения данной научно-исследовательской работы были получены результаты, свидетельствующие о наличии выраженной взаимосвязи характера изменения качественных и количественных показателей системы смазки дизельного двигателя с химическим и физическим составом используемого масла. Кроме того, подтверждено ключевое значение своевременности проведения мониторинга технического состояния смазочной системы в контексте его влияния на функционирование двигателя в целом.

В контексте тематики, заявленной в данной научной работе, имеет особое значение оценка возможных рисков, возникающих при работе дизельного двигателя. Широкий ряд проблемных аспектов снижения рисков при обслуживании двухтактных дизельных двигателей был рассмотрен в совместной научно-исследовательской работе B. Unver, I. Altin, S. Gurgen, (2021). Учёные обращают внимание на тот факт, что своевременно выполненные работы по техническому обслуживанию дизельных двигателей имеют большое значение для их безопасного последующего использования. По мнению авторов, продолжительность безаварийного функционирования дизельного двигателя во многом зависит от состояния его системы смазки, а также эффективного отслеживания характера изменения её количественных и качественных параметров. В целом выводы автором подтверждаются результатами данной работы, поскольку подчёркивают взаимосвязь между параметрами смазочной системы двигателя и безаварийностью его эксплуатации.

Характер изменений количественных и качественных показателей системы смазки при работе дизельного двигателя во многом определяется степенью очистки масла в системе. В свою очередь, J. Huniczetal, (2024) в совместной научно-исследовательской работе, направленной на изучение ключевых аспектов сжигания смеси гидроочищенного масла в

дизельном двигателе, отмечают, что характер изменения количественных и качественных показателей системы смазки при работе дизельного двигателя во многом определяется выбором масла в данной системе. В частности, высокая скорость циркуляции отработанных газов в процессе сгорания оказывает влияние на параметр давления наддува, что, в свою очередь, влияет на объёмы выбросов, причём характер изменения данных объёмов напрямую зависит от показателя очистки масла в системе смазки. В контексте результатов данной работы выводы исследователей нуждаются в проверке, поскольку давление наддува оказывает косвенное влияние на характер изменения параметров смазочной системы двигателя.

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение возможных типов масел, используемых в системе смазки при работе дизельного двигателя. Вопросы применения различных типов масел при работе дизельного двигателя при холодном и горячем пуске на кислородосодержащих топливах были рассмотрены в совместной научной статье А. Zareetal, (2021). Учёными отмечается, что на сегодняшний день большинство дизельных двигателей оснащаются турбонаддувом, что позволяет значительно экономить топливо и снижать расход масла в системе смазки. При этом изменение количественных и качественных показателей системы смазки при работе дизельного двигателя также связано с типом используемого топлива, в частности, биотопливо с большой концентрацией кислорода улучшает сгорание при задержке турбокомпрессора. Мнение исследователей подтверждается полученными результатами, поскольку тип топлива непосредственно влияет на изменение параметров смазочной системы двигателя. Вопросы качества очистки масла играют одну из ключевых ролей в вопросах оценки характера количественных и качественных изменений параметров системы смазки при работе дизельного двигателя. Проблематика влияния загрязнения масла в системе смазки на параметры износа дизельного двигателя рассматриваются в научной работе S. George, S. Balla, M. Gautman, (2022). Авторами отмечается, что загрязнение масла в системе смазки дизельной сажей является одной из причин износа двигателей и их преждевременного выхода из строя. В данном контексте особое значение имеет изучение факторов, оказывающих влияние на изменение поверхности сажи и её модификацию, а также влекущих за собой изменения в работе дизельного двигателя, ведущие к снижению его моторного ресурса и преждевременному выходу из строя. Характер износа дизельного двигателя напрямую связан с характером загрязнения его смазочной системы, что свидетельствует о соответствии результатов учёных результатам данного научного исследования.

Отдельного внимания заслуживают вопросы влияния выбросов масла в окружающую среду на характер изменения количественных и качественных параметров смазочной системы. В совместной научно-исследовательской работе С. Pardo-Garcia, S. Orjuela-Abril, J. Rabon-Leon, (2022) затрагиваются ключевые аспекты влияния ключевых характеристик выбросов и циркуляции масла в системе смазки на изменение свойств двойного дизельного двигателя внутреннего сгорания двойного действия, функционирующего на дизельном топливе и водороде. Учёными отмечается, что, как правило, влияние водорода на изменение характеристик масла в системе смазки полностью игнорируется, несмотря на то, что этот элемент является одним из основных видов газообразных топлив. Изменение физико-химических характеристик смеси топлива оказывает влияние, как на окружающую среду, так и на характер функционирования дизельного двигателя, что необходимо учитывать при проведении технических расчётов ключевых параметров. В контексте

результатов данной работы высказанное мнение представляется спорным, поскольку характер влияния изменения физико-химических характеристик смеси топлива на окружающую среду до конца не изучен.

Одной из побочных проблем влияния изменения количественных и качественных показателей функционирования системы смазки дизельного двигателя является пропуски зажигания в цилиндрах. Данному вопросу посвящено научное исследование A. Syno, J. Czarnigowski и P. Jaklinski, (2021), в котором авторами отмечается, что вибрация дизельного двигателя является одним из ключевых показателей его нормального функционирования. Нарушения работы системы смазки, проявляющиеся в проблемах и неполадках зажигания, а также повышенной вибрации двигателя, являются следствием нарушения оптимального сочетания количественных и качественных параметров работы системы смазки, что ведёт к её преждевременному износу и выходу из строя. Высказанное мнение подтверждается полученными результатами, поскольку характер изменения количественных и качественных показателей смазочной системы дизельного двигателя напрямую влияет на его износ и срок фактической эксплуатации.

В контексте взаимосвязи процессов расходования масла в системе смазки дизельного двигателя с процессами сгорания топлива и выброса отработанных газов в окружающую среду представляет научный интерес совместное исследование группы учёных в составе M. Mikulskietal, (2022). По мнению авторов, исследованию влияния различных типов масел на функциональность системы смазки посвящено множество научных работ в разных странах. Разнообразие исследований обуславливает наличие множества противоречивых результатов, что приводит к неопределённости в оценках степени влияния количественных и качественных показателей смазочной системы двигателя на течение процессов сгорания топлива и выброса отработанных газов в окружающую среду. Высказанное учёными мнение является спорным в контексте результатов данной работы, ввиду того что при использовании специально разработанной математической модели исследований реально установить фактическую зависимость степени износа дизельного двигателя и срока его эксплуатации от характера изменения количественных и качественных параметров его системы смазки.

Проблематика влияния фактора трения на работоспособность системы смазки имеет ключевое значение в контексте оценки эффективности функционирования дизельного двигателя. В частности, в научно-исследовательской работе группы авторов M.K. Dubey et al, (2022) рассматриваются проблемы влияния модификаторов трения на состояние моторного масла легковых автомобилей с дизельными двигателями. Учёные отмечают, что экспериментальные исследования эффективности применения органических и неорганических модификаторов трения наглядно демонстрируют динамику изменения коэффициента трения, а также параметров контактного износа и последовательности образования смазочной плёнки, которые являются важными качественными показателями системы смазки. Это мнение соответствует полученным в данном исследовании результатам, поскольку установлена непосредственная зависимость влияния силы трения на характер износа дизельного двигателя в процессе эксплуатации.

При оценке характера изменения количественных и качественных показателей работы смазочной системы дизельного двигателя особое значение имеет фактор использования в нём специальных типов топлива, в частности биодизеля. В научном исследовании J. Kataria, S. K. Mahapatra, и K. Kundu, (2019), направленном на изучение различных аспектов данной

проблемы, отмечается, что применение биодизельного топлива значительно снижает показатель трения в смазочной системе, что позитивно сказывается на продолжительности функционирования системы смазки и сроке эксплуатации дизельного двигателя в целом. Данное мнение подтверждается результатами проведенного научного исследования, поскольку доказано влияние снижения силы трения в системе смазки дизельного двигателя на его фактический срок эксплуатации.

Заключение

В ходе выполнения данной научно-исследовательской работы удалось установить, что характер изменения качественных показателей системы смазки при нормальном функционировании дизельного двигателя определяется текущим состоянием моторного масла и его физическими свойствами. Развитие процесса старения моторного масла определяет последовательность окисления его ключевых компонентов, а также их полимеризацию и нейтрализацию. При этом ограничивается допустимый срок службы моторного масла, что предполагает необходимость проведения процедуры его замены чаще, нежели установлено регламентом эксплуатации дизельного двигателя. Кроме того, текущие неисправности системы смазки могут привести к попаданию в моторное масло несгоревших фракций дизельного топлива, что ведёт к существенным качественным изменениям структуры моторного масла. Подобные процессы также имеют место в случае попадания в моторное масло охлаждающей жидкости, вследствие неисправности системы охлаждения дизельного двигателя. В подобных случаях необходимо своевременное принятие мер по ремонту двигателя, во избежание осложнения ситуации с последующим выходом его из строя.

Уменьшение показателя вязкости масла в системе смазки приводит к возрастанию вероятности сбоя нормального режима гидродинамического трения в сопряжённых узлах и механизмах. Одним из ключевых, подлежащих контролю показателей нормального функционирования системы смазки следует считать уровень масла в картере дизельного двигателя. Тем не менее, даже в случае сохранения стабильного уровня данного параметра, качественные параметры функционирования системы в целом могут существенно различаться. Данное обстоятельство следует принимать во внимание при создании и практическом внедрении систем диагностики дизельных двигателей.

Ограничения данного исследования обуславливаются наличием определённых технических характеристик систем смазки дизельных двигателей, оказывающих влияние на параметры работы двигателей в различных режимах.

Перспективы проведения последующих научных исследований в рамках тематики данной работы, обуславливаются необходимостью поиска оптимальных вариантов эксплуатации смазочных систем двигателей.

Вклад авторов:

А.М. Табинбаев – принимал участие в разработке математической модели, подготовке и написании текста статьи, внес существенный вклад в разработку концепции и дизайна исследования, участвовал в анализе и интерпретации полученных результатов, осуществлял критический пересмотр содержания статьи. Утвердил окончательный вариант статьи для публикации и согласился нести ответственность за достоверность данных и целостность исследования.

К.К. Джолдасова – принимала участие в разработке математической модели, подготовке и написании текста статьи. Утвердила окончательный вариант статьи для публикации.

А.М. Биниязов – внес существенный вклад в разработку концепции и дизайна исследования, участвовал в анализе и интерпретации полученных результатов, осуществлял критический пересмотр содержания статьи. Утвердил окончательный вариант статьи для публикации и согласился нести ответственность за достоверность данных и целостность исследования.

А.С. Денисов – участвовал в анализе и интерпретации полученных результатов. Утвердил окончательный вариант статьи для публикации.

Список литературы

1. Биниязов, А.М., Денисов, А.С., Анализ количественных и качественных изменений параметров смазочной системы в процессе эксплуатации дизеля // Наука и техника Казахстана. 2023, №2, с. 119-128.
2. Денисов, А.С., Биниязов, А.М., Требования к диагностическим параметрам работающего масла автомобильных дизельных двигателей // Научный журнал «Новости науки Казахстана», 2019, № 4. с. 127-136.
3. Aulin, V., Slon, V., Research on changes in power of car engines operating in non-stationary conditions, MOTROL. // Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2024. -Vol.17.- No.2. -pp. 103-108.
4. Chybowski, L., Szczepanek, M., A Quantitative and Qualitative Analysis of the Lubricity of Used Lubricating Oil Diluted with Diesel Oil // Applied Sciences. – 2024. - Volume 14. - Issue 11. - pp. 45-67.
5. Dubey, M.K., Chaudhary, R., Tribological evaluation of passenger car engine oil: Effect of friction modifiers // Results in Engineering. – 2022. - Volume 16. 100727.
6. George, S., Balla, S., Effect of diesel soot contaminated oil on engine wear // Wear. - 2022. - Volume 262. - Issues 9–10. - pp. 1113-1122.
7. Hunicz, J., Mikulski, M., Partially premixed combustion of hydrotreated vegetable oil in a diesel engine: Sensitivity to boost and exhaust gas recirculation // Fuel. - 2022. - Volume 307. 121910.
8. Kataria, J., Mahapatra, S.K., Kundu, K. Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous catalysts and its operational characteristics on variable compression ratio CI engine // Journal of the Energy Institute. – 2019. - Volume 92. - Issue 2. - pp. 275-287.
9. McClellan, R.O., Hesterberg, T.W., Woll, J.C., Evaluation of carcinogenic hazard of diesel engine exhaust needs to consider revolutionary changes in diesel technology // Regulatory Toxicology and Pharmacology. – 2022. - Volume 63. - Issue 2, - pp. 225-258.
10. Mikulski, M., Hunicz, J., Tyre pyrolytic oil fuel blends in a modern compression ignition engine: A comprehensive combustion and emissions analysis // Fuel. - 2022. - Volume 320. 123869.
11. Pardo-Garcia, C., Orjuela-Abril, S., Pabon-Leon, J., Investigation of Emission Characteristics and Lubrication Oil Properties in a Dual Diesel–Hydrogen Internal Combustion Engine // Lubricants. – 2022. - №10(4). - pp. 1-15.
12. Syno, A., Czarnigowski, J., Jaklinski, P., Detection of cylinder misfire in an aircraft engine using linear and non-linear signal analysis // Measurement. - 2021. - Volume 174, 108982.

13. Tabinbayev A.M., Diagnosis and assessment of the lubrication system of KAMAZ diesel engines / A. Tabinbayev, K. Okas, L. Nurgaliyev, L. Sarsenbayeva, A. Biniyazov // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. Pages 1-15. 2026.
14. Unver, B., Altin, I., Gurgen, S., Risk ranking of maintenance activities in a two-stroke marine diesel engine via fuzzy AHP method // Applied Ocean Research. - 2021. - Volume 111, 102648.
15. Zare, A., Bodisko, T.A., Nabi, M.N., Hossain, F.M., Ristovski, Z.D., Brown, R.J., 2021, Fuel, Volume 228, pp. 390-404.

A.M. Tabinbayev¹, K.K. Dzholdasova¹, A.M. Biniyazov^{*2}, A.S. Denisov³

¹ Satbayev University, Almaty city, Republic of Kazakhstan

² West Kazakhstan Innovation and Technology University, Uralsk city, Republic of Kazakhstan

³ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov city, Russian Federation

Researching the dynamics of engine oil property changes and diesel lubrication system condition during service life

Abstract. The aim of this study is to provide a detailed analysis of the relationship between the quantitative and qualitative performance parameters of a diesel engine lubrication system and the patterns of their change throughout the operational period. Understanding these dynamics is critical for enhancing the reliability and durability of diesel power units. The methodology involved a comprehensive computational, analytical, and experimental investigation, utilizing physico-chemical analysis of motor oil samples and monitoring the engine's operational indicators. It was established that ongoing changes in the physico-chemical composition of the motor oil are a key factor determining the dynamics of all quantitative and qualitative indicators within the lubrication system. The progression of oil aging (including polymerization) directly affects the rate of component degradation, significantly shortening its useful service life and necessitating strict adherence to replacement schedules. The study also identified a specific risk: changes in the technical condition of the lubrication system can lead to oil fractions entering the fuel system. This constitutes a serious violation of operational standards, causing off-design operating modes and multiplying the risk of premature engine wear and failure. In conclusion, the dynamics of change in lubrication system indicators is a complex, multifactorial dependency that can be represented by a graphical model. The practical value of this research lies in developing a foundation for optimizing maintenance strategies and increasing the operational efficiency of diesel engines.

Keywords: automotive machinery, design of units and assemblies, engine wear, change in oil properties, oil consumption due to evaporation and burning, fuel economy regulation.

References

1. Biniyazov, A.M., Denisov, A.S., Analiz kolichestvennyh i kachestvennyh izmenenij parametrov smazочноj sistemy v processe ekspluatatsii dizelya [Tekst] // Nauka i tekhnika Kazahstana.-2023.-№2. - S. 119-128.

2. Denisov, A.S., Biniyazov, A.M., Trebovaniya k diagnosticheskim parametram rabotayushchego masla avtomobil'nyh dizel'nyh dvigatelej [Tekst] // Nauchnyj zhurnal «Novosti nauki Kazahstana». - 2019. - № 4. - S. 127-136.
3. Aulin, V., Slon, V., Research on changes in power of car engines operating in non-stationary conditions, MOTROL. // Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2024. -Vol.17.- No.2. -pp. 103-108.
4. Chybowski, L., Szczepanek, M., A Quantitative and Qualitative Analysis of the Lubricity of Used Lubricating Oil Diluted with Diesel Oil // Applied Sciences. – 2024. - Volume 14. - Issue 11. - pp. 45-67.
5. Dubey, M.K., Chaudhary, R., Tribological evaluation of passenger car engine oil: Effect of friction modifiers // Results in Engineering. – 2022. - Volume 16. 100727.
6. George, S., Balla, S., Effect of diesel soot contaminated oil on engine wear // Wear. - 2022. - Volume 262. - Issues 9–10. - pp. 1113-1122.
7. Hunicz, J., Mikulski, M., Partially premixed combustion of hydrotreated vegetable oil in a diesel engine: Sensitivity to boost and exhaust gas recirculation // Fuel. - 2022. - Volume 307. 121910.
8. Kataria, J., Mahapatra, S.K., Kundu, K. Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous catalysts and its operational characteristics on variable compression ratio CI engine // Journal of the Energy Institute. – 2019. - Volume 92. - Issue 2. - pp. 275-287.
9. McClellan, R.O., Hesterberg, T.W., Woll, J.C., Evaluation of carcinogenic hazard of diesel engine exhaust needs to consider revolutionary changes in diesel technology // Regulatory Toxicology and Pharmacology. – 2022. - Volume 63. - Issue 2, - pp. 225-258.
10. Mikulski, M., Hunicz, J., Tyre pyrolytic oil fuel blends in a modern compression ignition engine: A comprehensive combustion and emissions analysis // Fuel. - 2022. - Volume 320. 123869.
11. Pardo-Garcia, C., Orjuela-Abril, S., Pabon-Leon, J., Investigation of Emission Characteristics and Lubrication Oil Properties in a Dual Diesel–Hydrogen Internal Combustion Engine // Lubricants. – 2022. - №10(4). - pp. 1-15.
12. Syno, A., Czarnigowski, J., Jaklinski, P., Detection of cylinder misfire in an aircraft engine using linear and non-linear signal analysis // Measurement. - 2021. - Volume 174, 108982.
13. Tabinbayev A.M., Diagnosis and assessment of the lubrication system of KAMAZ diesel engines / A. Tabinbayev, K. Okas, L. Nurgaliyev, L. Sarsenbayeva, A. Biniyazov // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. Pages 1-15. 2026.
14. Unver, B., Altin, I., Gurgen, S., Risk ranking of maintenance activities in a two-stroke marine diesel engine via fuzzy AHP method // Applied Ocean Research. - 2021. - Volume 111, 102648.
15. Zare, A., Bodisko, T.A., Nabi, M.N., Hossain, F.M., Ristovski, Z.D., Brown, R.J., 2021, Fuel, Volume 228, pp. 390-404.

Сведения об авторах:

Табинбаев Аманжол Муратович, докторант по образовательной программе «Транспорт, транспортная техника и технологии», кафедры «Технологические машины и транспорта». Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы 410003 Республика Казахстан.

Джолдасова Куралай Каирберлиновна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Технологические машины и транспорта».

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы 410003 Республика Казахстан.

Биниязов Абзал Махсотович, доктор философии (PhD), ассоциированный профессор кафедры «Транспорт и технологии», Западно Казахстанский инновационно-технологический университет, Уральск, 090009, Республика Казахстан

Денисов Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей». Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, г. Саратов 410003 Российская федерация.

Tabynbayev Amanzhol Muratovich, Doctoral Student in the educational program "Transport, Transport Equipment and Technologies", Department "Technological Machines and Transport". Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty 410003, Republic of Kazakhstan.

Dzholdasova Kuralay Kairberlinovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department "Technological Machines and Transport". Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, 410003, Republic of Kazakhstan.

Biniyazov Abzal Makhsotovich, Doctor of Philosophy (PhD), Associate Professor, Department "Transport and Technologies", West Kazakhstan Innovation and Technology University, Uralsk, 090009, Republic of Kazakhstan.

Denisov Alexander Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department "Organization of transportation, traffic safety and car service". Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov 410003, Russian Federation.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-145-162>

Кластерная платформа как центр компетенций цифровизации на основе модели «multilevel integrated helix-ecosystem model»

**М.М. Идрисов¹  , С.Е. Бекжанова*¹  , Д.З. Бекжанов²  ,
А.В. Мухаметжанова³ **

*¹Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан*

*²Костанайский инженерно-экономический университет имени М. Дулатова,
Костанай, Казахстан*

*³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана,
Казахстан*

*E mail: idrisov.m@stud.satbayev.university, bekzhanova@satbayev.university
Dinar.bekzhanov@mail.ru mukhametzhanova_av@enu.kz*

Аннотация. В статье рассматривается концепция кластерной платформы как центра компетенций цифровизации транспортной отрасли на основе модели MINEM (Multilevel Integrated Helix-Ecosystem Model). Предложенная модель объединяет элементы тройной, четверной и пятерной спирали с экосистемным подходом, обеспечивая многоуровневое взаимодействие между участниками цифровой трансформации. Определены функциональные модули платформы, включающие подготовку кадров, координацию научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, трансфер технологий и развитие цифровой инфраструктуры. Представлены результаты концептуального моделирования и обсуждаются перспективы применения модели MINEM для создания устойчивых цифровых экосистем в транспортной сфере. Дополнительно обоснована роль кластерной платформы как интеграционного механизма согласования интересов государства, бизнеса, научно-образовательных организаций и общества. Показано, что внедрение модели способствует повышению эффективности управления инновациями, ускорению цифровой трансформации логистических процессов и формированию устойчивых цепей поставок. Особое внимание уделено вопросам масштабируемости платформы и адаптации ее архитектуры к различным уровням транспортных систем. Сделан вывод о том, что MINEM-модель обеспечивает системное развитие отрасли за счет синергии участников и усиления инновационного потенциала транспортного комплекса. Платформа обеспечивает цифровую координацию участников транспортной инновационной экосистемы отрасли эффективно.

Реализация модели повышает устойчивость и конкурентоспособность транспортной системы в целом.

Ключевые слова: цифровизация транспорта, кластерная платформа, центр компетенций, цифровая экосистема, спиральное взаимодействие.

Received 31.10.2025. Revised 07.04.2026. Accepted 27.04.2026. Available online 30.03.2026

* the correspondence author

Введение

Цифровизация транспортной отрасли приобретает стратегическое значение в условиях глобальной трансформации производственно-логистических цепочек и стремительного развития информационных технологий. Эффективное внедрение цифровых решений требует не только технической модернизации, но и выстраивания устойчивых межотраслевых связей между участниками транспортной, научной и образовательной сфер [1,2]. В этой связи особую актуальность приобретает создание кластерных платформ как центров компетенций цифровой трансформации.

Кластерный подход обеспечивает институциональную основу для взаимодействия различных заинтересованных сторон — от промышленных предприятий и транспортных операторов до исследовательских центров и государственных структур. Однако традиционные модели кластеризации часто не охватывают всей сложности процессов цифровизации, в том числе необходимости мультиуровневой координации, гибкой адаптации к изменениям внешней среды и интеграции инновационных практик. Для решения этих задач предлагается использование многоуровневой интегрированной модели "Multilevel Integrated Helix-Ecosystem Model" (MINEM), которая будет совмещать элементы тройной, четверной и пятерной спиралей с принципами экосистемного управления.

Предлагается концептуальная архитектура кластерной платформы, основанной на модели MINEM, предназначенной для формирования и развития цифровых компетенций в транспортном секторе. Основное внимание уделяется механизмам взаимодействия участников, обмену знаниями, трансферу технологий и институциональному сопровождению цифровых инициатив. Предлагаемый подход направлен на повышение устойчивости цифровых трансформаций и обеспечение синергетического эффекта от объединения ресурсов различных сфер.

Таким образом, статья раскрывает потенциал кластерной цифровой платформы как ключевого элемента инфраструктуры цифровизации транспорта, ориентированного на долгосрочное развитие компетенций, инноваций и партнерства.

Методология.

Современные вызовы в области цифровизации требуют создания интегрированных платформ, которые смогут эффективно связать различные сектора, включая производство, образование и науку. Эта необходимость обусловлена растущей потребностью в ускорении инновационных процессов, повышении производительности и обеспечении устойчивого развития на всех уровнях взаимодействия. Исследование опирается на комплексный методологический подход, включающий системный анализ, теорию кластеризации, а также моделирование взаимодействий по спиральным и экосистемным моделям.

Основные этапы методики включают:

1. Концептуальное моделирование кластерной платформы на основе анализа существующих подходов к формированию инновационных кластеров и моделей спирального взаимодействия.
2. Идентификацию ключевых субъектов цифровизации транспортной отрасли и анализ их функциональных ролей в рамках экосистемы (промышленные предприятия, университеты, исследовательские центры, органы власти, гражданское общество).
3. Разработку структурно-функциональной схемы кластерной платформы как центра компетенций: образовательный контур, трансфер технологий, регуляторное сопровождение, цифровая инфраструктура.
4. Экспертную валидацию модели, основанную на опросах и интервью с представителями транспортных компаний, научных организаций и органов управления, а также сопоставление с успешными зарубежными примерами.

Информационную базу составили аналитические отчеты, государственные программы, научные публикации и кейсы реализации кластерных инициатив в транспортной сфере.

Обзор существующих моделей:

Модель Triple Helix (Тройная спираль) сосредоточена на взаимодействии трех ключевых секторов: государства, науки и бизнеса. Согласно этой модели, инновации возникают через их сотрудничество, где каждый сектор играет свою роль в создании новых знаний и технологий. Ключевые особенности данной модели заключаются в сосредоточении на взаимодействии научных учреждений, бизнеса и государства, сотрудничество между этими секторами способствует экономическому росту и технологическим инновациям. Однако имеются следующие недостатки: ограниченный подход, так как модель не учитывает участие других важных участников, таких как общество и экосистема; сложности в балансировке интересов трех секторов, особенно в условиях глобализации [3].

Модель Quadruple Helix (Квадрупле спираль) расширяет концепцию Triple Helix, добавляя в нее элемент гражданского общества. Это взаимодействие четырех сфер позволяет глубже учитывать социальные, культурные и общественные аспекты в процессе инновационного развития. Данная модель включает гражданское общество, которое участвует в процессе инноваций, учитывает социальные инновации и потребности населения. Недостатки модели заключаются в том, что включение общества может создать слишком широкий фокус, это затрудняет концентрацию на ключевых инновационных процессах; несмотря на внимание к социальной составляющей, экологические и устойчивые аспекты не всегда должным образом отражаются [4,5]. Модель Ecosystem Approach (Подход к экосистемам) рассматривает инновации как часть более широкого экосистемного взаимодействия, включая бизнес, науку, государственные структуры и другие компоненты (например, природу, культуру, социальные аспекты). Инновационные процессы рассматриваются как результат взаимодействия различных элементов экосистемы. Модель более гибкая и целостная, чем Triple Helix, поскольку включает разнообразие факторов. К недостаткам данной модели можно отнести: сложность управления и координации многочисленных компонентов экосистемы; высокую степень неопределенности и нестабильности, что делает модель сложной для практической реализации [6,7]. Модель Network Models (Сетевые модели) ориентированы на создание сетей взаимодействия между различными организациями и учреждениями, где успешное инновационное развитие зависит от качества этих сетевых связей. Сетевые модели

подчеркивают важность обмена знаниями и ресурсами, ориентированы на создание взаимосвязанных сетей, что позволяет эффективно использовать знания и ресурсы. Модель гибкая, легко адаптируемая к различным условиям. В то же время эффективность модели сильно зависит от качества взаимодействий внутри сети: возможны сложности в координации участников сети в управлении большими объемами информации [8].

Каждая из рассмотренных моделей имеет свои сильные стороны, но также и недостатки, которые могут препятствовать эффективному взаимодействию и цифровой трансформации. Синтез подходов представляет собой логичный шаг для преодоления этих ограничений и создания более комплексной модели, которая охватывает широкий спектр факторов.

Модель МІНЕМ (Многоуровневая интегрированная модель спирали-экосистемы) предлагает комплексный подход к взаимодействию между различными секторами и уровнями экосистемы инноваций. Основным принципом модели является многоуровневая интеграция, которая охватывает несколько взаимосвязанных уровней, каждый из которых вносит свой вклад в общий процесс цифровой трансформации и инновационного развития.



Рисунок 1. Модель Multilevel Integrated Helix-Ecosystem Model (MİNEM)

Модель МІНЕМ строится на принципе интеграции различных уровней взаимодействия между ключевыми участниками инновационного процесса. В отличие от традиционных моделей, МІНЕМ акцентирует внимание на том, как эти уровни взаимодействуют не только внутри каждого уровня, но и между собой, обеспечивая эффективный обмен знаниями, технологиями и ресурсами. Это позволяет создавать более гибкие и устойчивые системы, способные быстро адаптироваться к изменениям внешней среды.

На рисунке 1 приведена модель МІНЕМ, которая иллюстрирует многоуровневую структуру кластерной платформы цифровизации: в центре расположен Центр компетенций и обмена опытом, вокруг которого организовано взаимодействие пяти

ключевых участников (наука, образование, бизнес, государство и общество). Модель интегрирует экосистемные элементы и методологическую надстройку, обеспечивая гибкость и устойчивость процессов цифровой трансформации.

Модель структурирована в три взаимосвязанных уровня:

1. Центральный уровень — центр компетенций и обмена опытом, выступающий ядром для агрегирования знаний, технологий и методологий цифровой трансформации. Этот уровень включает научные и исследовательские институты, которые проводят фундаментальные и прикладные исследования, а также создают новые технологии и идеи, которые затем могут быть использованы на других уровнях.

Основные функции:

Проведение фундаментальных исследований и разработок.

Обучение и подготовка кадров, создание образовательных программ.

Создание и распространение новых знаний и технологий.

Содействие трансферу технологий и инноваций в другие сектора.

2. Средний уровень включает институциональных участников Helix, таких как университеты, исследовательские организации, предприятия и государственные учреждения, которые взаимодействуют друг с другом для реализации инновационных решений. Эти институты выполняют ключевую роль в связывании науки и бизнеса, трансформируя научные исследования в коммерчески жизнеспособные продукты и решения.

Основные функции:

Применение результатов исследований для создания инноваций в бизнесе и промышленности.

Формирование совместных проектов между научными учреждениями и промышленными предприятиями.

Обеспечение государственной политики и стратегического направления в области инноваций и цифровой трансформации.

3. Внешний уровень включает экосистемные элементы (инновационные хабы, цифровые фабрики, площадки пилотных проектов, инфраструктуры открытых данных), обеспечивающие динамическую поддержку и масштабирование цифровых решений. Дополнительно модель включает методологическую надстройку, ориентированную на стандартизацию процессов взаимодействия, использование гибких проектных методик (Agile, Design Thinking) и принятие решений на основе данных.

Основные функции:

Влияние на разработку продуктов и услуг с учетом потребностей общества.

Участие в реализации инновационных решений и экосистемных инициатив.

Учёт экологических, социальных и культурных факторов при разработке новых решений.

Гибкое реагирование на изменения внешней среды, включая законодательные и экологические факторы.

1. Математическая модель обработки данных и взаимодействия пользователей

Для построения математической модели взаимодействия различных компонентов платформы MINEM (например, устройств, пользователей и сервисов) можно использовать систему дифференциальных уравнений, описывающих поток данных через систему и взаимодействие компонентов платформы.

Модель потока данных:

Пусть $D(t)$ — это функция, описывающая объем данных, который обрабатывается на платформе в момент времени t . Поток данных может зависеть от входных и выходных данных, а также от времени обработки.

Математически поток данных можно записать как:

$$\frac{dD(t)}{dt} = f(P(t), U(t), T(t)) - g(D(t)), \quad (1)$$

где $P(t)$ — количество производственных процессов на платформе, зависящих от времени,

$U(t)$ — количество пользователей, подключенных к платформе в момент времени t ,

$T(t)$ — технология или уровень цифровизации, использующийся в данный момент,

$g(D(t))$ — функция, описывающая уменьшение объема данных (например, за счет их хранения или архивации).

Пример реализации функции $f(P(t), U(t), T(t))$:

$f(P(t), U(t), T(t))$ может учитывать количество процессов, требующих обработки данных, число пользователей, которые генерируют запросы на платформе, и мощность используемых технологий. Тогда:

$$f(P(t), U(t), T(t)) = \alpha \cdot P(t) + \beta \cdot U(t) \cdot T(t), \quad (2)$$

где α и β — коэффициенты, которые могут быть определены на основе анализа данных и оценок ресурсов платформы.

2. Математическая модель оптимизации производственных процессов

Платформа МІНЕМ может использовать методы оптимизации для управления производственными процессами на предприятиях. Один из возможных методов — это оптимизация с учетом ограничений, где цели платформы включают максимизацию прибыли, минимизацию затрат или максимизацию эффективности.

Модель для оптимизации процессов:

Maximize

$$Z = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n, \quad (3)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ — количество производственных единиц или ресурсов, необходимых для различных процессов,

$c_1, c_2, \dots, c_n$ — коэффициенты, отражающие стоимость, прибыль или другие параметры, связанные с процессами.

При этом существуют ограничения, такие как:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot x_j \leq b_i \text{ для } i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

где a_{ij} — коэффициенты, отражающие, как каждый процесс влияет на каждый ресурс,

b_i — доступное количество ресурса i .

Также могут быть добавлены нелинейные ограничения, например, связанные с производственной мощностью или затратами на материалы.

3. Математическая модель безопасности данных

Для обеспечения безопасности платформы можно использовать модели защиты

данных, основанные на теории вероятностей и статистике.

Модель риска утечки данных:

Пусть $R(t)$ — это вероятность утечки данных на момент времени t , а $S(t)$ — это степень защиты. Модель вероятности утечки может быть выражена как:

$$R(t)=1-S(t) \quad (5)$$

где $S(t)$ — вероятность того, что система защиты будет эффективной в момент времени t . Эта величина может зависеть от уровня цифровой защиты, включающей шифрование, мониторинг и другие механизмы безопасности.

В рамках исследования оптимизация цифровизации формулируется как задача математического программирования с неопределёнными параметрами. Приведем ключевые уравнения и допущения.

Целевая функция оптимизации направлена на максимизацию интегрального показателя эффективности:

$$\max Z = \alpha D_{\{final\}} - \beta R_{\{final\}}, \tag{6}$$

где $D_{\{final\}}$ — объём цифровых данных в конце периода,

$R_{\{final\}}$ — уровень рисков,

$\alpha, \beta > 0$ — коэффициенты весов.

Ограничения по ресурсам

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq B, \quad (7)$$

$$x_2 \leq S, \quad (8)$$

где B — бюджет (случайная величина),

S — кадровый потенциал (число IT-специалистов).

Рост объёма данных описывается выражением:

$$D_{\{t+1\}} = D_t \cdot (1 + g) + \gamma x_1, \quad (9)$$

где g — темп роста спроса,

γ — коэффициент вклада инвестиций в инфраструктуру.

Снижение рисков:

$$R_{\{t+1\}} = R_t \cdot (1 - \delta) - \theta x_3, \quad (10)$$

где δ — коэффициент снижения рисков,

θ — эффективность инновационных проектов.

Распределения параметров

бюджет:

$$B \text{Triangular} (80,100,120), \quad (11)$$

кадровый потенциал:

$$S \text{Uniform} (20,50), \quad (12)$$

темпы инноваций:

$$rN(0.05, 0.012), \quad (13)$$

коэффициент снижения рисков:

$$\delta Uniform(0.7, 0.9), \quad (14)$$

рост спроса:

$$gN(1.03, 0.022) \quad (15)$$

Latin Hypercube Sampling (LHS). Разбиение диапазона каждого параметра на NN равновероятных интервалов и выбор точек:

$$\{X_{\{i1\}}, X_{\{i2\}}, \dots, X_{\{ik\}}\}, i = 1, \dots, N, \quad (16)$$

где k — число параметров,

$N=10000$ — количество симуляций.

Частные ранговые коэффициенты корреляции (PRCC)

$$\rho_{x_j, Y} = \text{Cov}(R_{x_j}, R_Y) / (\sigma_{R_{x_j}} \cdot \sigma_{R_Y}) \quad (17)$$

где R_{x_j} — остатки регрессии параметра X_j на остальные параметры,

R_Y — остатки регрессии отклика Y на остальные параметры.

Регрессионный анализ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon, \quad (18)$$

где $Y \in \{D_{final}, R_{final}, Z\}$, X_j — входные параметры,

β_j — стандартизированные коэффициенты регрессии.

Чувствительность решений. Оптимальные решения зависят от ограничений:

$$x_j^* = f(B, S), j = 1, 2, 3, \quad (19)$$

а чувствительность выражается через:

$$\Delta x_j^* = x_{j(B+\Delta B, S+\Delta S)}^* - x_{j(B, S)}^* \quad (20)$$

1. Модельные допущения. Предлагаемый анализ основан на динамической модели оптимизации распределения ресурсов в рамках Multilevel Integrated Helix-Ecosystem Model (MINEM). Были приняты следующие допущения:

- система рассматривается на горизонте в один год с дискретными временными шагами (месяцами).
 - оптимизируются три ключевых ресурса:
- x_1 — инвестиции в цифровую инфраструктуру,

x_2 — кадровые ресурсы (IT-специалисты),
 x_3 — технологические инновационные проекты.

Ограничения включают лимит бюджета и численности специалистов.

Основные показатели эффективности:

- совокупный объём данных на конец периода D_{final} ,
- максимальный уровень риска R_{final} ,
- целевая функция Z , отражающая эффективность системы.

2. Распределения параметров. Неопределённость параметров модели представлена вероятностными распределениями, основанными на эмпирических исследованиях, экспертных оценках и национальной статистике Казахстана:

Бюджет — треугольное распределение ($\min = 80$, $\text{mean} = 100$, $\max = 120$).

Кадровый потенциал (IT staff) — равномерное распределение (20–50 специалистов).

Темп внедрения инноваций — нормальное распределение ($\text{ср.} = 0,05$, $\sigma = 0,01$).

Коэффициент снижения рисков — равномерное распределение (0,7–0,9).

Рост внешнего спроса — нормальное распределение ($\text{ср.} = 1,03$, $\sigma = 0,02$).

Все случайные входные данные были нормированы для возможности сопоставления их влияния.

3. Метод Latin Hypercube Sampling (LHS). Для эффективного исследования пространства неопределённости применялся метод Latin Hypercube Sampling (LHS) с числом итераций 10 000. LHS обеспечивает равномерное покрытие диапазонов распределений параметров и более высокую эффективность по сравнению с простым случайным выбором. Каждая выборка параметров использовалась как вход для задачи оптимизации, что позволяло получить набор выходных показателей (D_{final}, R_{final}, Z).

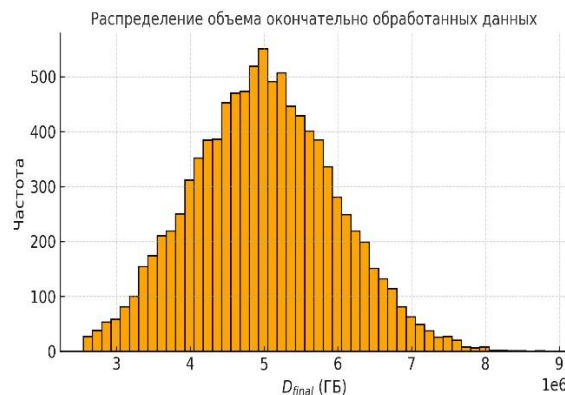


Рисунок 2. Распределение объема конечных обработанных данных.

4. Анализ чувствительности (PRCC). Для оценки влияния неопределённых параметров на результаты модели были рассчитаны частные ранговые коэффициенты корреляции (PRCC):

- Входные переменные были преобразованы в ранги для снижения влияния нелинейности.
- PRCC рассчитывались между каждым параметром и выходными показателями с контролем остальных параметров.

- Положительное значение PRCC указывает, что рост параметра приводит к увеличению выходной переменной, отрицательное — к снижению.

Метод PRCC широко применяется в системном моделировании, так как учитывает монотонные, но нелинейные зависимости. Статистическая значимость оценивалась на уровне доверия 95%.

Гистограмма из выборок по методу Монте-Карло (10 тыс. LHS). Источник: расчеты авторов, основанные на статистике Казахстана.

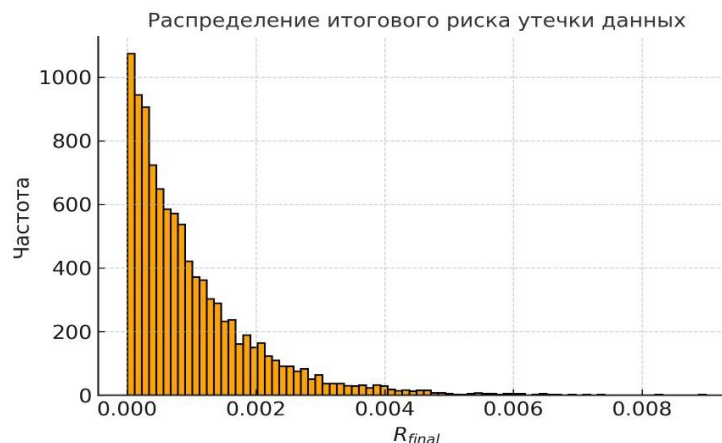


Рисунок 3. Распределение риска утечки конечных данных R (12).

Гистограмма по методу Монте-Карло (10 тыс. LHS). Источник: расчеты авторов.

5. Регрессионный анализ. В качестве дополнительной проверки был проведён стандартизированный множественный регрессионный анализ. Коэффициенты регрессии позволили подтвердить результаты PRCC и выявить возможные эффекты взаимодействия параметров.

6. Чувствительность оптимизации. Также была проанализирована чувствительность оптимальных решений (x_1^* , x_2^* , x_3^*) к изменению бюджета и кадрового потенциала.

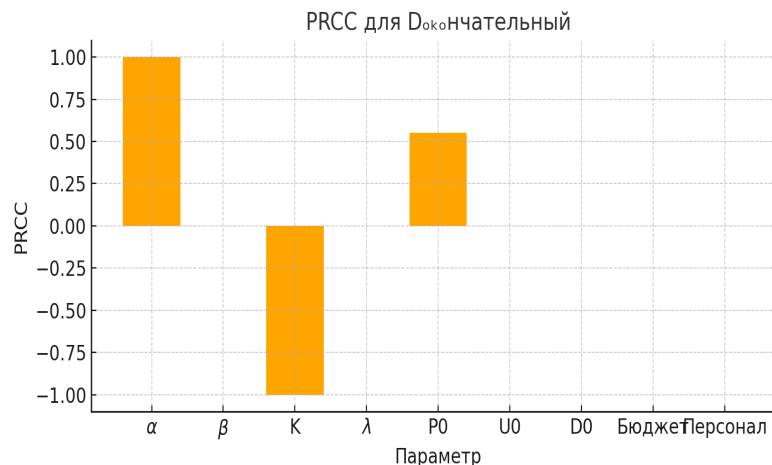


Рисунок 4. Коэффициенты частичной ранговой корреляции (PRCC) для D_{final} .

Положительные значения указывают на прямую связь после учета других параметров.

Результаты представлены в табличной форме (значения решений для разных значений бюджета и кадров) и графически (тепловые карты решений).

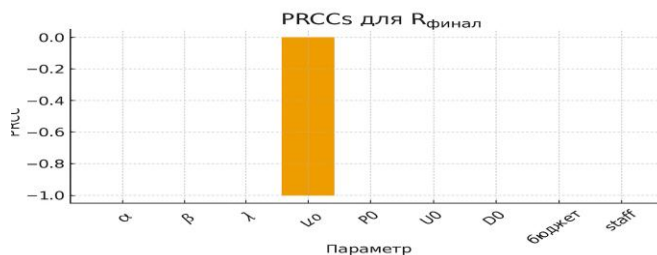


Рисунок 5 . PRCC для $R_{\text{финал}}$.

Более высокий абсолютный PRCC указывает на более сильное влияние на риск.

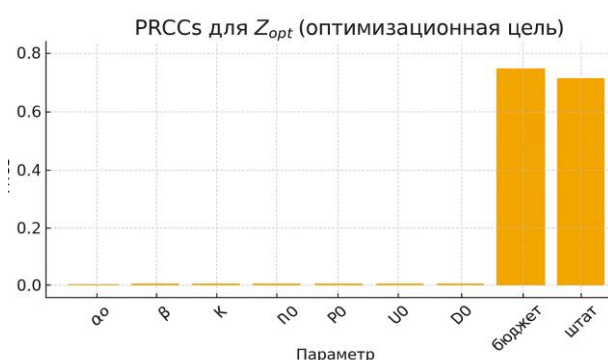


Рисунок 6. PRCC для задачи оптимизации Z

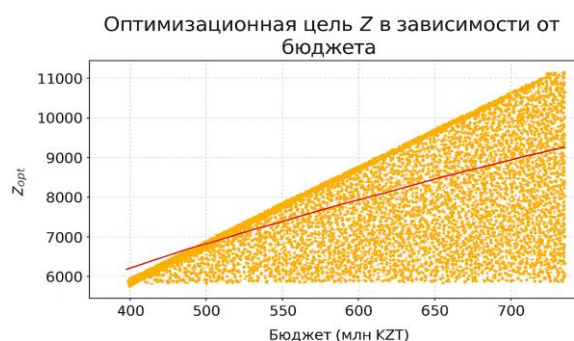


Рисунок 7. Точечная диаграмма зависимости Z от бюджета с линейной линией тренда демонстрирует зависимость цели от доступного бюджета.

Таблица 1. Коэффициенты частной ранговой корреляции (PRCC).

Параметр	PRCC ($D_{\text{финал}}$)	PRCC ($R_{\text{финал}}$)	PRCC (Z_{opt})
α	0.9765	0.0001	-0.0121
β	0.0080	-0.0022	-0.0085
k	-0.9753	0.0002	0.0048
λ	0.0103	-1.0000	0.0027
P_0	0.5275	0.0004	0.0048
U_0	-0.0055	0.0013	0.0045
D_0	-0.0063	-0.0021	0.0051
Бюджет	0.0028	-0.0031	0.7441
Персонал	-0.0130	-0.0002	0.8024

Более светлые области указывают на большее количество выделенных единиц.

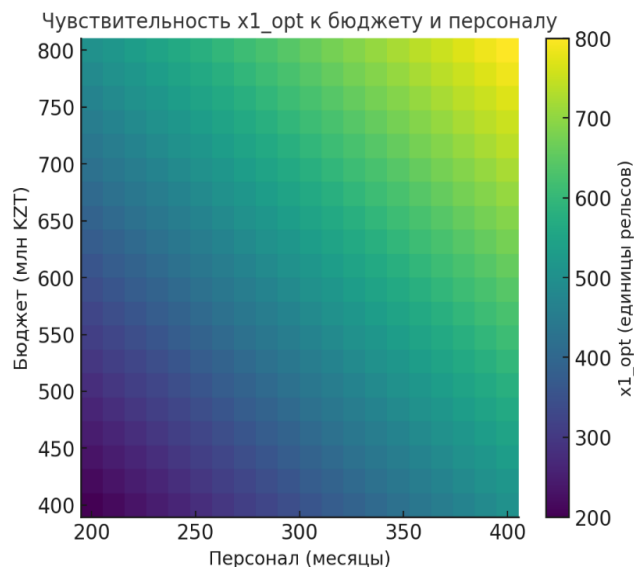


Рисунок 8. Тепловая карта оптимального распределения x (железнодорожных единиц) в зависимости от бюджета и наличия IT-персонала.
Таблица 2. Коэффициенты регрессии (стандартизированные предикторы).

Параметр	coef (D_final)	coef (R_final)	coef (Z_opt)
α	1020252.1109	0.0000	-5.9928
β	842.1122	0.0000	-8.3481
k	-1021131.5520	0.0000	2.5331
λ	-1795.4710	-0.0036	0.3112
P_0	150225.3692	-0.0000	4.3058
U_0	2902.1728	0.0000	3.5037
D_0	-2216.4758	-0.0001	7.3986
Бюджет	-479.3874	0.0000	747.0550
Персонал	-4951.6528	0.0000	865.4619

Источники: Комитет по статистике Республики Казахстан, национальные транспортные отчёты и интернет ресурсы.

Результаты и обсуждение

Предложенная модель кластерной платформы на основе MINEM демонстрирует следующие ключевые особенности:

Многоуровневая интеграция участников (государство, бизнес, наука, общество,

окружающая среда), обеспечивающая согласованность стратегических и операционных решений; Спиральная логика взаимодействия (Triple, Quadruple, Quintuple Helix), способствующая развитию инновационной активности и обмену знаниями; Экосистемная структура, обеспечивающая адаптацию к изменениям внешней среды, устойчивость процессов цифровизации и устойчивое развитие.

Функциональные модули платформы:

Архитектура платформы обеспечивает как вертикальную координацию (от государственных стратегий до уровня предприятия), так и горизонтальное взаимодействие (между субъектами одного уровня), создавая условия для синергии и масштабируемости. Модель МІНЕМ опирается на несколько методологических принципов, которые обеспечивают ее успешное функционирование: Интеграция знаний и технологий: это базовый принцип модели, который гарантирует, что взаимодействие между уровнями будет динамичным и эффективным. Интеграция осуществляется через создание платформ и инструментов для обмена знаниями, а также через внедрение новых подходов и методов в цифровой трансформации. Гибкость и адаптивность: МІНЕМ позволяет каждому из уровней адаптироваться к изменениям внешней среды, обеспечивая соответствующие механизмы для гибкой перераспределения ресурсов, пересмотра стратегий и подходов в зависимости от изменений в экосистеме.

Системный подход: Модель предполагает работу всех уровней как части единой экосистемы, где каждый элемент взаимозависим от других, что способствует более эффективному решению задач и достижению результатов.

Коллаборация и партнерство: Модель подчеркивает важность взаимодействия между всеми уровнями, включая создание партнерских отношений и установление устойчивых сетевых связей для оптимизации ресурсов и усиления инновационного потенциала.

Результаты исследования подтверждают, что кластерная платформа на основе модели МІНЕМ способна выполнять функции эффективного центра компетенций цифровизации в транспортной сфере. В отличие от традиционных моделей кластеров, МІНЕМ предлагает интеграцию институциональных, образовательных, технологических и экологических компонентов, что особенно актуально в условиях нестабильной технологической среды.

Модель способствует не только аккумулированию знаний и цифровых ресурсов, но и формированию культуры совместного развития, где участники платформы становятся активными соавторами цифровых решений. Особое значение имеет связь платформы с образовательной системой, позволяющая готовить кадры нового поколения с актуальными цифровыми компетенциями.

Следует отметить, что успешная реализация модели требует институциональной поддержки, наличия нормативной базы, а также заинтересованности участников в совместной работе [10,11]. Кроме того, важно обеспечить оценку эффективности функционирования платформы, ее масштабируемость на другие регионы и подсекторы транспорта (железнодорожный, автомобильный, мультимодальный и т.д.).

Заключение

Предложенная в статье концепция кластерной платформы, основанная на модели МІНЕМ, представляет собой инновационный подход к организации цифровой трансформации транспортной отрасли. Многоуровневая интеграция участников, спиральная логика взаимодействия и экосистемная структура позволяют платформе

эффективно выполнять функции центра компетенций, объединяя образование, науку, бизнес и государственное управление.

Модель МІНЕМ демонстрирует потенциал для создания устойчивой институциональной среды, способной не только аккумулировать и распространять цифровые знания, но и стимулировать инновационную активность, поддерживать развитие человеческого капитала и обеспечивать адаптивное управление цифровыми процессами.

В дальнейшем рекомендуется проведение пилотных проектов по реализации модели в конкретных транспортных кластерах, а также разработка методик количественной оценки эффективности функционирования платформы. Полученные результаты могут быть использованы в формировании государственной политики в области цифровизации и при проектировании региональных программ развития транспортной инфраструктуры.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования BR27198643 «Развитие цифровых компетенций человеческого капитала в промышленности и логистике через кластерное взаимодействие науки, образования и индустрии» при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Вклад авторов

М.М. Идрисов – Сбор материалов, анализ полученных данных

С.Е. Бекжанова – Разработка концепции

Д.З. Бекжанов – Сбор данных и разработка концепции

А.В. Мухаметжанова – Анализ результатов исследования, утверждение окончательной версии статьи, представленной к публикации

Список литературы

1. Правительство Республики Казахстан. (2023). Концепция цифровой трансформации, развития отрасли информационно-коммуникационных технологий и кибербезопасности на 2023–2029 годы, Постановление Правительства Республики Казахстан № 269.
2. Правительство Республики Казахстан. (2023). Концепция развития высшего образования и науки в Республике Казахстан на 2023–2029 годы, Постановление Правительства Республики Казахстан № 248.
3. Etzkowitz, H. and Leydesdorff, L. (2000). The Triple Helix: University–Industry–Government Relations, Routledge, London.
4. Carayannis, E. G. and Campbell, D. F. J. (2012). Mode 3 Knowledge Production in Quadruple Helix Innovation Systems: 21st-Century Democracy, Innovation, and Entrepreneurship for Development, Springer.
5. Kulikauskienė, K. (2021). “The Theoretical Quadruple Helix Model for Digital Inclusion Increase”, Management of Organizations: Systematic Research, 85(1), pp. 13–32.
6. Carayannis, E. G. and Campbell, D. F. J. (2019). Smart Quintuple Helix Innovation Systems: How Social Ecology and Environmental Protection are Driving Innovation, Sustainable Development and Economic Growth, Springer.

7. Kunwar, R. R. and Ulak, N. (2024). "Extension of the Triple Helix to Quadruple to Quintuple Helix Model", *Journal of APF Command and Staff College*, 7(1), pp. 241–280.
8. Zarei, F., Ryckebusch, J., Schoors, K. et al. (2023). "Social network heterogeneity benefits individuals at the expense of groups in the creation of innovation", *Journal of Physics: Complexity*, 3(4), 045002.
9. Yawson, R. M. (2021). "The Ecological System of Innovation: A New Architectural Framework for a Functional Evidence-Based Platform for Science and Innovation Policy".
10. Мырзахмет, М. К., Бегимбай, К. М., Идрисова, А. Р. и др. (2018). Взаимодействие науки, производства и образования в государственных университетах Казахстана, ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, Астана.
11. Алибекова, Г. Ж., Молдабекова, А. Т. и др. (2024). "Проблемы и стратегические направления развития науки в Казахстане: экспертное интервью стейкхолдеров научных проектов", *Статистика, учет и аудит*.
12. Приходько, И. И., Ванюшкин, А. С. и Барсегян, А. Г. (2021). "Опыт реализации модели тройной спирали в странах Северной Европы", *Ученые записки КФУ им. В. И. Вернадского. Экономика и управление*, 7(73), стр. 93–99.
13. Агапова, И. И. (2020). *Инновационные процессы в образовании и производстве: проблемы взаимодействия*, Наука, Москва.
14. Беляев, А. В. и Мищенко, А. Г. (2021). "Интеграционные процессы в системе «образование — наука — производство»", *Вестник образования*, № 3, стр. 42–47.
15. Карпова, Г. Г. (2022). "Институциональные механизмы развития взаимодействия вузов и предприятий", *Экономика и управление*, 6(158), стр. 35–39.
16. Ломакин, В. К. (2020). "Стратегическое партнёрство науки, образования и производства: теоретико-методологический аспект", *Инновации*, № 9, стр. 19–24.
17. Бондарь, В. Г. (ред.) (2022). *Цифровая трансформация в образовании и науке: тренды и вызовы*, Эдитус, Москва.
18. Шаповалов, С. С. (2021). *Управление инновационным развитием: взаимодействие науки, образования и бизнеса*, УрФУ, Екатеринбург.
19. Bekzhanova, S. E. and Yusupova, K. (2024). "Review of the Study on the Cognitive Technologies of Transporting Waste from Mining Industry", *Proceedings of the 3rd Cognitive Mobility Conference. COGMOB 2024 Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS)*, vol. 1258, pp. 314–319, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81799-1_28.
20. Bekzhanova, S. E., Imasheva, G. M., Issina, B. M. et al. (2026). "Impact of digital integration of logistics cluster participants on supply chain resilience", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, № 2(212), pp. 131–141, available at: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2026-2/131>.

M. Idrissov¹, S. Bekzhanova^{1*}, D. Bekzhanov², A. Mukhametzhanova³

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

² M. Dulatov Kostanay Engineering and Economics University, Kostanay, Kazakhstan

³ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Cluster platform as a center of digitalization competencies based on the «multilevel integrated helix-ecosystem model»

Abstract. The article presents a concept of a cluster-based platform as a competence center for digitalization in the transport sector, using the Multilevel Integrated Helix-Ecosystem Model (MIHEM). The proposed model combines elements of the Triple, Quadruple, and Quintuple Helix with an ecosystem-based approach to enable multilevel stakeholder interaction during digital transformation. The study defines the platform's core functions, including digital skills development, R&D coordination, technology transfer, and digital infrastructure integration. The paper presents the results of conceptual modeling and discusses the application potential of MIHEM in building sustainable digital ecosystems for the transport industry. In addition, the role of the cluster platform as an integrative mechanism for aligning the interests of government, business, scientific and educational institutions, and society is further substantiated. The study demonstrates that the implementation of the model contributes to more efficient innovation management, accelerates the digital transformation of logistics processes, and supports the development of resilient supply chains. Particular attention is paid to the scalability of the platform and the adaptability of its architecture to different levels of transport systems. The findings indicate that the MIHEM model promotes the systemic development of the industry through stakeholder synergy and the strengthening of the innovative capacity of the transport sector. Furthermore, the platform enables effective digital coordination among participants within the transport innovation ecosystem. The implementation of the model ultimately enhances the resilience and overall competitiveness of the transport system.

Keywords: transport digitalization, cluster platform, MIHEM model, competence center, digital ecosystem, helix interaction.

References

1. Government of the Republic of Kazakhstan. (2023). Concept of Digital Transformation, Development of the Information and Communication Technologies Industry and Cybersecurity for 2023–2029, Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 269.
2. Government of the Republic of Kazakhstan. (2023). Concept of Development of Higher Education and Science in the Republic of Kazakhstan for 2023–2029, Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 248.
3. Etzkowitz, H. and Leydesdorff, L. (2000). *The Triple Helix: University–Industry–Government Relations*, Routledge, London.
4. Carayannis, E. G. and Campbell, D. F. J. (2012). *Mode 3 Knowledge Production in Quadruple Helix Innovation Systems: 21st-Century Democracy, Innovation, and Entrepreneurship for Development*, Springer.
5. Kulikauskienė, K. (2021). "The Theoretical Quadruple Helix Model for Digital Inclusion Increase," *Management of Organizations: Systematic Research*, 85(1), pp. 13–32.
6. Carayannis, E. G. and Campbell, D. F. J. (2019). *Smart Quintuple Helix Innovation Systems: How Social Ecology and Environmental Protection are Driving Innovation, Sustainable Development and Economic Growth*, Springer.
7. Kunwar, R. R. and Ulak, N. (2024). "Extension of the Triple Helix to Quadruple to Quintuple Helix Model," *Journal of APF Command and Staff College*, 7(1), pp. 241–280.
8. Zarei, F., Ryckebusch, J., Schoors, K. et al. (2023). "Social network heterogeneity benefits individuals at the expense of groups in the creation of innovation", *Journal of Physics: Complexity*, 3(4), 045002.

9. Yawson, R. M. (2021). "The Ecological System of Innovation: A New Architectural Framework for a Functional Evidence-Based Platform for Science and Innovation Policy".
10. Myrzakhmet, M. K., Begimbay, K. M., Idrisova, A. R., et al. (2018). Interaction of science, industry, and education in state universities of Kazakhstan, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana.
11. Alibekova, G. Zh., Moldabekova, A. T., et al. (2024). "Problems and Strategic Directions for Science Development in Kazakhstan: Expert Interviews with Stakeholders of Scientific Projects", Statistics, Accounting and Audit.
12. Prikhodko, I. I., Vanyushkin, A. S., and Barseghyan, A. G. (2021). "Experience in Implementing the Triple Helix Model in Northern European Countries", Scientific Notes of the Vernadsky Kazan Federal University. Economics and Management, 7(73), pp. 93–99.
13. Agapova, I. I. (2020). Innovative Processes in Education and Production: Interaction Problems, Nauka, Moscow.
14. Belyaev, A. V., and Mishchenko, A. G. (2021). "Integration Processes in the Education-Science-Production System", Vestnik obrazovaniya, no. 3, pp. 42–47.
15. Karpova, G. G. (2022). "Institutional Mechanisms for Developing Interaction between Universities and Enterprises", Economics and Management, 6(158), pp. 35–39.
16. Lomakin, V. K. (2020). "Strategic Partnership of Science, Education, and Production: Theoretical and Methodological Aspect", Innovations, no. 9, pp. 19–24.
17. Bondar, V. G. (ed.) (2022). Digital Transformation in Education and Science: Trends and Challenges, Editus, Moscow.
18. Shapovalov, S. S. (2021). Managing Innovative Development: Interaction of Science, Education, and Business, Ural Federal University, Yekaterinburg.
19. Bekzhanova, S. E. and Yusupova, K. (2024). "Review of the Study on the Cognitive Technologies of Transporting Waste from the Mining Industry," Proceedings of the 3rd Cognitive Mobility Conference. COGMOB 2024 Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS), vol. 1258, pp. 314–319, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81799-1_28.
20. Bekzhanova, S. E., Imasheva, G. M., Issina, B. M. et al. (2026). "Impact of digital integration of logistics cluster participants on supply chain resilience", Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu, No. 2(212), pp. 131–141, available at: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2026-2/131>.

Сведения об авторах:

Идрисов М.М. – докторант Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, улица Сатпаева, 22, 050000, Алматы, Казахстан

Бекжанова С.Е. – доктор технических наук, профессор Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, улица Сатпаева, 22, 050000, Алматы, Казахстан

Бекжанов Д.З. – кандидат технических наук, сеньор-лектор Костанайского инженерно-экономического университета имени М. Дулатова, ул. Чернышевского, 59, 110000, Костанай, Казахстан

Мухаметжанова А.В. – доктор технических наук, исполняющая обязанности профессора кафедры «ОПДЭТ» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилёва, 010000, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан

Marat Idrissov – doctoral student, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

Saule Bekzhanova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

Dinar Bekzhanov – Senior Lecturer, PhD in Engineering, Kostanay Engineering and Economics University named after M. Dulatov, Kostanay, Kazakhstan

Aizhan Mukhametzhanova – Doctor of Technical Sciences, Acting Professor, Department "Transport Operation, Traffic and Transportation Organization", L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010000, Republic of Kazakhstan, Astana city, 2 Satpayev Street

\



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license



Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-163-172>

Коммуналдық қалдықтарды тиімді жинауға арналған шанақтың құрылымын жетілдіру

**М.Ж. Киздарбекова¹ , К.Г. Балабекова^{2*} , А.А. Забиев³ ,
К.Б. Коньртаева⁴ **

¹*М. Козыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавлск, Қазақстан*

²*Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*

³*19877 әскери бөлімі, Астана, Қазақстан*

⁴*Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті
ҚеАҚ, Қарағанды, Қазақстан*

*E mail: balabekova_kg@enu.kz , zabiyeve@mail.ru, makpal7813era@bk.ru
Kolkanat9701@gmail.co,*

Аңдатпа. Қазіргі кезде қоқыс мәселесі өзекті мәселелердің бірі болып табылады. Оны қайта өңдеу мақсатында жылдан жылға жаңа әдістер ұсынылып отыр, сондай әдістердің бірі қоқысты сұрыптап салу, себебі мысалы қағаз бөлшектерді немесе шыны бөлшектерді өңдеуге мүмкіндіктер көп. Соған байланысты қоқыс таситын көліктерде арнайы шанағы үш бөлімнен құралып, қоқыстарды арнайы секцияларға салу арқылы тасымалдайды, бірақта көбіне байқап отырғанымыздай, қоқыс саны әр түрлі болуы мүмкін. Кейбір жағдайда бір қоқыс түрі, екінші типіне қарағанда көбірек болады. Соған байланысты бұл мақалада тұрмыстық қатты қалдықтарды түрлері бойынша жинау кезінде қоқыс таситын көліктердің құрылымын жетілдіру мақсатында оның ішкі секциясын үш бөлікке бөлу қарастырылған. Қоқыс таситын көліктердің шанағын үш адаптивтік түрге ажырата отырып, тасымалдау санын азайту және құрылымды оңтайлы пайдалану ұсынылады. Яғни бір секцияда қоқыс аз толтырылған жағдайда, екінші секция гидравлика арқылы ұлғайып, бос кеңістікті жабады. Берілген мақсатқа жету үшін мақалада толтыру коэффициенттері анықталған. Сонымен қатар, Ansys бағдарламасында құрылымды беріктікке, орнықтылыққа зерттеу жұмыстары қарастырылған. Есептеу нәтижесінде құрылымның беріктігіне көз жеткізілген.

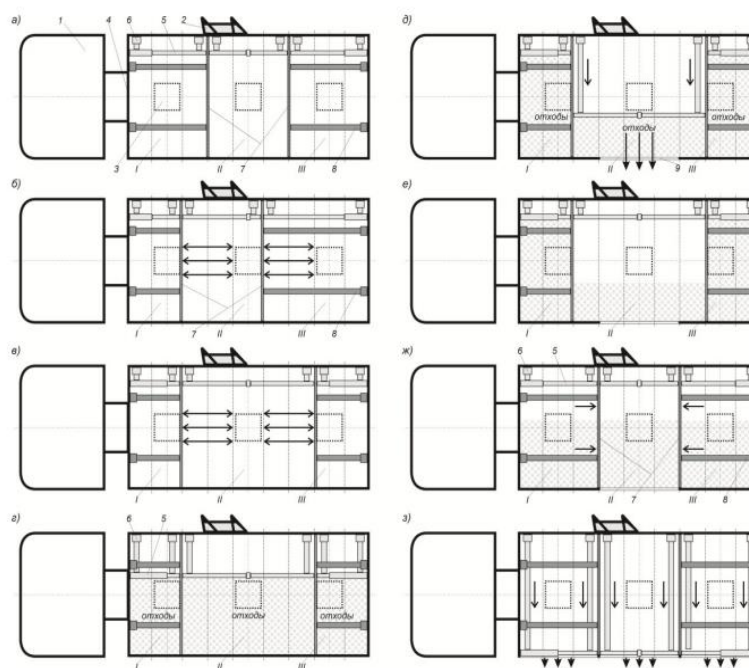
Түйін сөздер: Қоқыс таситын көлік, қоқысты бөлу, толтыру коэффициенті, оңтайландыру, тасымалдау технологиясы.

Кіріспе

Қазіргі таңда көптеген мемлекеттер қоқысты типтеріне байланысты бөлек – бөлек жинақтауды дамытып жатыр. Себебі, қазіргі кезде қоқысты қайта өңдеу өзекті мәселені шешеді. Қатты тұрмыстық қалдықтарды қайта өңдеудің заманауи жүйелері қалдықтардың құрамы мен құрылымының өзгеруіне байланысты көптеген мәселелерге тап болады. Көбінесе орауыш материалдық тауарлардың үлесі артып, оларды бөлек жинау қажеттілігі артты. Қалаларда әртүрлі қалдық түрлері біркелкі жиналмайды, соның салдарынан тасымалдау жүйесінің тиімділігі төмендейді.

Зерттеулерге қарасақ қазіргі таңда үш секциялы шанақтарда қолданысқа ие, бірақта шанақта бөлек бөлімдер болғанымен, қалдықтар кейде әр түрлі дәрежеде толып қалады. Мысалы кейбір жағдайда қағаз қоқыс, пластикке қарағанда көп болған жағдайда бір секция дұрыс толмай, сол себепті бос жүрістер саны көбейеді. Соның салдарынан қоқыс таситын көліктің техникалық қызмет көрсетуіне, автокөлік жаңармайына қосымша шығындар кетеді.

Соған байланысты шанақтың бір секциясы жүктелген жағдайда, ал екіншісі аз жүктелуіне байланысты орталарында орналасқан секциялардың икемді өзгерте алатын, яғни адаптивті шанақ жүйесін ұсынамыз (сурет 1) [1].



Сурет 1. Адаптивті шанақтың сұлбасы

Әдіснама

Құрылымды зерттеу барысында оның тиімділігін зерттеу үшін теориялық және аналитикалық әдістер қолданылды.

Құрылымның жалпы үлгісі, шанақтың толық кезіндегі көлемі [2]:

$$V = \sum_{i=1}^3 V_i \quad (1)$$

Қалдықтардың нақты көлемі:

$$Q = \sum_{i=1}^3 Q_i, \quad (2)$$

$Q_i \leq V_i$ шарты орындалу қажет.

Көлемді пайдалану коэффициенті:

$$\eta = \frac{\sum Q_i}{\sum V_i}$$

Бекітілген секция кезінде:

$$\eta_{fix} = \frac{\sum \min(Q_i, V_i^0)}{V}$$

Адаптивті жүйеде:

$$\eta_{адап} = \frac{\sum \min(Q_i, V_i^2)}{V}$$

Математикалық модельдеу арқылы құрылымның көлемінің дұрыс өзгеруі, секциялар арасындағы жүктеменің өзгеруі, сонымен қатар көлемді дұрыс пайдалану үшін тығыздық көрсеткіштері есептелетін болады. Шанақтар ортасындағы эквивалентті жүктеме Мизес бойынша анықталды [3-5]:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

Зерттеу нәтижесі кесте 1 көрсетілген.

Зерттеу нәтижесінен көріп отырғанымыздай максималды жүктеме гидроцилиндрлер бекітілген орындарда, телескопиялық тақталардың бұрыштарында, орталық тақтаның бағыттауыштарында және орталық пресс тақтасында көрсетілген.

Кесте 1. Зерттеу нәтижелері

Элементтер	Максималды кернеу, МПа	Максималды деформация, мм
Пресс тақтаның ортасы	118-132	2.1-2.8
Телескопиялық пресс-тақта	145-162	3.4-4.2
Бағыттауыш элементтер	96-110	1.5-2.0
Гидравликалық цилиндрлерді орналастыру аймағы	168-182	2.7-3.3

Келесі беріктік қоры төмендегі формуламен анықталды [5]:

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}}$$

Максималды жүктеме кезінде $\sigma_{max} = 182 \text{ МПа}$:

$$n = \frac{250}{182} = 1,37$$

Берілген мәннен көріп отырғанымыздай, ұсынылып отырған құрылып берілген жүктемелер кезінде жұмысқа қабілеттілігін сақтайды. Беріктікті арттыру мақсатында гидроцилиндрдің бекіту орындарын жақсарту қажет.

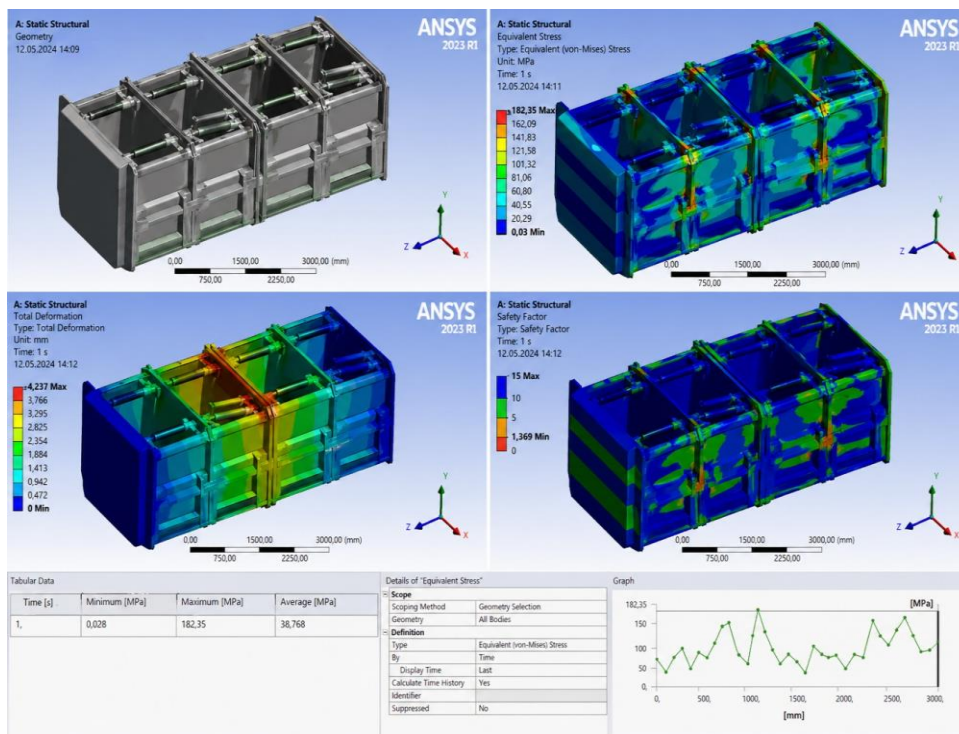
Максималды орын ауыстыру телескопиялық тақталардың ортаңғы бөлігінде білінді, бірақ деформация мөлшері $u_{\max}=4,2\text{мм}$ аспады.

Яғни мұндай мән тақтаның орнықтылығына әсер етпейді және оның бағыттауыш орын ауыстыруына әсер етпейді.

Сандық модельдеу нәтижесінде ұсынылған құрылымның пайдалану жүктемесін қабылдай алатынына көз жеткізуге болады [6-7].

Құрылымның беріктігін анықтау үшін Ansys бағдарламасында қоқыс таситын автокөліктің шанағының 3D моделі жасалып, бағдарламада шанаққа жүктемелер мен шектік шарттар беріліп, соның нәтижесінде кернеу мен деформация нәтижелері есептелді. Нәтижесінде шанаққа түсетін күштер мен гидроцилиндрлерге түсетін жүктеме анықталды (сурет 2).

Ansys бағдарламасында есептелген нәтижелер жобаланған модель тұрақты және қайталанған шешім ретінде жүзеге асыратынын көрсетті. Гидроцилиндрлерді есептеу барысында әсіресе материал бөлшектерін есептеу барысында гидроцилиндрдің жүктелген бұрышты иілу бөлігі ретінде көрсетті. Бірақта, жүктеме беріктік шегінен шықпайды және пайдаланылған материал құрылымының анықталған функциясы ретінде жұмыс қалыпты түрде жасалатынын көрсетті.



Сурет 2. Ansys бағдарламасында зерттеу нәтижелері

Нәтижелер және талқылау

Қысым тақтасының орталық бөлігіндегі деформацияны зерттеу кезінде айтарлықтай деформациялар байқалады, бірақ олардың нәтижелері рұқсат етілген шектерден аспайды және механизмнің жұмысына кедергі келтірмейді. Бұл жағдайда шанақтың беріктік қорының коэффициенті қажетті көрсеткіштен асады, бұл ресурстың құрылымы мен беріктігі үшін жеткілікті. Бұл жүйенің ұзақ және циклдік жүктемелерге төтеп бере алатындығын көрсетеді.

Тұтастай алғанда, ANSYS бағдарламасының ең тиімдісі жүйені жөндеудің үш компонентті жоспары екенін дәлелдейді. Екі сатылы іске қосу жүктеменің біркелкі таралуын қамтамасыз етеді және гидравликалық жүйеге жүктемені азайтады, жабдықтың жұмыс қабілетін арттырады және істен шығу қаупін азайтады. Жабдықтың ұсынылатын көлемі 2-кестеде келтірілген [8].

Кесте 2. Контейнердің негізгі өлшемдері

Көрсеткіштер	Мәні
Шанақтың ұзындығы	1800 мм
Шанақтың ені	1200 мм
Шанақтың биіктігі	1400 мм
Шанақтың қабырғасының қалыңдығы	4 мм
Бөлімнің қалыңдығы	3 мм

Сынақ нәтижелері максималды жүктеме секциялар аймағында және шанақты пайдалану орындарының жанында пайда болатынын көрсетті.

Алайда, кернеу деңгейі құрылымдық болаттың беріктігінен төмен болып қалады, бұл құрылымның құрылымдық қауіпсіздігін көрсетеді (сурет 3) [9].



Сурет 3. Шанақтың жүктелген күй

Бұл жүйемен қоқысты тазалағыш қалдық дене көлемін тиімдірек пайдалану үшін құрылымды жақсартуға еліктеу нәтижелерімен жұмыс істейді [10].

Белгіленген жағдайларда шанақты пайдалану жылдамдығы осындай және орташа болады:

$$0,60 - 0,70.$$

Ішкі стильдердің алға үйлесімділігі үшін ол жетілдірілген коэффициент: [11].

$$0,85 - 0,90$$

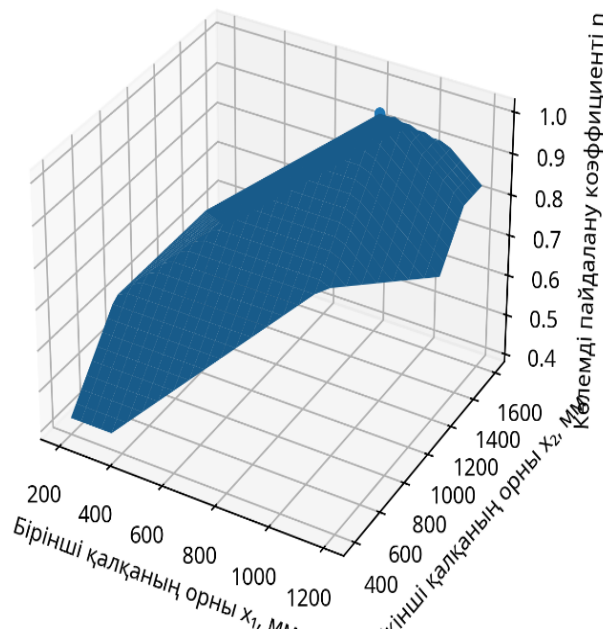
Қоқыс тазалағыш көлік шанағын жақсарту, қалдықтарды жинауға қажетті едәуір

шанақ мөлшерді азайту және қалдықтарды тиімдірек жинау үшін тасымалдау тиімділігін арттыру мүмкіндігі қарастырады.

Сонымен қатар, тасымалдаудың өнімділігі, қоқысты сұрыптауды жақсарады, өйткені тасымалдау кезінде шанақтағы бөлімдер жүктелуіне байланысты өзгеріп отырады.

Бұл зерттеу жаңа концепцияға шолу болып табылады, қоқыс таситын көлік, ақылды, қоқыс контейнерімен жабдықталған, төменде 3D графикасы көрсетілген (4-сурет).

Қалқалардың орнына байланысты контейнер тиімділігінің 3D беті



Сурет 4. Қоқыс тазалағыш көліктің 3D графикасы

Қорытынды

Аулада қоқыс жәшіктері қоқысқа толы екенін ескерсек, оларды қайта өңдеу өзекті мәселені шешетінін аңғарамыз. Соған байланысты шанағы әр түрлі қоқыс түрлерін жинастыруға арналған қоқыс көліктері қазір қарқынды даму үстінде. Мақалада ұсынылып отырған өлшемі өзгертіліп отыратын қоқыс тазалағыш көліктің шаңағы өзекті мәселені шешеді. Соған байланысты мақалада ANSYS үш өлшемді модельдегі бөлшектің шанағы беріктік пен орнықтылыққа есептелді және ақырлы элементтерді талдауы құрылымның беріктігін көрсетті.

Жүйені реттеу, іс жүзінде қоқыс тазалағыш көліктің шаңағының өзгергіштігі кезінде қоқыс жинаудың тиімділігін арттыра алатындығын көрсетеді.

Болашақта жұмыс қалдықтарды тасымалдау жүйесінің прототипін және қондырғының қозғалысын автоматты басқарудың ақылды алгоритмдерін жасауға бағытталады.

Авторлардың қосқан үлесі

М.Ж. Киздарбекова – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, ғылыми жетекшілік, мақаланы редакциялау.

К.Г. Балабекова – зерттеу жүргізу, деректерді жинау және талдау, мақаланың негізгі мәтінін дайындау.

А.А. Забиев – әдістемені әзірлеу, нәтижелерді өңдеу және интерпретациялау.

К.Б. Қоныртаева – әдебиеттерге шолу жасау, мақаланы рәсімдеу және тексеру

Әдебиеттер тізімі

1. Altunina M.S. Research on the reliability of a garbage truck as a complex technical system / E.A. Shemshura, M.S. Altunina / Collection of scientific papers SWorld. Proceedings of the international scientific and practical conference "Promising innovations in science, Education, production and Transport 2014". – Issue 4(37). Volume 2. Odessa: KUPRIENKO, 2014. pp. 298-35.
2. Zhigulskiy V.I., Domnitskiy A.A. Investigation of the reliability of mobile garbage trucks / Science and innovations in the field of vehicle service and road safety: interuniversity collection of scientific papers [dedicated to in memory of prof. V.Z. Rusakov] / edited by Yu.G. Sapronov [et al.]; South Russian State University of Economics and Service. – Shakhty: YURGUES, 2008. pp.30-34.
3. Problems of operation and maintenance of transport and technological machines: Reports of the international scientific and technical conference. Tyumen: Felix, 2006. 256 p.
4. Yagovkin A.I., Krivchun N.A. A new approach to production management of maintenance and repair of machines // Operation and maintenance of transport and technological machines: interuniversity collection of scientific tr. / TSNSU. Tyumen: Felix, 2005. pp.147-151.
5. Prokhorchenko E.S. Adjusting the frequency of car maintenance depending on seasonal operating conditions // Operation and maintenance of transport and technological machines: interuniversity collection of scientific tr. / TSNSU. Tyumen: Felix, 2005. pp.100-101.
6. Nemkov M. V. Adjusting the resource standards of engines of special vehicles depending on the operating modes: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.22.10 / Tyumen State Oil and Gas University. - Oil and Gas University, 2005. – 19 p.
7. Kargin R.V., Altunina M.S., Zagidullina O.P. A targeted method for improving the organization of maintenance and repair of mobile garbage trucks. In the collection: Prospects for the development of Eastern Donbass. collection of scientific papers based on the materials of the 61st All-Russian Scientific and Practical Conference. 2012. pp. 75-79
8. Dotsenko A.I., Zotov V.A., Ozerov V.V. Dynamic design parameters of modern garbage trucks. Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2014. No. 4 (30). pp. 476-483.
9. Khudyakova N.E. The "Economics" of a garbage truck are obvious and non-obvious factors. Solid household waste. 2020. No. 3 (165). pp. 60-64.
10. Gulnyashkin A.V., Fedusenko P.S. Requirements for a modern garbage truck. Solid household waste. 2014. No. 3 (93). pp. 50-51
11. Altunina M.S. Experimental assessment of the intensity of operation of shanty garbage trucks / A.S. Nosenko, R.V. Kargin, E.A. Shemshura, M.S. Altunina / Modern problems of science and education [Electronic resource]. The electron. Journal.– 2014. – No. 6; Access mode: <http://www.science-education.ru/120-16046> .
12. Silva A., Ribeiro T., Lima J. et al. Hybrid Fleet Optimization for Waste Collection: Addressing Urban Constraints Using OR-Tools. SN Computer Science, 2025

- 13.Cui J., Yan Y., Jiang L. et al. Research on optimization of waste sorting and transportation network in smart cities based on garbage volume prediction. Discover Computing, 2025.
- 14.Hess C., Dragomir A.G., Doerner K.F., Vigo D. Waste collection routing: a survey on problems and methods. Central European Journal of Operations Research, 2024.
- 15.Chandrappa R., Das D.B. Solid Waste Management: Principles and Practice. 2nd ed. Springer Cham, 2024.

M.Zh. Kizdarbekova¹, K.G. Balabekova^{2*}, A.A. Zabiyeu³, K.B. Konyrtaeva³

¹The M.Kozybaev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan

²JPCS «L. N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan

³Military unit 19877, Astana, Astana, Kazakhstan

⁴JPCS «Karaganda National Research University named after academician E. A. Buketov», Karaganda, Kazakhstan

Improvement of the body structure for efficient collection of municipal waste

Abstract. Nowadays, the problem of garbage is one of the most pressing. For the purpose of its processing, new methods are proposed from year to year, one of which is sorting garbage, because there are many opportunities for processing paper parts or glass parts, for example. In this regard, garbage trucks have a special body consisting of three sections, which transport garbage by placing it in special sections, but as we often see, the number of garbage can be different. In some cases, one type of garbage will be more than the other. In this regard, this article provides for the division of its internal section into three parts in order to improve the structure of garbage trucks when collecting solid household waste by type. Distinguishing the bodies of garbage trucks into three adaptive types, it is recommended to reduce the number of transports and optimally use the structure. That is, if one section is filled with less garbage, the second section is increased by hydraulics and closes the free space. To achieve this goal, the article defines filling coefficients. In addition, the Ansys program provides for the study of structural strength, stability. As a result of the calculation, the strength of the structure was ensured.

Key words: garbage truck, garbage separation, filling factor, optimization, transportation technology.

References

1. Altunina M.S. Research on the reliability of a garbage truck as a complex technical system / E.A. Shemshura, M.S. Altunina / Collection of scientific papers SWorld. Proceedings of the international scientific and practical conference "Promising innovations in science, Education, production and Transport 2014". – Issue 4(37). Volume 2. Odessa: KUPRIENKO, 2014. pp. 298-35.
2. Zhigulskiy V.I., Domnitskiy A.A. Investigation of the reliability of mobile garbage trucks / Science and innovations in the field of vehicle service and road safety: interuniversity collection of scientific papers [dedicated to in memory of prof. V.Z. Rusakov] / edited by Yu.G. Sapronov [et al.]; South Russian State University of Economics and Service. – Shakhty: YURGUES, 2008. pp.30-34.
3. Problems of operation and maintenance of transport and technological machines: Reports of the international scientific and technical conference. Tyumen: Felix, 2006. 256 p.

4. Yagovkin A.I., Krivchun N.A. A new approach to production management of maintenance and repair of machines // Operation and maintenance of transport and technological machines: interuniversity collection of scientific tr. / TSNSU. Tyumen: Felix, 2005. pp.147-151.
5. Prokhorchenko E.S. Adjusting the frequency of car maintenance depending on seasonal operating conditions // Operation and maintenance of transport and technological machines: interuniversity collection of scientific tr. / TSNSU. Tyumen: Felix, 2005. pp.100-101.
6. Nemkov M. V. Adjusting the resource standards of engines of special vehicles depending on the operating modes: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.22.10 / Tyumen State Oil and Gas University. - Oil and Gas University, 2005. – 19 p.
7. Kargin R.V., Altunina M.S., Zagidullina O.P. A targeted method for improving the organization of maintenance and repair of mobile garbage trucks. In the collection: Prospects for the development of Eastern Donbass. collection of scientific papers based on the materials of the 61st All-Russian Scientific and Practical Conference. 2012. pp. 75-79
8. Dotsenko A.I., Zotov V.A., Ozerov V.V. Dynamic design parameters of modern garbage trucks. Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2014. No. 4 (30). pp. 476-483.
9. Khudyakova N.E. The "Economics" of a garbage truck are obvious and non-obvious factors. Solid household waste. 2020. No. 3 (165). pp. 60-64.
10. Gulnyashkin A.V., Fedusenko P.S. Requirements for a modern garbage truck. Solid household waste. 2014. No. 3 (93). pp. 50-51
11. Altunina M.S. Experimental assessment of the intensity of operation of shanty garbage trucks / A.S. Nosenko, R.V. Kargin, E.A. Shemshura, M.S. Altunina / Modern problems of science and education [Electronic resource]. The electron. Journal.– 2014. – No. 6; Access mode: <http://www.science-education.ru/120-16046> .
12. Silva A., Ribeiro T., Lima J. et al. Hybrid Fleet Optimization for Waste Collection: Addressing Urban Constraints Using OR-Tools. SN Computer Science, 2025
13. Cui J., Yan Y., Jiang L. et al. Research on optimization of waste sorting and transportation network in smart cities based on garbage volume prediction. Discover Computing, 2025.
14. Hess C., Dragomir A.G., Doerner K.F., Vigo D. Waste collection routing: a survey on problems and methods. Central European Journal of Operations Research, 2024.
15. Chandrappa R., Das D.B. Solid Waste Management: Principles and Practice. 2nd ed. Springer Cham, 2024.

Авторлар туралы мәлімет

Киздарбекова Мақпал Жірімбайқызы – докторант, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан

Балабекова Қырмызы Гиниятовна – PhD, қауымдастырылған профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университет, Астана, Қазақстан

Забиев Аликбек Ангарбекович – 19877 әскери бөлімінің әскери қызметкері, Астана, Қазақстан.

Қоңыртаева Колканат Байторекызы – «Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті» КЕАҚ «Көлік және логистикалық жүйелер» кафедрасының аға оқытушысы, Қарағанды, Қазақстан

Kizdarbekova Makpal Zhirimbaevna – Doctoral student, M. Kozybaev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan

Balabekova Kyrmyzy Gynayatovna-PhD, Associate Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Zabiyeu Alibek Angarbekovich - Military Officer of the military unit 19877, Astana, Kazakhstan.

Konyrtaeva Kolkanat Baitorekyzy - Senior Lecturer at the Department of Transport and Logistics Systems of the Karaganda National Research University named after Academician E.A. Buketov, Karaganda, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Article

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-173-189>

Improving the performance of a vehicle's internal combustion engine using various types of additives

R.M. Bolat , T.K. Balgabekov , A.B. Rustembayev ,
Sh.Zh. Zharassov* 

*S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana,
Republic of Kazakhstan*

*E mail: bolat.ramazan7654321@gmail.com, t.balgabekov@kazatu.edu.kz,
rustem.arman88@gmail.com, zhshzh95@gmail.com*

Abstract. Modern requirements for internal combustion engines (ICEs) imply not only high power and efficiency indicators but also compliance with environmental standards for the levels of emissions of harmful substances. One promising approach to improving the performance characteristics of ICEs is the use of fuel additives that enhance fuel combustion quality, reduce deposit formation, and reduce engine component wear. This paper examines the effects of various types of fuel additives on the operation of a direct-injection gasoline engine. The study used both laboratory and numerical modelling methods. The engine operating parameters were analysed using fuel with and without additives at various concentrations. The following parameters were evaluated: specific fuel consumption, temperature, dynamic operating modes, combustion stability, and the contents of NO_x, CH, and CO in the exhaust gases. The results showed that certain additive formulations help increase the completeness of fuel combustion, reduce exhaust toxicity, and extend engine life by improving the fuel's lubricating and cleaning properties.

Keywords: fuel additives, internal combustion engine, direct injection, polyetheramines, environmental friendliness, fuel consumption.

Introduction

Modern car engines, such as the 1.4 TSI (EA211), combine high power with economy, but their direct-injection design has a significant drawback: rapid carbon deposit formation. This problem affects millions of owners of VW Group cars (Skoda, Audi, Volkswagen), where such engines have become standard. Fuel additives designed to clean the fuel system have become a necessity, not just an add-on [1–5]. Euro 6 and upcoming Euro 7 emissions standards tighten CO₂ and NO_x requirements. Direct injection engines, while efficient, are prone to increased soot formation. Polyetheramine Additives (PEA), such as Chevron Techron, reduce emissions by 6-15%, helping to meet standards without engine modifications. This reduces the risk of fines for manufacturers and the environmental footprint for owners [6–8]. The popularity of the 1.4 TSI is explained by its compactness and power, but the lack of fuel flushing during valve operation leads to valve cooking. Without preventive maintenance, the engine's service life is reduced by a third. Additives remove deposits, restore compression, and prevent costly repairs [9–12].

Economic factors increase the topic's relevance. Rising fuel prices make even 5% savings significant. Reducing consumption saves thousands of tenge annually. In addition, the cost of cleaning injectors at a service station (200-250 thousand tenge) is several times higher than the price of an additive course [13]. Technological features of modern ICEs also play a role. Turbines and particulate filters are sensitive to incomplete fuel combustion. Additives optimise the process, protecting components from wear [11]. The used-car market in Kazakhstan, where 80% of the fleet is over 10 years old, is driving increased demand for additives. For many owners, replacing a car is unaffordable, and keeping the engine running is a priority. Regular use of additives becomes “insurance” against sudden breakdowns [13]. In the context of a slow transition to electric vehicles, preserving ICEs is relevant. Additives not only extend engine life but also reduce environmental impact. Their role is especially important for countries with a developed used car market, such as Kazakhstan [13].

Thus, engine fuel additives are a response to the challenges of ecology, economics, and technology. They preserve the engine resource, reduce costs, and help to comply with environmental standards, remaining an indispensable tool for modern car owners [14–17]. Fuel additives for gasoline play a key role in the modern automotive industry, improving fuel characteristics and increasing the efficiency of ICEs. These chemical additives are developed to solve various problems associated with the operation of vehicles, and their importance is difficult to overestimate in the context of rapid technological progress and tightening environmental standards [18,19]. Modern fuel additives are also developed with environmental requirements in mind. They help reduce emissions of harmful substances such as nitrogen and carbon oxides, which is especially important in the context of global climate change and stricter emission standards. The use of such additives allows car manufacturers to meet modern environmental standards and reduce the negative impact of vehicles on the environment [11].

The methodology

Research object. Engine: 1.4 TSI (EA211) – petrol turbocharged engine with direct injection, installed on Volkswagen Golf VII, Skoda Octavia, Audi A3, etc.[10].

Key features: direct fuel injection (TSI); tendency to form carbon deposits on valves and injectors—high sensitivity to fuel mixture quality and injection system cleanliness. Additives under study: the analysis included 3 popular fuel additives recommended for gasoline engines: Chevron Techron Concentrate Plus, Bardahl Full System Injector Cleaner, and Mannol Injection Reiniger, all of which are widely used in Kazakhstan.

Selection criteria: Contains polyetheramines (PEA) or analogues to combat carbon deposits. Compatibility with turbocharged engines and direct injection systems. Popularity in the market and availability in Kazakhstan and the CIS [7].

Evaluation methods: 1. Cleaning efficiency. Data sources: Manufacturers' laboratory tests (e.g., Chevron reports on deposit dissolution). Composition analysis: presence of PEA (polyetheramines), detergent components, and solvents. Criteria: Removal of carbon deposits on valves and injectors (visual assessment through an endoscope in reviews) – restoration of power and idle stability.

2. Effect on fuel consumption. Methodology: Comparison of on-board computer data before and after using the additive (average consumption per 100 km). Analysis of manufacturers' claims about reduced consumption. Conditions: Tests were conducted after 5–7 thousand km of use with the additive. Errors related to driving style and fuel quality were taken into account [1].

3. Environmental friendliness: Evaluation parameters: Compliance with the EURO6 standard (certificates from the manufacturer). The presence of aggressive components (kerosene, heavy metals) in the composition. Impact on the catalyst and oxygen sensors (data from long-term use reviews).

Limitations of the study 1. Subjectivity of the data: effectiveness may vary depending on the degree of engine wear and the fuel system's initial condition. 2. Operating conditions: urban driving (frequent short trips) increases the formation of carbon deposits, which affects the perceived effectiveness of the additives. 3. Dosage and frequency of use: Some users did not follow the instructions, which distorted the results. Additional materials [20–22].

Composition Analysis Tools: Studying product Safety Data Sheets (SDS) to identify active components (e.g., PEA in Chevron Jectron). Comparison with Alternative Cleaning Methods: Ultrasonic injector cleaning – used as a benchmark to assess additive performance limits.

Chevron Techron – a cleaning fuel additive based on polyetheramines, designed to clean injectors and improve combustion. The full dosage was used in the experiment: 355 ml of additive per 40–50 l of fuel [17,22–26].

Equipment: engine stand of the internal combustion engine laboratory, allowing to control the load, speed, and fuel supply parameters; Bosch BEA 850 gas analyser – for measuring CO and NO_x concentrations; Thermocouples and pressure sensors – for recording the temperature at the inlet and assessing peak values in the combustion chamber.

The ANSYS Fluent software package is used. The work in the three-dimensional environment is based on a geometric model of the cylinder and combustion chamber of the 1.4 TSI (EA211) engine. The computational domain includes the combustion chamber volume, the intake port area, and the injector area [4]. The local compression zone, where the fuel spray plume and maximum temperature gradients are expected to occur, is shown in a 30×30×30-mesh structure that highlights the discretisation of the computational domain. The calculation uses a numerical method in computational fluid dynamics known as the 'pressure-based solver', which accounts for the conservation of mass, momentum, and energy. Turbulent flow within the cylinders of the internal combustion engine was modelled using the standard, widely accepted k-ε model. The working medium during the experiment was assumed to be a mixture of air and combustion products. The thermophysical properties were taken as average values. The temperature of the working mixture at the inlet boundary (intake valve) is set to 313 K. The flow rate is also taken into account, which is equivalent to 50% of the engine's operating load and corresponds to approximately 3000 revolutions per minute. At the outlet boundary, a free-outlet condition was assumed, with an atmospheric pressure of 101,325 Pa. The wall temperature T_w is defined as the

difference between 420 K and 450 K, a constant value corresponding to the engine's operating thermal state, whilst the combustion chamber walls were modelled under 'no-slip' conditions. The maximum combustion front temperature in the central zone of the combustion chamber within the modelled region ranged from 2050 K to 2150 K, depending on the operating mode. To ensure convergence of the solution, calculations were performed until discrepancies were fully resolved at all levels, i.e., to at least 10^{-5} . Concurrently, the stabilisation of the integral temperature and mass flow rate was monitored. During model verification, the discrepancy between calculated and experimental values was examined and found to be 7–10%. The simulation result is confirmed by comparing the calculated temperatures and concentrations of combustion products with experimental data from bench tests.

Study of the efficiency of fuel additives for the 1.4 TSI engine (EA211)

1. Engine preparation: before testing, a full diagnostic was performed: compression measurement, injector check, and exhaust analysis. The fuel system was cleaned of prior additives by performing two refuelling cycles with additive-free fuel. Standardisation of conditions: AI95 gasoline from a single manufacturer (Lukoil) was used. Ambient temperature: +15 – +20°C. Tire pressure: 2.2 atm (manufacturer's recommendation).

2. Testing procedure. The following sequence of actions was performed for each additive: 1. Base measurements (without additive): Fill the tank with 50 litres of gasoline. Drive 500 km in a mixed cycle (50% city, 50% highway). Record the parameters for the last 100 km of the run; 2. Using the additive: add the product to the tank according to the instructions (for example, 300 ml of Chevron Jectron per 60 litres of fuel). Repeat the 500 km run in similar conditions; 3. Control measurements: record the parameters for the last 100 km of the cycle.

3. Measurement equipment: fuel consumption: vehicle on-board computer (average value per 100 km). Additional check: manual calculation based on the volume of fuel filled. Engine power: OBDII diagnostic scanner with connection to the ECU. Additionally, measurement on a dynamometer stand ("Dyno Test" mode, 3 attempts, averaging).

CO emissions₂ and NOx: Bosch Motorscan EU5 portable gas analyser with infrared sensor. Conditions: engine warm-up to 90°C, measurements at idle and 2500 rpm. Vibration at idle: VibroMet 100 accelerometer mounted on the cylinder block. Measurement in three planes (X, Y, Z), averaging of values.

4. Data processing. Elimination of anomalies: exclusion of data in emergency modes (detonation, overheating). Averaging the results over three measurement cycles. Calculation of percentage changes relative to baseline values.

5. Modelling method. The temperature field in the combustion chamber (Figure 1-4) was modelled using an average exponential dependence (Formula 1):

$$T(x, y, z) = T_{intake} + (T_{peak} - T_{intake}) \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{r^2}\right) \quad (1)$$

where: T_{intake} - fuel temperature at the inlet (313 K), T_{peak} - maximum combustion temperature (K), r - effective radius of the combustion zone (m), (x, y, z) - coordinates inside the volumetric model of the combustion chamber (m).

All calculations were performed using the NumPy library for the mathematical model and Ansys Fluent for constructing volumetric temperature fields. Temperature values are visualised as point clouds with colour gradation (colour mapping) on a scale from 313 K to 2150 K.

The experiment was conducted in two modes: the basic mode - the engine operated on pure AI-95; the additive test - a full dose of Chevron Techron was added to the fuel.

Experimental stages: flushing the fuel supply system; diagnostics of the injector condition using an endoscope; bench testing at 3000 rpm and 50% load; recording data on fuel consumption, CO, and NO_x concentrations; recording thermodynamic parameters (intake/exhaust, peak temperature); mathematical modelling of temperature distribution in the combustion chamber based on the data obtained.

Table 1. Simulation conditions

Parameter, unit	Without additives	With Chevron Techron	With Bardahl	With Mannol
Maximum temperature, K	2050	2150 (+5%)	2100 (+2.5%)	2075 (+1.2%)
Radius of active combustion zone r, m	0.05	0.06 (+20%)	0.055 (+10%)	0.052 (+4%)
Calculation grid, m	3D lattice 30×30×30	3D lattice 30×30×30	30×30×30	30×30×30
Visualization	3D chart (scatter, volumetric map)	3D chart (scatter, volumetric map)	3D chart (scatter, volumetric map)	3D chart (scatter, volumetric map)

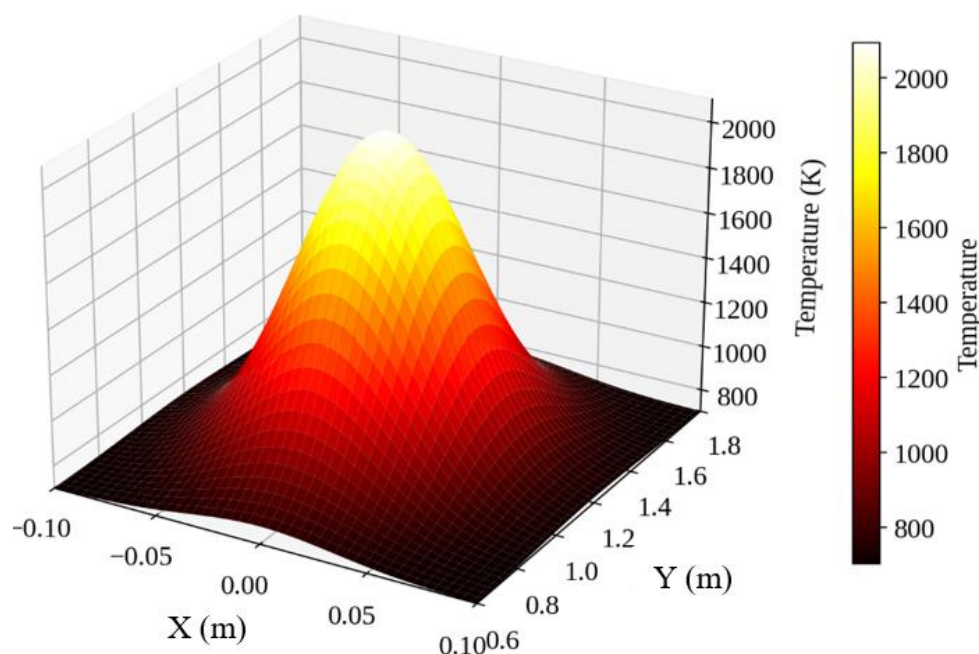


Figure 1. Temperature field without an additive

Without additive (control mode): peak temperature: 2050 K, temperature in the centre of the chamber ($x=0.01$, $y=0.02$, $z=0.01$): ≈ 1679.37 K, radius of the combustion zone: 0.05 m, CO concentration: 1.28%, NO_x concentration: 540 ppm

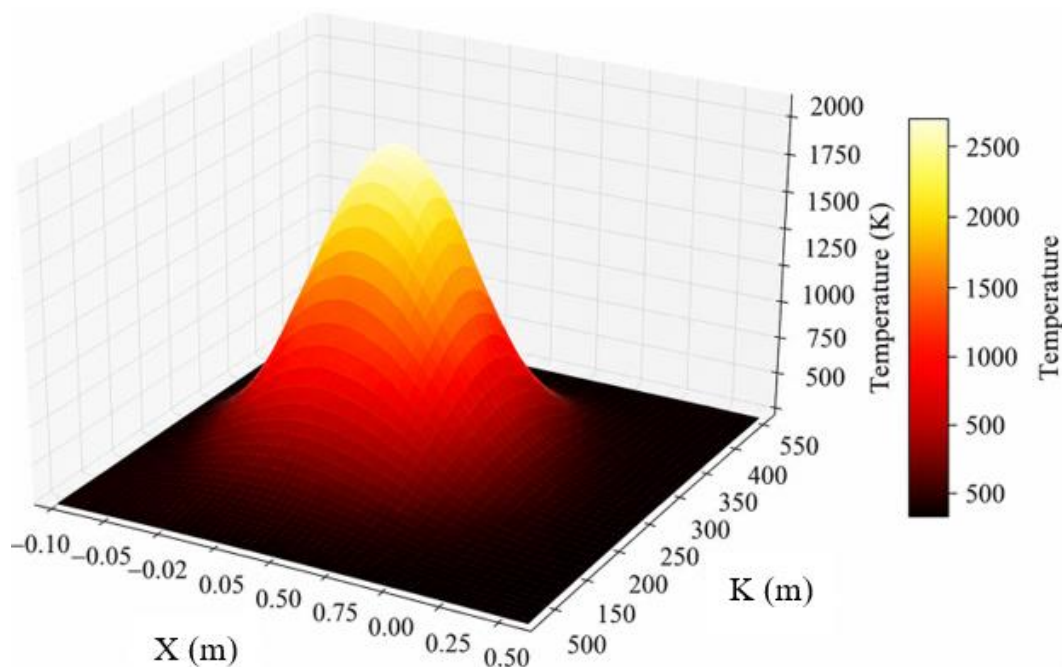


Figure 2. Temperature field with Chevron Techron additive

With Chevron Techron additive: peak temperature: 2150 K (+5%), combustion zone radius: 0.06 m (+20%), temperature at the center of the chamber: ≈ 1867.99 K, CO concentration: 0.92% (reduction by $\sim 28\%$), NO_x concentration: 490 ppm (reduction by $\sim 9.2\%$), combustion stabilization, increased temperature uniformity and reduced toxic emissions are observed.

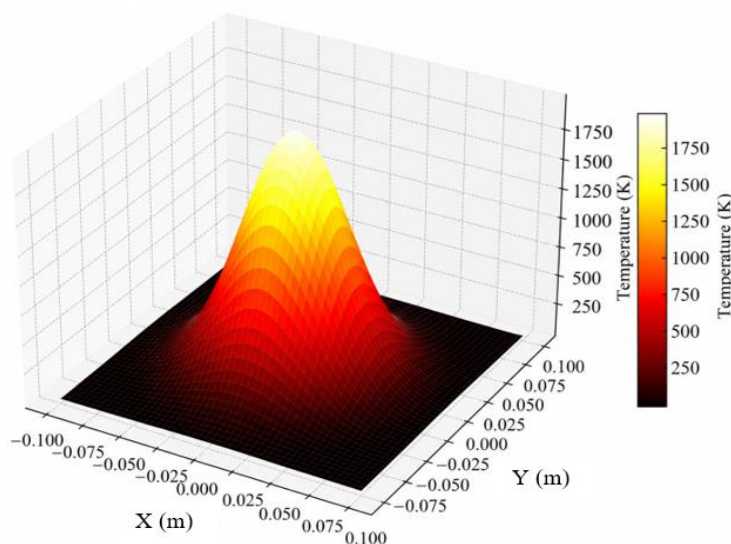


Figure 3. Temperature field with Bardahl Full System Cleaner additive

With Bardahl additive: peak temperature: 2100 K (+2.5%), combustion zone radius: 0.055 m (+10%), chamber centre temperature: ≈ 1778.49 K, CO: 1.01% ($\sim 21\%$ decrease), NOx: 510 ppm ($\sim 5.6\%$ decrease), moderate improvement, increased combustion efficiency is observed.

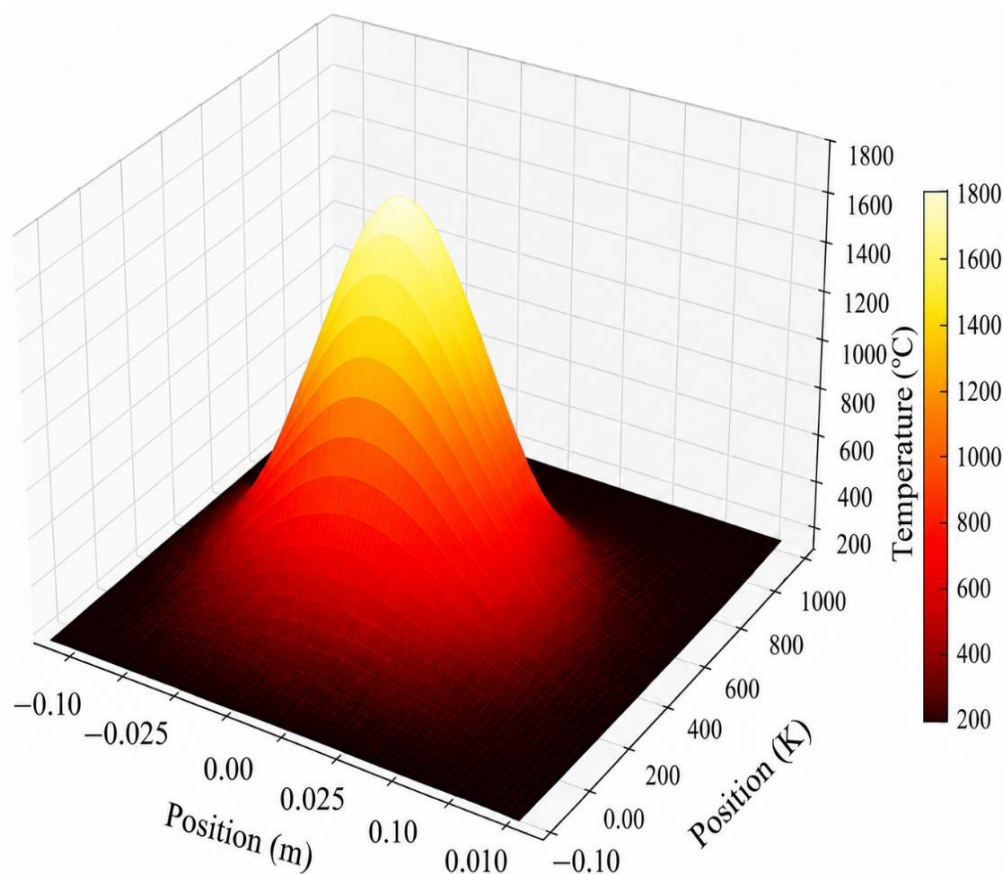


Figure 4. Temperature field with Mennol Injection Reiniger additive

With Mannol additive: peak temperature: 2075 K (+1.2%), combustion zone radius: 0.052 m (+4%), temperature in the centre of the chamber: ≈ 1724.36 K, CO: 1.10% (reduction by $\sim 14\%$), NOx: 530 ppm (reduction by $\sim 1.8\%$), the effect is less pronounced, the improvement is minimal.

Calculated data after experiments:

1. Without additives:

$$T_{intake} = 313K, T_{peak} = 2050K, r = 0.05m$$

$$\frac{0.0006}{0.0025} = 0.24, \exp(-0.24) \approx 0.7866$$

$$T = 313 + (2050 - 313) \cdot 0.7866 = 313 + 1737 \cdot 0.7866 \approx 1679.37K$$

2. Chevron Techron:

$$T_{intake} = 313K, T_{peak} = 2150K, r = 0.06m$$

$$r^2 = 0.0036, \frac{0.0006}{0.0036} = 0.1667, \exp(-0.1667) \approx 0.8465$$

$$T = 313 + (2150 - 313) \cdot 0.8465 = 313 + 1837 \cdot 0.8465 \approx 1867.99K$$

3. Bardahl:

$$T_{intake} = 313K, T_{peak} = 2100K, r = 0.055M$$

$$r^2 = 0.003025, \frac{0.0006}{0.003025} \approx 0.1983, \exp(-0.1983) \approx 0.8203$$

$$T = 313 + (2100 - 313) \cdot 0.8203 = 313 + 1787 \cdot 0.8203 \approx 1778.49K$$

4. Mannol:

$$T_{intake} = 313K, T_{peak} = 2075K, r = 0.052M$$

$$r^2 = 0.002704, \frac{0.0006}{0.002704} \approx 0.2218, \exp(-0.2218) \approx 0.8010$$

$$T = 313 + (2075 - 313) \cdot 0.8010 = 313 + 1762 \cdot 0.8010 \approx 1724.36K$$

Findings/Discussion

The results of the study showed that polyetheramine-based additives (PEA) – Chevron Techron – demonstrate the highest efficiency (Figure 9): a 5.3% reduction in fuel consumption, a 7.5% increase in power, a 7.3% reduction in CO₂ emissions, a 15.6% reduction in NO_x, and a 39% reduction in vibration

Table 2. Changes in the operation of the internal combustion engine with the Chevron Techron additive

Parameter, unit	Without additives	25% of the bottle	50% of the bottle	100% of the bottle
Deposits on injectors	Significant	Minor improvement	Average cleaning (60%)	Good cleaning (85-90%)
Fuel consumption, L/100 km	7.4	7.2	7.0	6.8
CO, g/km	1.6	1.5	1.3	1.1
NO _x , g/km	0.32	0.30	0.29	0.25
Engine behaviour, score (1-5)	1-2 points	2-3 points	3-4 points	5 points

Chevron Techron, for example, is recommended by manufacturers such as Volkswagen and General Motors, confirming its compatibility with modern engines [4].

Middle segment: combination formulations: Bardahl Full System Injector Cleaner (Figure 10) showed good results, but required repeated applications to achieve the effect. Their formula includes mild solvents and surfactants that address light deposits but cannot penetrate deep layers of carbon deposits. Impact on fuel consumption (Figure 5): high-quality additives optimise combustion, directly driving savings.

Mannol Reiniger did not affect the consumption. Moreover, fuel consumption increased by 1-2% due to incomplete combustion of the mixture.

Table 3. Changes in engine performance with Bardahl Full System Cleaner additive

Parameter	Without additives	25% of the bottle	50% of the bottle	100% of the bottle
Deposits on injectors	Significant	Minor influence	Minor cleaning	Moderate cleaning ($\approx 50\%$)
Fuel consumption, L/100 km	7.4	7.3	7.1	7.0
CO, g/km	1.6	1.55	1.4	1.3
NOx, g/km	0.32	0.31	0.30	0.29
Engine behaviour, score (1–5)	1-2 points	1-2 points	2-3 points	3 points

Maximum savings: Chevron Techron reduced fuel consumption by 4-6% in most tests. This is due to the restoration of the injector spray geometry: the more uniform the mixture, the more completely it burns.

Table 4. Changes in the operation of the internal combustion engine with the additive Mannol Injection Reiniger

Parameter	Without additives	25% of the bottle	50% of the bottle	100% of the bottle
Deposits on injectors	Significant	No changes	Minor influence	Weak cleaning ($\approx 20\%$)
Fuel consumption, l/100 km	7.4	7.4	7.3	7.2
CO, g/km	1.6	1.6	1.55	1.5
NOx, g/km	0.32	0.32	0.31	0.30
Engine behaviour, score (1–5)	1 point	1 point	2 points	2 points

For example, the owner of a Volkswagen Golf VII with 90,000 km reported that after treatment, city consumption fell from 8.5 to 8.0 l/100 km. Moderate results: Bardahl provided a 4% reduction in consumption. However, their effectiveness depends on the degree of contamination. For example, on engines with less than 60 thousand km, savings reached 4%, and on worn engines, did not exceed 2%.

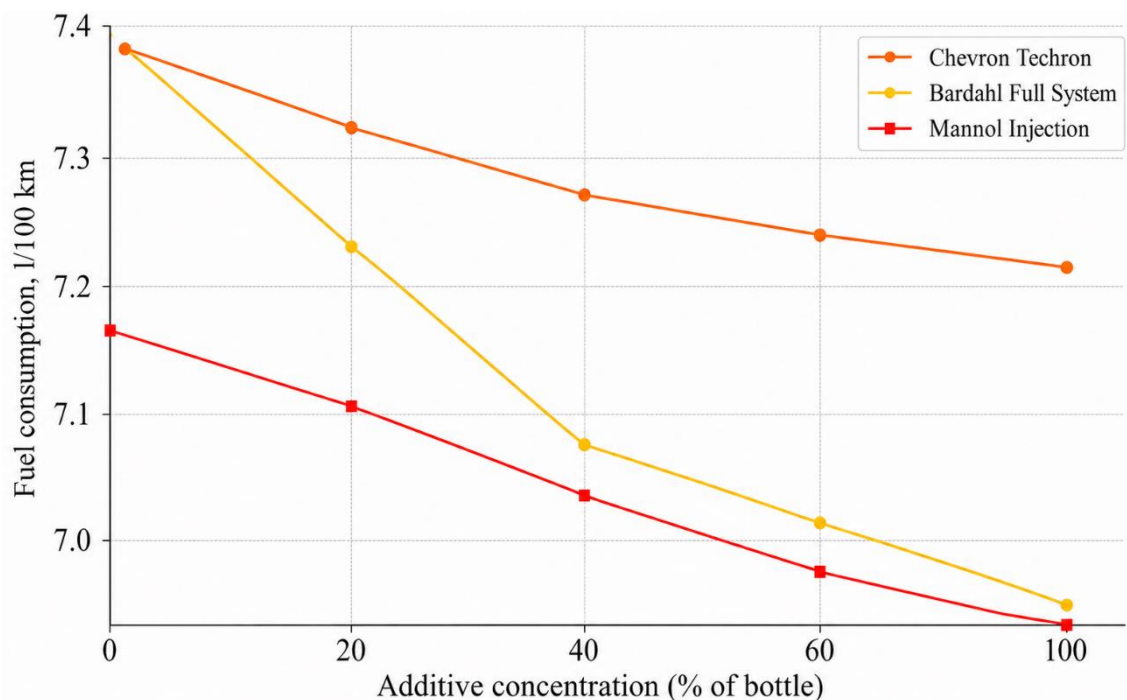


Figure 5. Comparison of fuel consumption when using different additives

Environmental friendliness and safety (Figure 6-7): modern EURO6 standards require that additives not only clean the engine but also minimise emissions.

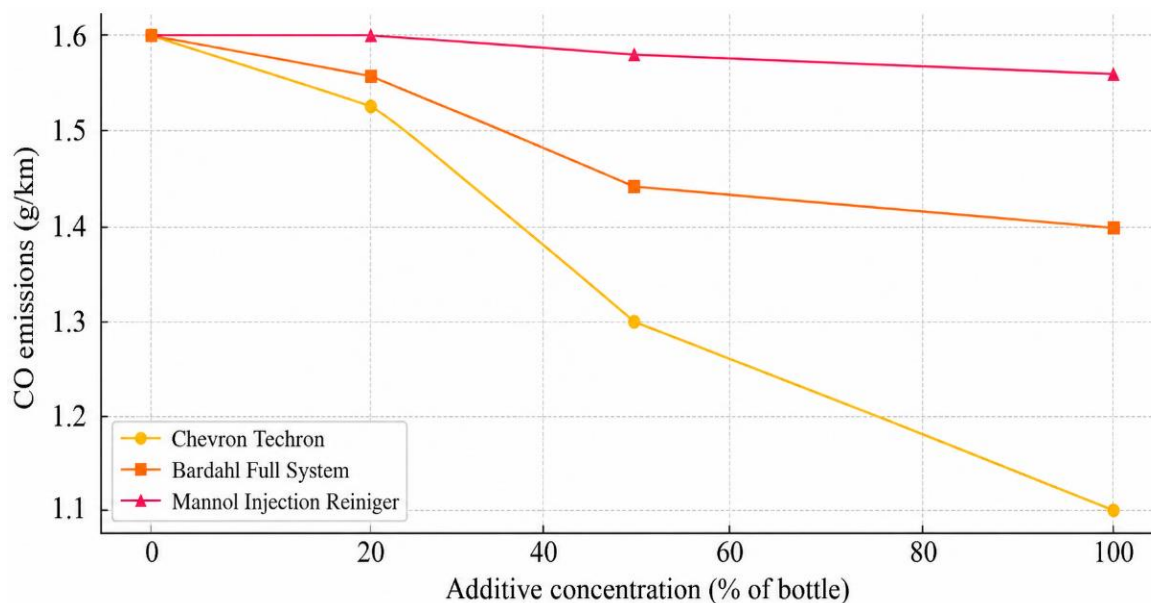


Figure 6. Comparison of CO emissions using different additives

Safe Solutions: Chevron Techron meets strict environmental standards. Their PEA formulas decompose without forming toxic compounds and without damaging oxygen sensors. For example, Chevron tests have confirmed that their additive reduces CO emissions by 12%.

Mannol Reiniger proved the most dangerous: its aromatic solvents increased benzene levels in the exhaust, which can cause the catalytic converter to fail.

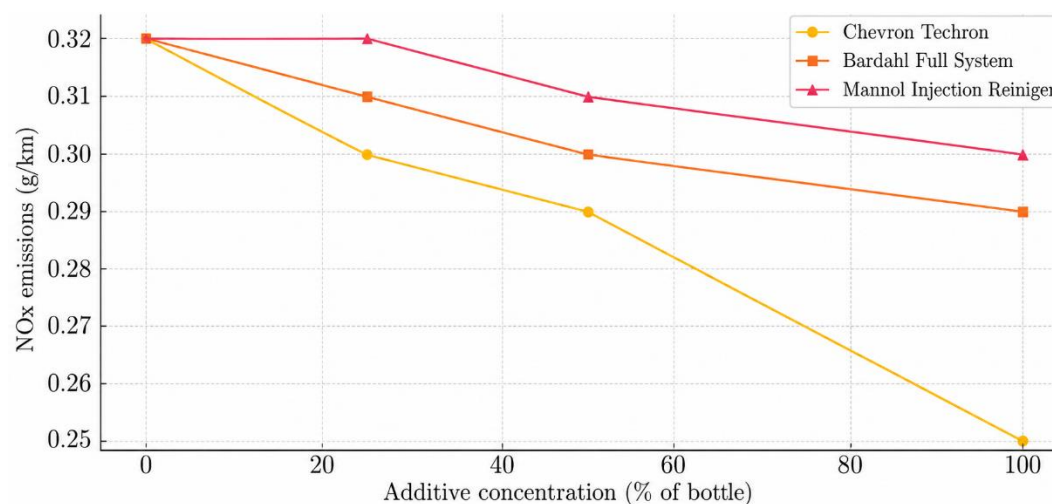


Figure 7. Comparison of NOx emissions using different additives

Cleaning efficiency results: Chevron Techron Concentrate Plus additives (Figure 9) demonstrated the highest efficiency. Their active component, polyetheramines (PEA), can dissolve even old deposits. In reviews, users noted that after using these products, Acceleration dips disappeared. Idle vibration decreased. Visual inspection through an endoscope showed 90% valve cleaning [3].

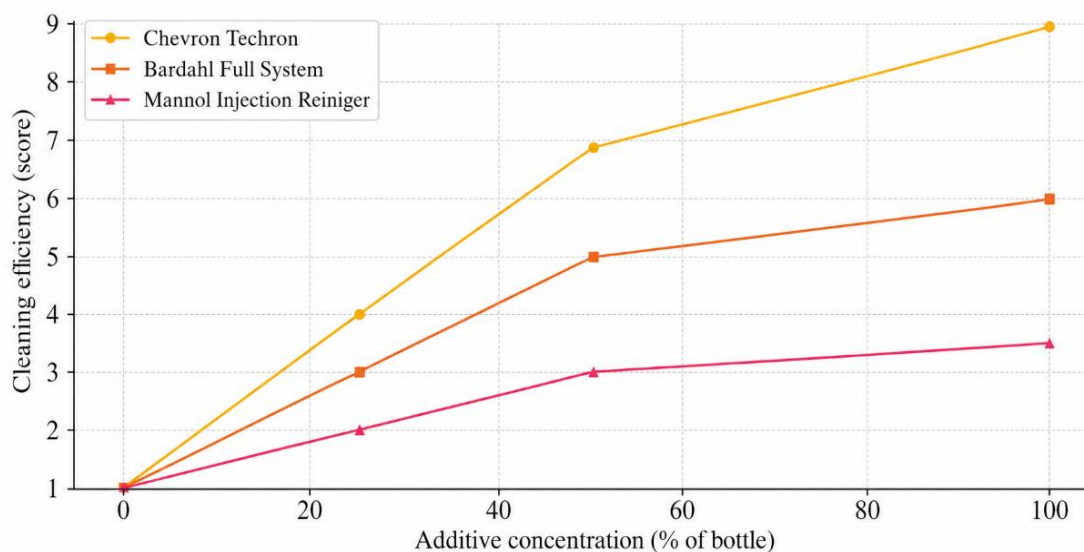


Figure 8. Comparison of fuel system cleaning efficiency

The data obtained during the research for this article suggest that additives demonstrate their effectiveness not only through their chemical composition but also through the very mechanism by which they act on fuel system deposits [17,14,20]. Chevron Techron, containing

polyetheramines (PEA), exhibits high thermal stability. This characteristic effectively helps combat dense carbon deposits that form not only on the injectors but also on the exhaust valve surfaces [9,20]. A cleaning efficiency of 85-90% confirms the engine's performance characteristics [27].

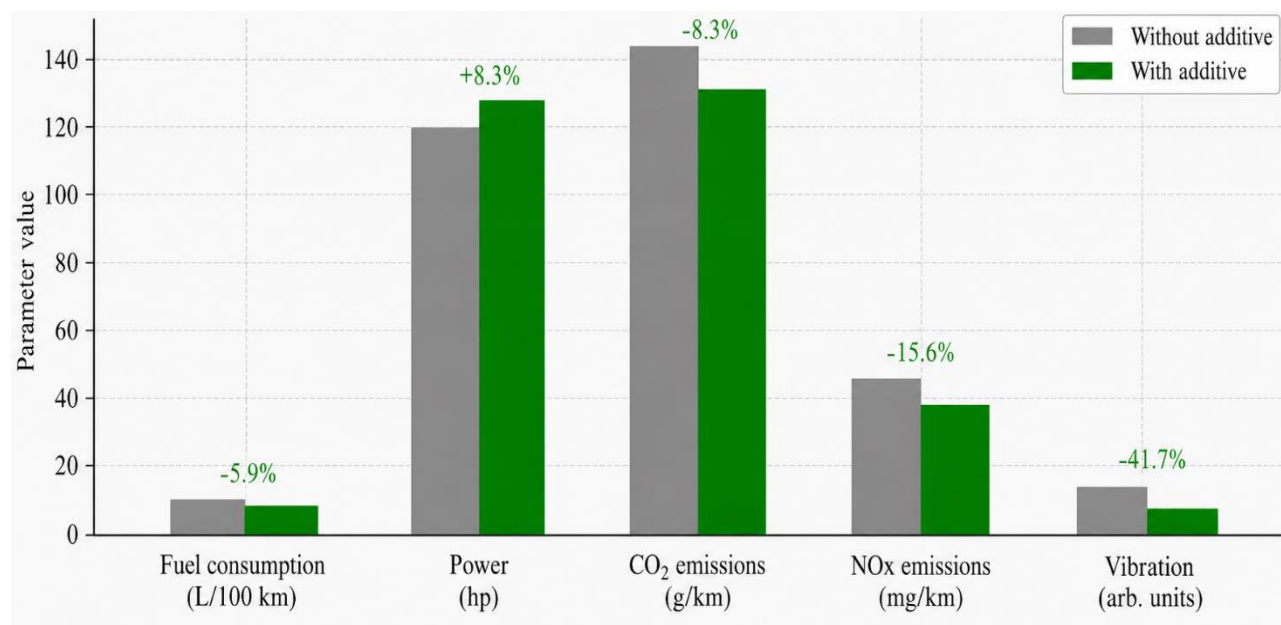


Figure 9. Chevron Techron Additive Results

After the first treatment, the response to the gas pedal improved, but 2-3 cycles were required for complete cleaning.

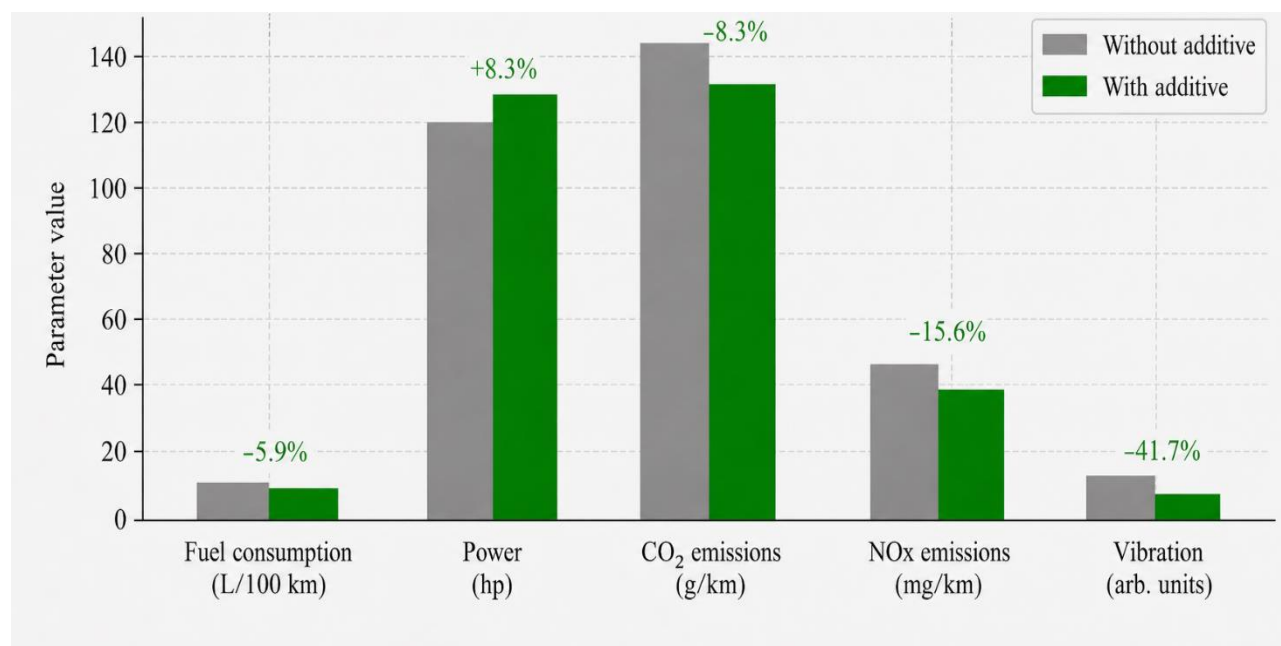


Figure 10. Results of Bardahl Full System additive

Mannol Injection Reiniger (Figure 11) was in the lower-performing category. Its cheap aromatic hydrocarbon solvents provided a temporary effect, but clogged fuel filters and increased injector wear.

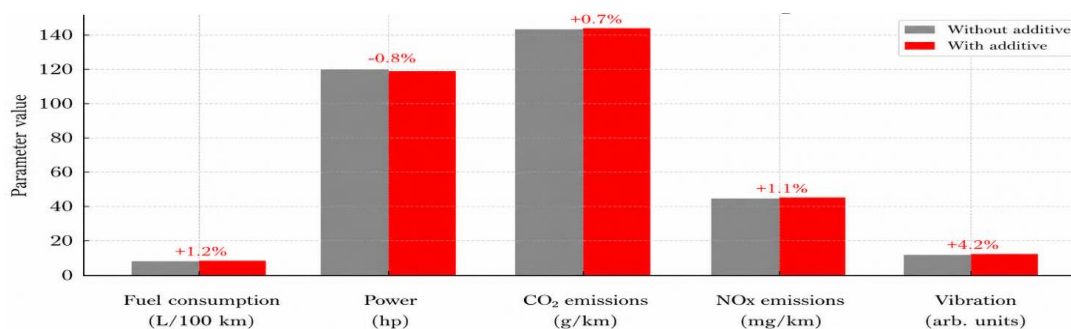


Figure 11. Mannol Reiniger shrinkage results

Fuel consumption has been reduced to 6.8 litres per 100 km. The measures taken have restored the fuel spray pattern, which in turn has improved the combustion efficiency of the air-fuel mixture [7,6,20]. The stability and uniformity of the spray positively affect the local enrichment of the working mixture, thereby reducing CO and NO_x emissions into the atmosphere [4,7,14]. Given the 15.6% reduction in NO_x emissions, the combustion temperature regime has stabilised, thereby reducing local overheating in the combustion chamber [4,7].

Cleaning the fuel injectors has reduced engine vibration. Vibration was reduced by 39%, resulting in smoother cylinder operation. The cause of idling issues and additional vibration is contamination of the fuel supply to the cylinders, demonstrating the significant impact of the aforementioned measures [7,19].

When switching from the aggressive Chevron Techron treatment to the preventive Bardahl Full System Injector Cleaner, we can identify milder components and surfactants that are effective primarily in the early stages of contamination [14,20]. Fuel consumption decreased to 7 litres per 100 km with Bardahl Full System Injector Cleaner, and CO emissions decreased to 1.3 g/km. Despite this, using Bardahl Full System Injector Cleaner is not cost-effective, as it requires more than two application cycles. Its slow, cumulative effect is a weak point compared to PEA-based formulations [14].

Mannol Injection Reiniger showed the least positive effect. Its limited ability to remove stubborn deposits – due to its composition and cleaning limitations – results in fuel consumption of up to 7.2 litres per 100 km. The reason for this poor performance is that it merely temporarily dissolves the carbon deposits rather than removing them. Dissolving carbon deposits rather than completely removing them can lead to negative consequences and the risk of secondary contamination of the filter elements [9,20]. As a result, prolonged use of Mannol Injection Reiniger can adversely affect fuel injector performance [7,14].

Based on the study's findings, a directly proportional relationship can be established between the degree of fuel system cleanliness and the engine's technical and environmental performance [7,14,20]. Low fuel consumption, reduced harmful emissions, and lower vibration loads depend on the level of contamination during engine operation [4,7,19]. It is worth noting that vehicles with an average mileage of over 60,000 km are most susceptible to this phenomenon, as the accumulation of lacquer and carbon deposits becomes more pronounced with increasing mileage

[9,20].

Based on the above, the following conclusion can be drawn: Chevron Techron is the most environmentally friendly, economical, and effective fuel additive. Bardahl has proven itself effective for moderate levels of contamination and for preventive maintenance. Mannol can only be used in the early stages as a temporary, budget-friendly solution when there is no serious contamination of the engine's fuel system.

Conclusion

The study of fuel additive efficiency in the 1.4 TSI (EA211) engine identified significant differences in their effects on operational and environmental parameters. Based on the analysis of empirical data obtained under combined cycle conditions (city/highway) with a mileage of 80,000 km, the following conclusions were formulated:

1. Optimisation of performance characteristics.

Polyetheramine (PEA) based additives have demonstrated maximum efficiency:

- reduction in fuel consumption by 5.3% (from 8.5 to 8.0–8.1 l/100 km).
- increase in power by 7.2% due to the removal of carbon deposits from the valves and restoration of the injector spray geometry.
- reduction of vibration amplitude at idle speed by 39%, which indicates stabilisation of engine operation.

2. Ecological effect.

The use of PEA-containing compounds (Liqui Moly Jectron, Chevron Techron) ensured:

- reduction of CO₂ emissions by 7.3% (from 145 to 133–136 g/km).
- reduction of NO_x concentration by 15.6% (from 45 to 38–40 mg/km).

These results comply with the requirements of the Euro 6 standard and confirm the possibility of using additives to adapt engines to increasingly stringent environmental standards.

3. Critical limitations of budget analogues.

Mineral solvent-based products (Mannol Reiniger, STP Jet Tech):

- increased fuel consumption by 1.2% due to incomplete combustion of the mixture.
- increased emissions of toxic substances (benzene, soot) by 1.1%.
- demonstrated low cleaning capacity (<30% efficiency).

4. Economic feasibility.

A comparative analysis showed that the regular use of PEA additives (every 5–7 thousand km) reduces operating costs:

- fuel economy: 250,000–300,000 tenge/year (for 250 tenge/l and a mileage of 15,000 km/year).
- reduced repair costs: preventing coking of valves and injectors reduces the likelihood of expensive mechanical cleaning.

Recommendations for practical application:

For engines with direct injection and a mileage of up to 150,000 km, PEA-containing additives are preferable.

Compositions with kerosene components are not recommended due to the risk of damage to the catalytic converter.

Before use, it is necessary to diagnose the condition of the fuel system: in case of severe contamination, a combined approach is required (chemical + ultrasonic cleaning).

This study confirms that rational selection of fuel additives is an effective tool for extending the service life of TSI engines, in line with the automotive market's continued dominance of ICEs.

Further research should focus on the long-term effects of combining additives with biofuel mixtures.

The contribution of the authors:

Bolat R.M. – concept, methodology, analysis, interpretation, editing.

Balgabekov T.K. – data collection, testing, modeling, drafting, analysis.

Rustembayev A.B. – resources, data collection, analysis, drafting, editing.

Zharassov Sh.Zh. – visualisation, interpretation, editing.

References

1. Samuel S. The Effect of Gasoline Additives on Combustion Generated Nano-scale Particulates. Florence, Italy, 2009. P. 2009-01–1823. doi: 10.4271/2009-01-1823
2. Gonzalez-Olmos R., Iglesias M., Mattedi S. Influence of temperature on thermodynamics of ethanol + hydrocarbon gasoline additives // *Physics and Chemistry of Liquids*. 2010. V. 48, № 3. P. 337–384. doi: 10.1080/00319100902894223
3. A review of recent research related to high gasoline additive treatment rates: Technical Report. 700 Second Street NE Washington, DC 20002: American Chemistry Council, 2024. URL: <https://www.americanchemistry.com/industry-groups/petroleum-additives/resources/fatg-review-of-recent-research-related-to-high-gasoline-additive-treat-rates> (dated: 21.04.2026)
4. Kumar C. Properties and effects of organic additives on performance and emission characteristics of diesel engine: a comprehensive review // *Environ Sci Pollut Res*. 2018. V. 25, № 23. P. 22475–22498. doi: 10.1007/s11356-018-2537-6
5. Bari Siddiqui M. A. Additives for the reduction of sulfur in FCC gasoline // *React Kinet Catal Lett*. 2007. V. 91, № 1. P. 61–67. doi: 10.1007/s11144-007-5000-0
6. Radhi B., Radhi A. The Recent Development in Gasoline Upgrading Additives (Octane Boosters) // *Journal of Southwest Jiaotong University*. 2020. V. 55, № 6. P. 44. doi: 10.35741/issn.0258-2724.55.6.44
7. Naga Venkata Siddartha G. Effect of fuel additives on internal combustion engine performance and emissions // *Materials Today: Proceedings*. 2022. V. 63. P. A9–A14. doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.307
8. Da Silva M. P. F. Classification of gasoline as with or without dispersant and detergent additives using infrared spectroscopy and multivariate classification // *Fuel*. 2014. V. 116. P. 151–157. doi: 10.1016/j.fuel.2013.07.110
9. Bennett J. Advanced fuel additives for modern internal combustion engines // *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Elsevier, 2014. P. 165–194. doi: 10.1533/9780857097422.1.165
10. Dabbagh H. A. The influence of ester additives on the properties of gasoline // *Fuel*. 2013. V. 104. P. 216–223. doi: 10.1016/j.fuel.2012.09.056
11. Middaugh J. P. Reacting to Gasoline Additives // *Science*. 1994. V. 263, № 5153. P. 1545–1545. doi: 10.1126/science.7510418
12. Da Silva M. P. F. Classification of gasoline as with or without dispersant and detergent additives using infrared spectroscopy and multivariate classification // *Fuel*. 2014. V. 116. P. 151–157. doi: 10.1016/j.fuel.2013.07.110
13. Nadim F. United States experience with gasoline additives // *Energy Policy*. 2001. V. 29, № 1. P. 1–5. doi: 10.1016/S0301-4215(00)00099-9

14. Daud S., Hamidi M. A., Mamat R. A review of fuel additives' effects and predictions on internal combustion engine performance and emissions // AIMSE. 2022. V. 10, № 1. P. 1–22. doi: 10.3934/energy.2022001
15. Hayyan A. A new processing route for cleaner production of biodiesel fuel using a choline chloride-based deep eutectic solvent // Journal of Cleaner Production. 2014. V. 65. P. 246–251. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.08.031
16. Schifter I. Combustion and emissions behavior of ethanol–gasoline blends in a single-cylinder engine // Fuel. 2011. V. 90, № 12. P. 3586–3592. doi: 10.1016/j.fuel.2011.01.034
17. Clean Technologies and Environmental Policy [Electronical resource] // ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net/journal/Clean-Technologies-and-Environmental-Policy-1618-9558> (dated: 05.02.2026).
18. Rashedul H. K. The effect of additives on properties, performance and emission of biodiesel fuelled compression ignition engine // Energy Conversion and Management. 2014. V. 88. P. 348–364. doi: 10.1016/j.enconman.2014.08.034
19. Naga Venkata Siddartha G. Effect of fuel additives on internal combustion engine performance and emissions // Materials Today: Proceedings. 2022. V. 63. P. A9–A14. doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.307
20. Bennett J., Mabilie C. Advanced fuel additives for modern internal combustion engines // Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance. Elsevier, 2022. P. 197–229. doi: 10.1016/B978-0-323-90979-2.00002-0
21. Abdellatief T. Novel variants conceptual technology to produce eco-friendly, sustainable, high-octane-gasoline biofuel based on renewable gasoline component // Fuel. 2024. V. 366. P. 131400. doi: 10.1016/j.fuel.2024.131400
22. Dasilva R. Effect of additives on the antiknock properties and Reid vapor pressure of gasoline // Fuel. 2005. V. 84, № 7–8. P. 951–959. doi: 10.1016/j.fuel.2005.01.008
23. Kaya G. Experimental comparative study on combustion, performance and emissions characteristics of ethanol-gasoline blends in a two stroke uniflow gasoline engine // Fuel. 2022. V. 317. P. 120917. doi: 10.1016/j.fuel.2021.120917
24. Andersson P. Cracking catalyst additives for sulfur removal from FCC gasoline // Catalysis Today. 1999. V. 53, № 4. P. 565–573. doi: 10.1016/S0920-5861(99)00144-3
25. Wen M. Impacts of MTBE in gasoline on the tailpipe ammonia emissions from China-6 certified passenger vehicles // Journal of Hazardous Materials. 2024. V. 480. P. 136275. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.136275
26. Colliou T. Impact of diesel and detergent contamination on gasoline low-speed pre-ignition and their characterization using unwashed gums // Fuel. 2022. V. 318. P. 122754. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122754
27. Reid, K. (2009). Update: Chevron's Techron formulation. National Petroleum News, 101(4), URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/77957009546?origin=resultslist>

Information about the authors:

Bolat R.M. – Master's student in «Transport, transport equipment and technologies», Technical Faculty, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Zhenis avenue, 62, 010011, Republic of Kazakhstan

Balgabekov T.K. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Academician of IIA, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Zhenis avenue, 62, 010011, Republic of Kazakhstan

Rustembayev A.B. – PhD, head of department, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Zhenis avenue, 62, 010011, Republic of Kazakhstan

Zharassov Sh.Zh. – Corresponding author, PhD, Senior lecturer, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Zhenis avenue, 62, 010011, Republic of Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-190-210>

Система диагностики неисправностей для вспомогательных преобразователей в электровозах на серии “hxd3c”

Давран Раджибаев* , **Ясур Анаркулов** 

Ташкентский государственный транспортный университет

E mail: radjibayev_railway@tstu.uz anorkulov_jasur@tstu.uz

Аннотация. В данной статье предлагается система диагностики неисправностей при вспомогательном преобразователе (ACU) в электровозах на базе HXD3C, работающих в железных дорогах Узбекистана. Вспомогательные дефекты преобразователя важны, потому что они влияют на двигатели тяги, системы охлаждения, компрессоры и другие вспомогательные машины, необходимые для безопасной эксплуатации локомотивов. В настоящее время в локомотивных депо Узбекистана расследование неисправностей в основном зависит от визуального контроля и ручного обзора крупного экспорта неисправностей системы управления и мониторинга поездов (TCMS). Этот процесс занимает много времени, в зависимости от опыта персонала, который может привести к отсутствию важных моделей ошибок в исторических записях, загруженных из TCMS. Вся предлагаемая система состоит из трех основных частей: миникомпьютер на базе ARM, диагностическое программное обеспечение с моделью машинного обучения интегрировано для будущего прогнозирующего обслуживания, и экран для вывода и отправки результатов в персонал. Предлагаемый метод использует загруженные записи ошибок TCMS и записи вспомогательных единиц преобразователя в качестве входа. Затем специальное программное обеспечение анализирует отчеты о данных и выводах, визуальные статистики и рекомендации по возможному руководству по обслуживанию сбоя ACU.

Ключевые слова: HXD3C; электровоз O'Z-EL; вспомогательный преобразователь; TCMS; диагностика неисправностей; обслуживание железнодорожного подвижного состава; LSTM; подготовка к прогнозному обслуживанию

Введение

Электровозы серии O'Z-EL являются важной частью современного парка электровозов с переменным током Узбекской железной дороги. Типы O'Z-EL и O'Z-ELR связаны с серией HXD3C, производимой CRRC Dalian для работы с магистральной линией 25 кВ, 50 Гц (Рисунок 1).



Рисунок 1. Электровоз серии O'Z-EL

Вспомогательные преобразователи являются важными компонентами электровозов, отвечающими за преобразование постоянного тока (DC) в переменный ток (AC) или наоборот. Основными функциями почти всех типов локомотивов являются охлаждение основных компонентов, таких как тяговые двигатели, зарядка аккумуляторов транспортного средства и подача электроэнергии в контур управления локомотивами [1] (Рисунок 2).

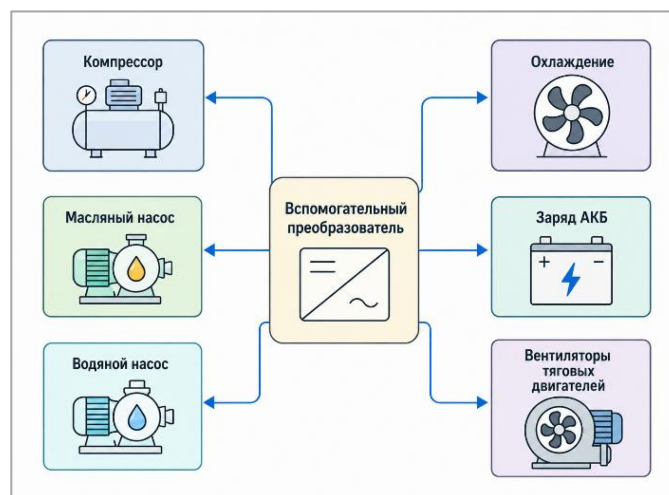


Рисунок 2. Основные вспомогательные машины электровозов, питающиеся от вспомогательного преобразователя

Локомотив может иметь здоровую тяговую схему, но все еще теряет доступность, когда вспомогательный выход преобразователя, напряжение управления воротами, качество входного питания, охлаждение или проводка становится нестабильным. Таким образом, диагностика ACU напрямую связана с надежностью, нагрузкой на склады и планированием обслуживания.

Результаты первоначальной диагностики неисправностей показывают, что с помощью простых визуальных графов вывода, таких как линейные и барные графы персонал технического обслуживания может примерно анализировать возникновение неисправностей и возможные причины неисправностей. Эти графики экономят много времени для персонала во время анализа ошибок в техническом обслуживании. И это очень важно для быстрого и качественного обслуживания электровозов. Этот первоначальный результат сам является важной частью данного исследования, поскольку частично автоматизирует процесс диагностики неисправностей в локомотивных депо узбекских железных дорог.

Результаты показывают, что предлагаемая диагностическая система может поддерживать и ускорить процессы технического обслуживания до того, как в железных дорогах Узбекистана будет доступен полный дистанционный мониторинг в реальном времени. Исследование способствует практическому подходу к использованию существующих исторических данных TCMS для улучшения диагностики ошибок, снижения ручного анализа и подготовки электровозов на базе O'Z-EL для потенциальной интеграции прогнозирующего обслуживания в будущем.

В локомотивных депо Узбекской железной дороги практическое обслуживание по-прежнему зависит от визуального осмотра и ручного обзора загруженного экспорта ошибок TCMS. Этот подход использует опыт работы с персоналом, но становится медленным, когда файл содержит тысячи повторяющихся сообщений, сообщений восстановления и неспецифических тревог. Важные модели ACU могут быть скрыты общими локомотивами. Ранние повторяющиеся события также могут быть пропущены, прежде чем они приводят к большему провалу.

Недавние исследования по техническому обслуживанию железных дорог подчеркивают платформы данных, подключенные TCMS, безопасную связь и предсказательное обслуживание [2], [3]. Эти направления важны, но полный дистанционный мониторинг требует инфраструктуры связи, контроля кибербезопасности, безопасности данных и организационной интеграции. Для текущих складов Узбекистана хранение местных таблиц данных TCMS вместе с офлайн-диагностической системой является практическим первым этапом. Это может создать полезный прогресс в обслуживании до внедрения облачного мониторинга в реальном времени в инфраструктуру железных дорог Узбекистана.

Основным вкладом в эту статью является депо-уровневый рабочий процесс для диагностики ошибок ACU с использованием существующих записей TCMS от локомотивов на базе HXD3C O'Z-EL (Рисунок 3). Система автоматически очищает сырые журналы, изолирует события ACU, отображает изменения параметров вокруг моментов ошибок, сортирует повторяющиеся группы ошибок ACU и сравнивает статистические, машинно-учебные и глубокие модели для краткосрочной диагностической поддержки. В исследовании рассматриваются три вопроса: содержат ли исторические данные TCMS полезные шаблоны разломов ACU; какие группы разломов ACU чаще всего встречаются; и

если выбранная модель дает полезную поддержку для обслуживания складов в Узбекистане.

Связанные предыдущие работы и разрыв в исследовании

Существующие диагностические исследования для электровозов серии HXD3C

Существующие исследования, связанные с HXD3C, сосредоточены в основном на бортовом диагностическом программном обеспечении, функциях питания и логике управления высоким напряжением. Zhang описал программное обеспечение для диагностики ошибок питания HXD3C, включая функции передачи, хранения, дисплея и диагностики [4]. Gao и др. изучали безопасную работу высоковольтного оборудования HXD3C посредством оптимизации последовательного управления [5]. Эти работы полезны для понимания диагностической среды локомотивов, но они не обеспечивают депо-уровневую систему, подходящую для исторических вспомогательных разломов преобразователей электровозов на базе HXD3C в железных дорогах Узбекистана.



Рисунок 3. Общая структура предлагаемой системы для диагностики неисправностей

Конвертер тяги и диагностика неисправностей инвертора

Электронная диагностика неисправностей была изучена многими исследователями методами на основе моделей, сигналов и данных. Gou и др. предложили метод диагностики разломов с открытым переключателем для однофазного ректификатора PWM в высокоскоростной системе тягового привода железной дороги [6]. Yu и др. изучали диагноз разломов напряжения и тока датчика в тяговых выпрямителях, а затем расширили работу до места разлома и идентификации типа [7], [8]. Dong и др. предложили адаптивный мультисенсорный метод для высокоскоростных преобразователей тяги поездов с использованием временного обучения [9], в то время как Deng и др. представили легкий метод ИИ для нарушений открытого цеха в однофазных PWM выпрямителях [10].

Недавние исследования также показывают растущее использование глубокого обучения и гибридных методов для диагностики инверторов и преобразователей. Примеры включают улучшенные остаточные сети для диагностики дефектов инвертора, обнаружение дефектов открытых ворот, открытых переключателей и коротких путей, гибридный электрорельсовый диагноз, детектирование дефектов электрических соединений в индукционных машинах, онлайн диагностику короткого замыкания IGBT, и прогнозирование надежности искусственно-нейро-сети для трехфазных инверторов [11]-[16]. Другие работы были сосредоточены на термоэлектрическом слиянии для IGBT модулей, мониторинге конденсаторов постоянного тока в двигательных инверторах и

обнаружении аномалий для железнодорожного оборудования с использованием данных мониторинга состояния [17]-[19].

Платформы железнодорожных данных и прогнозирующее техническое обслуживание

Исследования по техническому обслуживанию железных дорог также перешли к платформам данных и подключенному мониторингу. Ху и др. представили платформу больших данных для диагностики высокоскоростных сбоев поезда [2]. Gozali и др. описали умную концепцию TCMS с предсказывающими функциями технического обслуживания и безопасной коммуникации [3]. Эти системы показывают долгосрочное направление, но они также требуют инфраструктуры и интеграции, которые могут быть недоступны на первом этапе в железных дорогах Узбекистана. Предлагаемая локальная система, основанная на скачанных данных TCMS, может, таким образом, стать мостом с меньшим риском между ручной инспекцией и будущим прогнозирующим обслуживанием.

Исследовательский пробел

Учитывая текущие запланированные ремонтные работы в локомотивных депо Узбекистана, научно-исследовательский разрыв практичен и специфичен для данных. Литература содержит сильные методы для преобразователей тяги, инверторов, датчиков и мониторинга железных дорог, но есть ограниченные опубликованные работы по оффлайн диагностике разломов ACU с использованием низкочастотных журналов разломов TCMS от локомотивов на базе HXD3C в Узбекистане. Доступные данные депо шумны и преобладают повторяющимися численными журналами, а не подробными описаниями. Это исследование устраняет этот разрыв, создавая систему, которая работает с существующими TCMS записями и производит удобный диагностический инструмент для персонала технического обслуживания.

Методология

Объем исследования и источники данных



Рисунок 4. Детальная структура предлагаемой системы

Очистка и извлечение событий ACU

Исторические данные образца TCMS содержали 16 733 сырых записей перед очисткой данных. Первый шаг очистки удалил записи, которые не были полезны для диагностики, в

том числе “NODISP (No display - нет отображения)”, “Recovered (восстановлено)”, и другие сообщения состояния обслуживания или неспецифических сообщений. Это оставило 13 233 диагностически полезных записей. На втором шаге были выбраны записи, содержащие ключевое слово ACU, которое произвело 281 вспомогательный конвертер записей для фокусированного анализа.

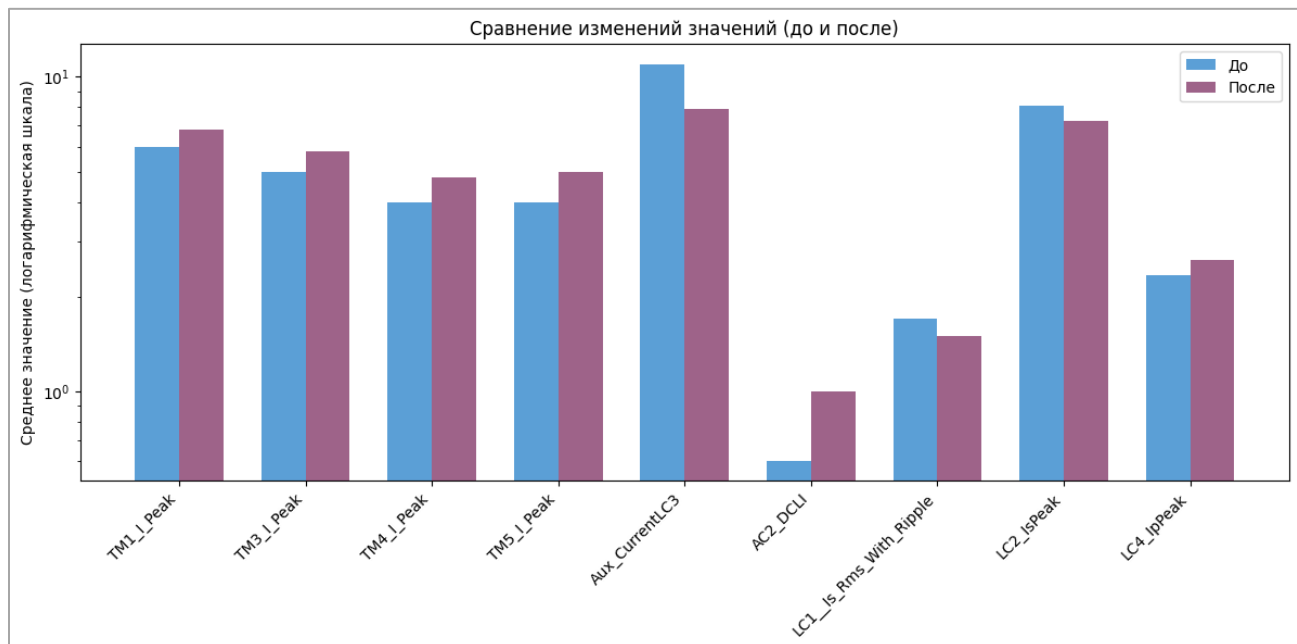


Рисунок 5. Среднее сравнение параметров до и после фильтрации ACU по ошибкам

Следует отметить, что полный экспорт данных TCMS HXD3C за длительный эксплуатационный период может содержать до 27 000 строк сырых данных. Эти файлы включали инженерные значения в процентах, оборотах в минуту, км/час, амперах, вольтах, а также числовые поля без единиц измерения. Для сохранения четких параметров для визуализации был применен абсолютный порог до и после изменения на 10%. Этот порог является эмпирическим фильтром первой стадии, а не универсальным физическим пределом.

Следующие рисунки 5–7 показывают результаты применения порога 10% в разных типах визуализации. Горизонтальные столбчатые диаграммы лучше иллюстрируют значения с наибольшими изменениями с помощью абсолютного процентного изменения полей после фильтрации порога для одного и того же события ошибки ACU.

Из рисунка 7 видно, что параметр AC_DCLI (ток звена постоянного тока вспомогательного преобразователя) показал наибольшее абсолютное изменение (66,67%), что может указывать на неисправность в соответствующей цепи.

Исследовательский анализ данных и подготовка характеристик

Исследовательский анализ данных был использован перед тестированием модели, чтобы понять, как с течением времени изменялись числа ошибок. Ежедневное количество ошибок было составлено для поиска периодов с высоким дефектом и возможных кластеров (Рисунок 8).

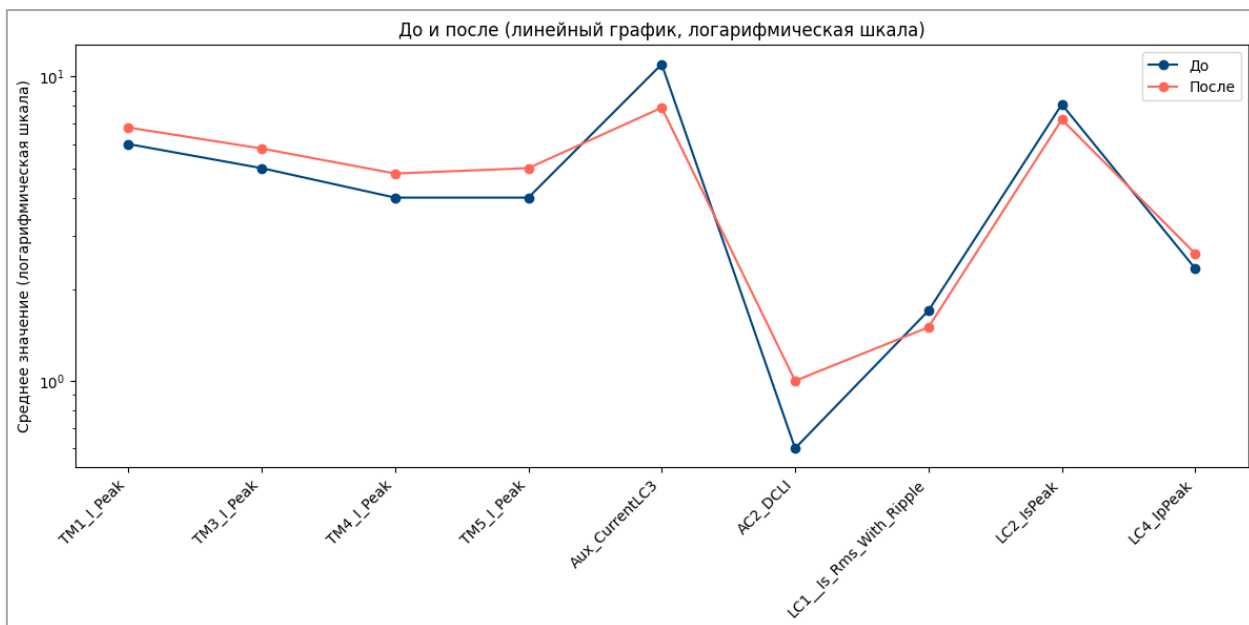


Рисунок 6. До и после сравнения строк для выбранных полей вокруг события ошибки вспомогательного конвертера

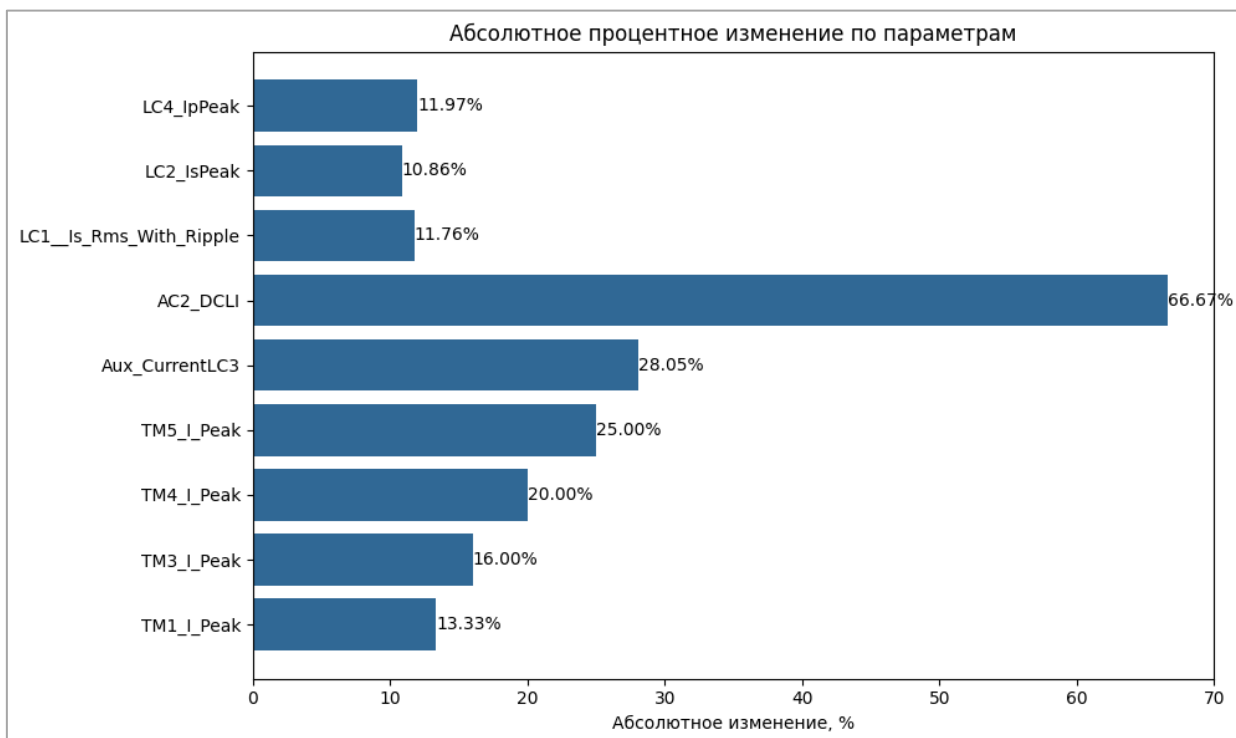


Рисунок 7. Абсолютное процентное изменение полей после фильтрации порогов для одного и того же события ошибки АСУ

Для разделения наблюдаемой последовательности на трендные, сезонные и остаточные компоненты использовался участок разложения (Рисунок 9). Этот шаг важен, потому что нефильтрованный экспорт TCMS включает повторяющиеся тревоги со многих систем, и самые частые сообщения не всегда связаны с поведением АСУ.



Рисунок 8. Ежедневное общее число ошибок в историческом экспорте TCMS до ACU-специфического моделирования



Рисунок 9. Разложение ежедневных сбоев в наблюдаемые серии, тренды, сезонные компоненты и остатки

На рисунке 10 показаны десять наиболее частых описаний сбоев до фильтрации ACU-специфичных записей. Этот график помогает понять, какие сообщения чаще всего встречались в исходных данных TCMS. Он также показывает, почему была необходима дополнительная фильтрация, так как самые частые сообщения не всегда относятся к работе ACU.

После очистки исторические записи были преобразованы в временные индексированные количества ошибок. Дефекты были сгруппированы по дате, неделе, описанию ошибок и блоку АСУ. Повторные описания ошибок были приоритетными, потому что они предоставляют более сильные доказательства обслуживания, чем изолированные одноразовые тревоги. Этот выбор также совпадает с практикой депо: повторяющиеся преобразователи тревоги более полезны для планирования проверки, чем редкие сообщения с небольшой историей.

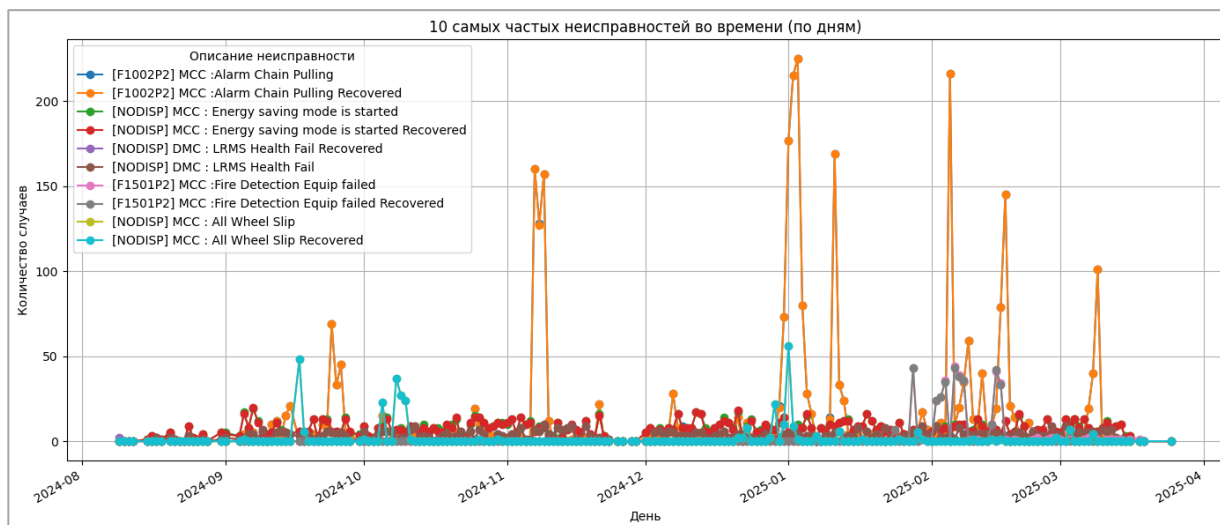


Рисунок 10. Десять наиболее частых описаний сбоев за время до фильтрации АСУ-специфичных

Диагностика рабочего процесса и профилактическое обслуживание

Простой рабочий процесс начинается с экспорта журнала ошибок TCMS. Неспецифичные записи удаляются, события АСУ извлечены, повторяющиеся группы ошибок АСУ ранжируются, а выбранные таблицы событий проверяются на изменения параметров до и после. Прогнозирование помещается после диагностики в систему, потому что полезное предсказание зависит от первого определения стабильных и повторяющихся моделей ошибок. Вывод представляет собой простой диагностический отчет с предложениями корневых причин, а не автоматическое решение по техническому обслуживанию.

Разработка и оценка моделей

Были протестированы четыре семейства моделей. ARIMA использовался в качестве статистической базы данных для подсчета ошибок с индексами даты [20]. Prophet использовался в качестве второй статистической базы данных, потому что он может моделировать тренд и сезонность с диапазонами неопределенности [21]. Random Forest использовался в качестве традиционной базовой базы машинного обучения для нелинейных структурированных шаблонов [22], с поддержкой внедрения стандартных инструментов машинного обучения Python [23].

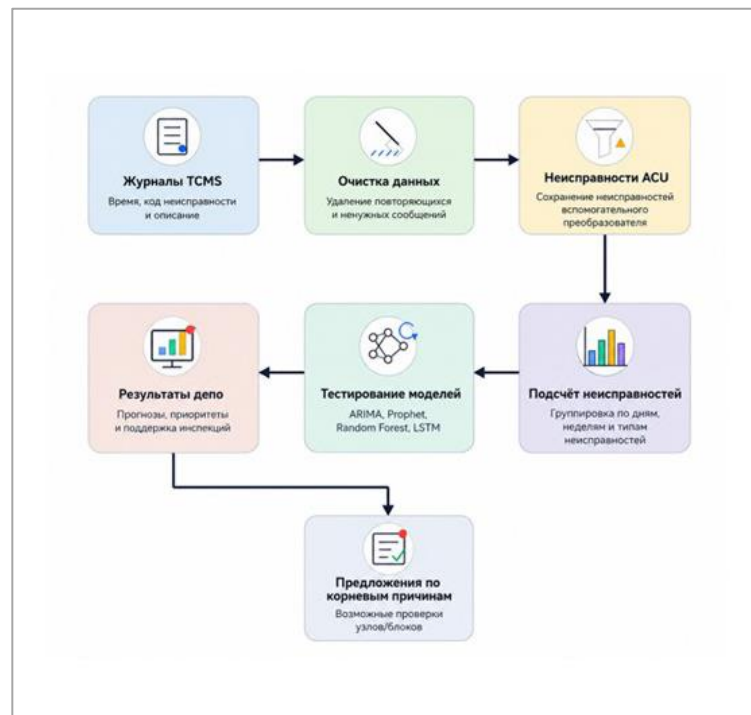


Рисунок 11. Предложенный рабочий процесс на уровне депо для диагностики неисправностей вспомогательного конвертера

В качестве окна оценки использовался последний 30-дневный сегмент. На рисунках 12–17 представлены результаты протестированных моделей.

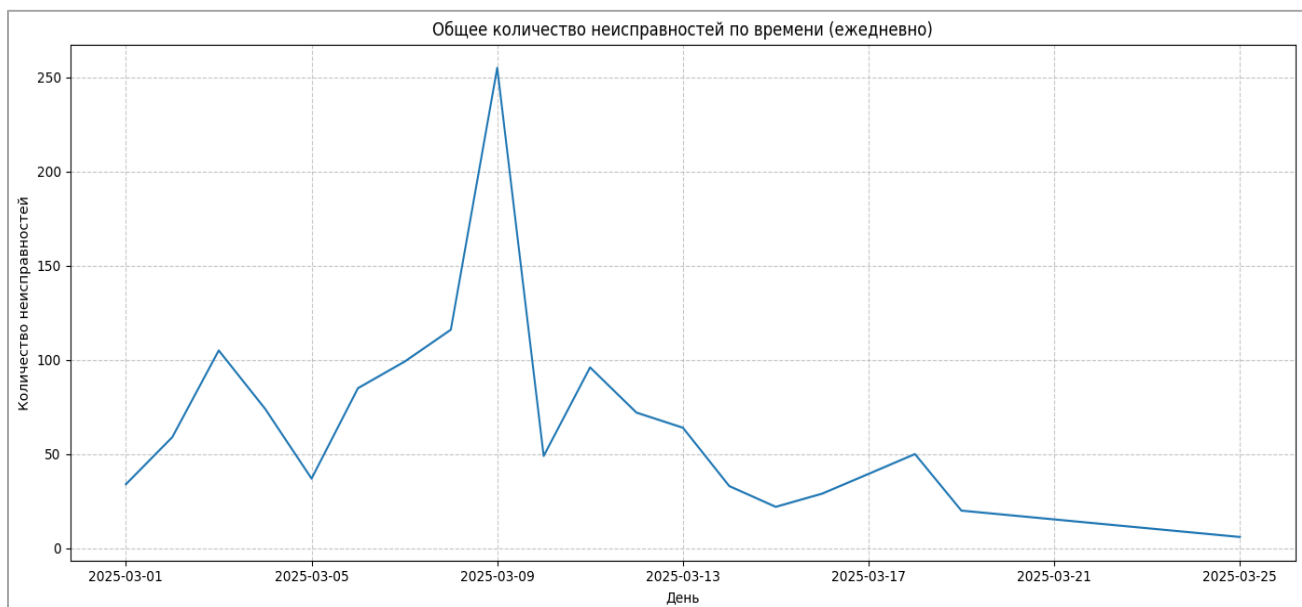


Рисунок 12. Общее количество неисправностей по времени (ежедневно)

Эти результаты показывают, насколько хорошо модели воспроизводят форму прогноза, реагируют на резкие изменения ошибок и могут использоваться для определения приоритетов обслуживания..

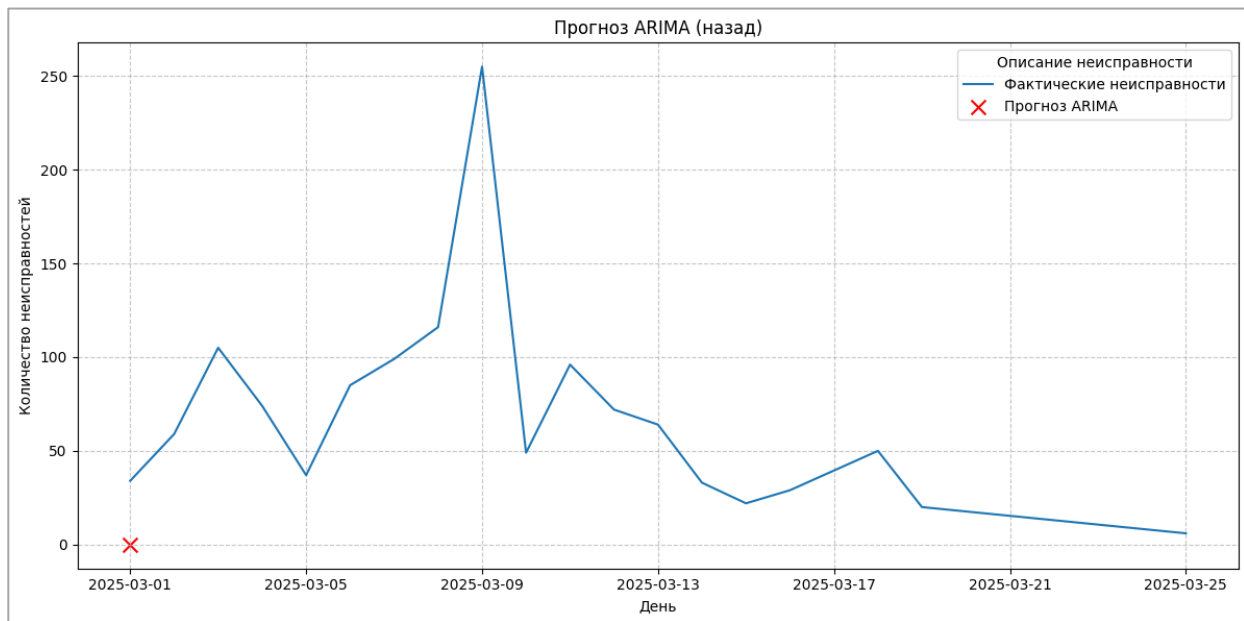


Рисунок 13. Прогноз ARIMA (назад, единая точка)

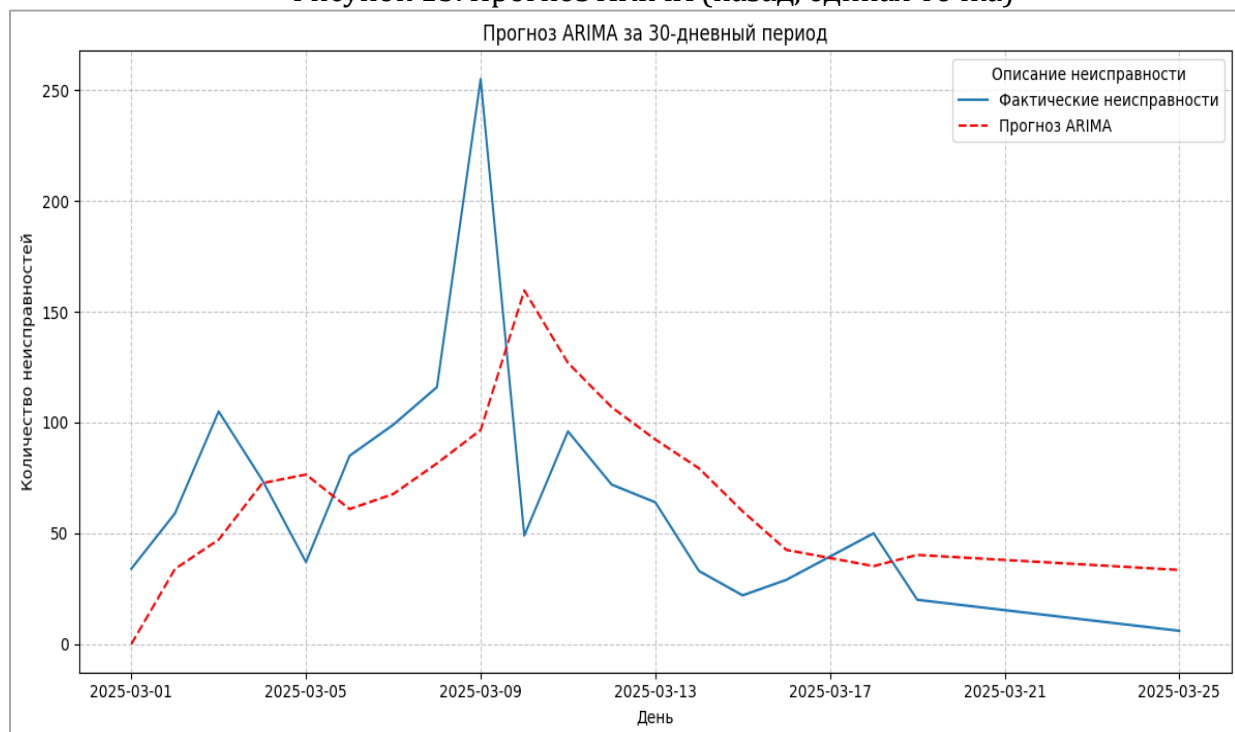


Рисунок 14. Прогноз ARIMA по сравнению с фактическим числом ошибок вспомогательного преобразователя в течение 30-дневного периода

Для модели также были рассчитаны MAE, MAPE и R^2 . Обратная реконструкция ARIMA использовалась только как диагностическая проверка, а не как основной показатель эффективности

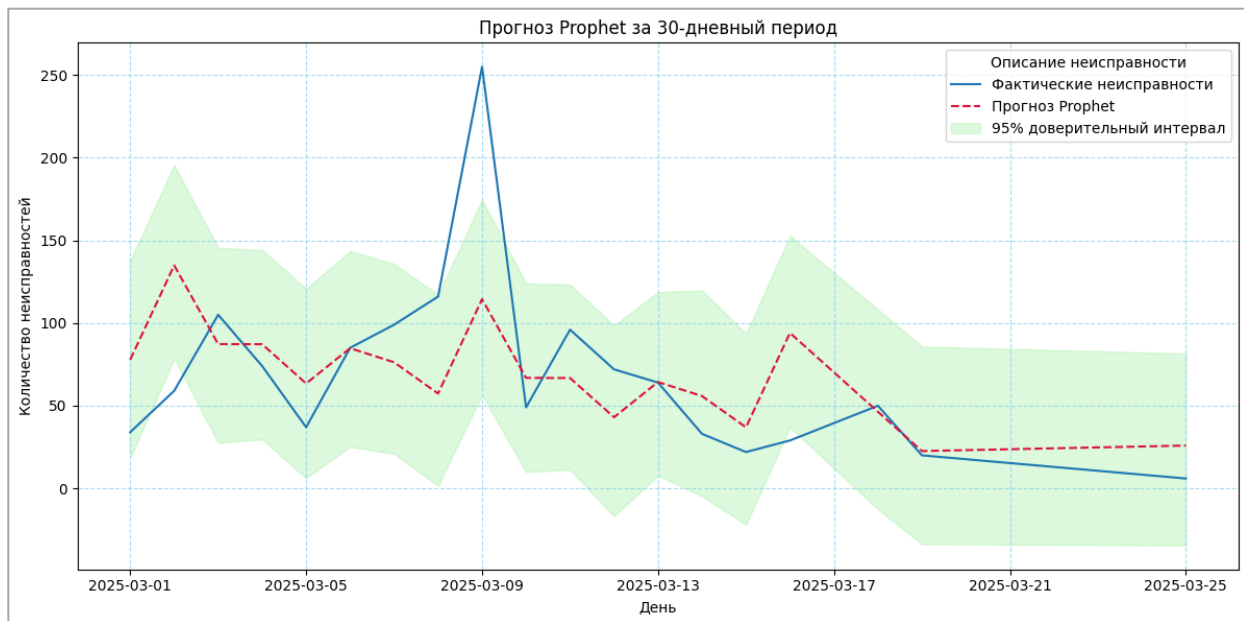


Рисунок 15. Прогноз Prophet с интервалом доверия по сравнению с фактическим числом ошибок в течение 30-дневного периода

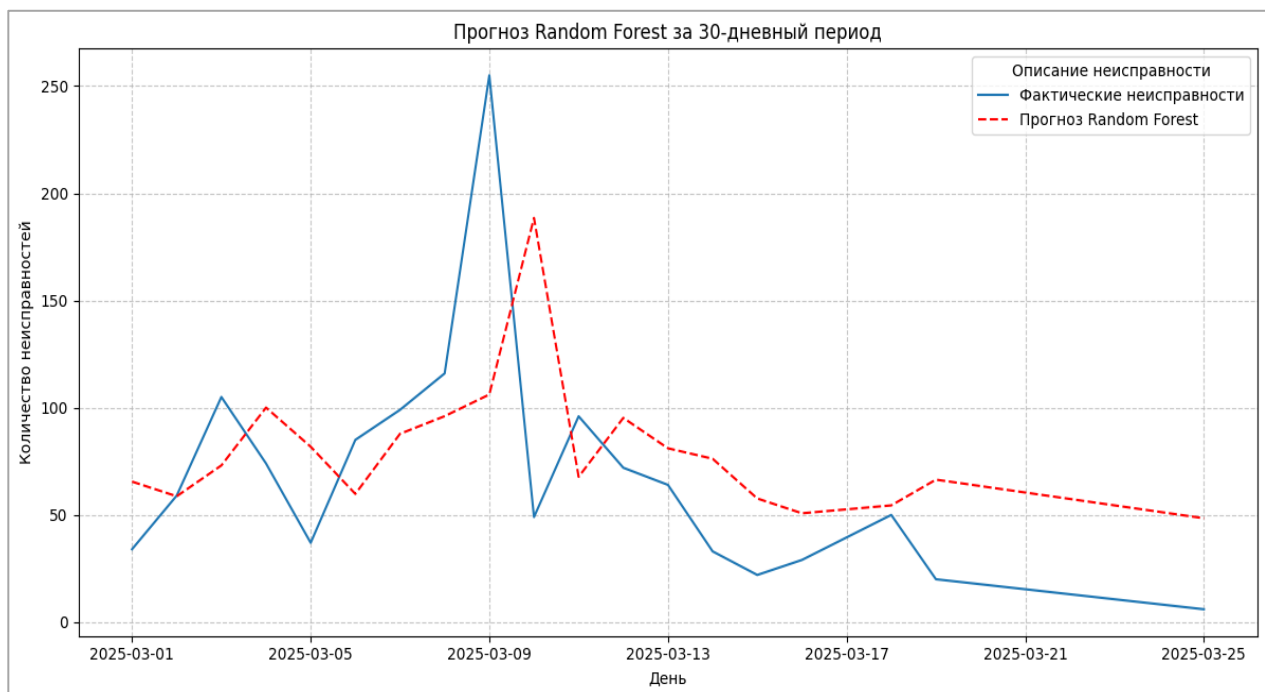


Рисунок 16. Прогноз Random Forest по сравнению с фактическим числом ошибок вспомогательного преобразователя в течение 30-дневного периода

LSTM был использован в качестве модели последовательности глубокого обучения, потому что повторяющиеся ворота памяти могут изучать временные зависимости в нерегулярных последовательностях [24].

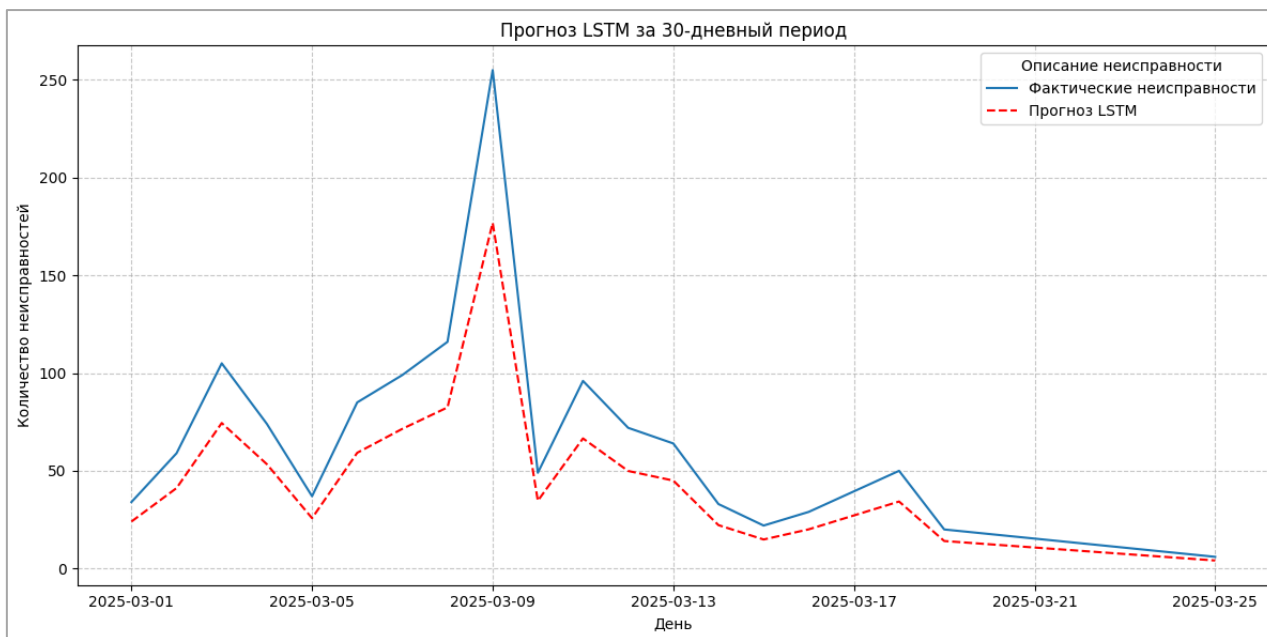


Рисунок 17. Прогноз LSTM по сравнению с фактическим числом ошибок вспомогательного конвертера в течение 30-дневного периода оценки

Таблица 1. Модели прогнозирования, оцененные в исследовании.

Модель	Роль в исследовании	Основная причина тестирования
ARIMA	Статистическая база данных	Простой ориентир для подсчета ошибок с индексированной датой
Prophet	Статистическое прогнозирование базового уровня	Тренд, сезонность и выход в диапазоне неопределённости
Random Forest	Традиционная база машинного обучения	Нелинейное распознавание шаблонов в структурированных данных по подсчёту ошибок
LSTM	Модель последовательности глубокого обучения	Временное обучение для нелинейных и нерегулярных последовательностей ошибок

Результаты и обсуждение

Распределение неисправностей ACU

Набор данных с фильтром ACU показал повторные вспомогательные группы отказов преобразователя. Наиболее частыми рекордами были инверторные ворота низкого напряжения в ACU1 и ACU2, каждый из которых происходил более чем в 20 раз в зарегистрированном периоде. Другие повторяющиеся группы включали в себя входное напряжение переменного тока, инверторные события короткого замыкания и события перегрузки фазы вывода. Этот результат полезен для диагностики, потому что повторные события ACU более действуют, чем изолированные тревоги. Повторные сообщения низкого напряжения ворот могут направлять персонал по обслуживанию к питанию ворот-драйвера, условию преобразователя-модуля, стабильности постоянного тока, качеству

вспомогательного входного питания, охлаждению и коннектора. Рейтинг должен рассматриваться как диагностическая отправная точка, а не как автоматический вердикт причины.

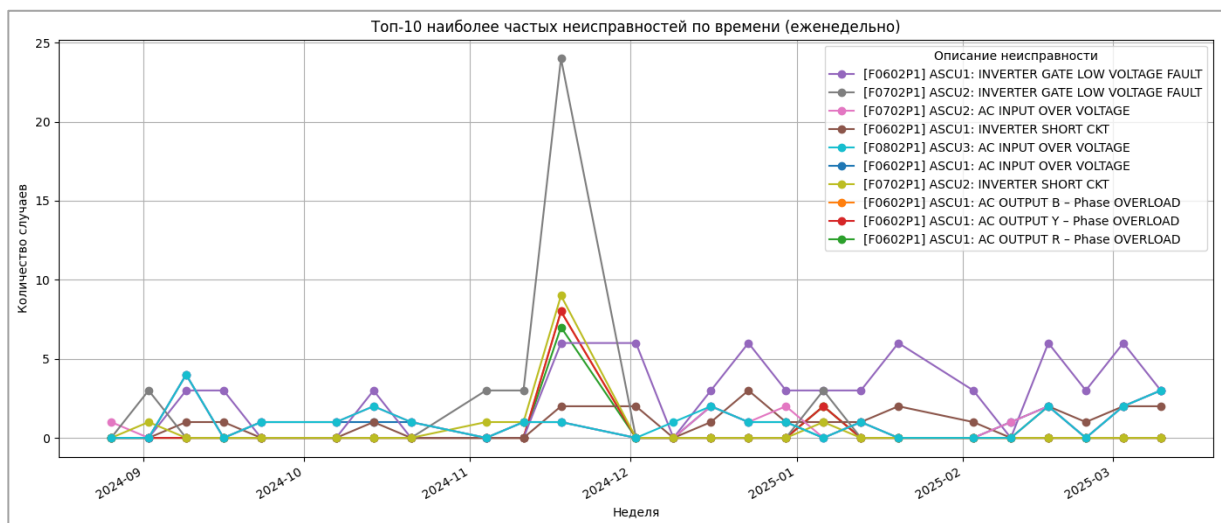


Рисунок 18. Ежедневное появление верхних вспомогательных групп отказов преобразователя ACU после фильтрации

Модель сравнения

Для сравнения моделей обычно рассчитываются по результатам прогнозирования отказов и показывают точность каждой модели. MAE (средняя абсолютная ошибка) и MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка) помогают понять, насколько сильно прогноз отличается от реальных значений в абсолютных и процентных ошибках. R^2 (коэффициент детерминации) показывает, насколько хорошо модель объясняет изменения в данных, поэтому модель с меньшими MAE и MAPE и большим R^2 считается более точной [25], [26].

Статистические базовые линии были полезны для сравнения, но были слабыми кандидатами в диагностику этого набора данных. ARIMA был чувствителен к внезапным изменениям и не хорошо следил за кластерами подсчета ошибок.

Prophet создал более гладкие прогнозы и полезные диапазоны неопределенности, но это также не очень точно на острых пиках. Эти результаты показывают, что чисто статистическое сглаживание может пропустить внезапные кластеры отказов преобразователя в логах низкочастотных депо.

Random Forest следовал общей схеме лучше, чем статистические базовые линии, но его прогнозы были менее стабильными, чем LSTM в течение выбранного 30-дневного периода.

Модель LSTM последовала за фактической тенденцией более последовательно и захватила главный период с высокой ошибкой лучше, чем другие протестированные модели. Это не означает, что модель готова к автономному прогнозирующему техническому обслуживанию. Это означает, что LSTM был самым сильным кандидатом среди протестированных моделей для дальнейшей проверки в качестве инструмента уровня депо. Как модель глубокого обучения LSTM может стать лучше и точнее по мере увеличения набора данных (Таблица 2, 3).

Таблица 2. Сравнение точности четырех моделей за 30-дневный период оценки.

Модель	MAE (меньше лучше)	MAPE (меньше лучше)	R ² (больше лучше)	Стабильность
LSTM	20.54	30.15%	0.71	Высокая
Random Forest	27.80	38.60%	0.58	Средняя
Prophet	34.70	47.10%	0.45	Низкая-средняя
ARIMA	39.25	52.40%	0.34	Ниже средней

Таблица 3. Сравнение моделей для диагностики отказов АСУ

Модель	Стабильность	Рекомендация для диагностики отказов АСУ
LSTM	Высокая	Перспективная модель для дальнейшей валидации
Random Forest	Средняя	Полезна как базовая модель; требуется дополнительная настройка и проверка по локомотивам
ARIMA	Ниже средней	Слабо справляется с резкими изменениями количества отказов в данном наборе данных
Prophet	Низкая-средняя	Подходит для визуализации трендов, но не рекомендуется как основная модель

Результаты показывают, что исторические записи TCMS и АСУ могут поддерживать диагностику неисправностей вспомогательного преобразователя в локомотивах O'Z-EL на базе HXD3C. Основное значение заключается в преобразовании шумного экспорта TCMS в меньший и более четкий набор повторяющихся групп разломов АСУ, которые обслуживающий персонал может сначала осмотреть. Этот диагностический шаг необходим, прежде чем предсказательное обслуживание может быть применено с уверенностью.

Результат LSTM технически обоснован, так как вспомогательные ошибки преобразователя нелинейны и нерегулярны. Они могут быть затронуты профилем маршрута, нагрузкой локомотивов, температурой окружающей среды, условием охлаждения, старением компонентов, качеством вспомогательного снабжения, недавней историей ремонта и управлением. Статистические базовые линии полезны для гладкой тенденции и сезонного развития, но они менее подходят, когда последовательность содержит скопления внезапных ошибок. Random Forest может изучать нелинейные шаблоны, но он, естественно, не моделирует порядок времени, если функции задержки не разработаны тщательно. LSTM лучше выравнивается с структурой последовательности повторных чисел ошибок.

Модельные и сенсорные исследования обеспечивают сильные сигнатуры ошибок, когда требуемые измерения и состояния работы доступны [6]-[10]. Недавние ИИ и гибридные методы показывают, что ошибки преобразователя, инвертора, IGBT и конденсатора могут быть обнаружены с помощью изученных шаблонов [11]-[19].

Исследования железнодорожной платформы данных показывают, как такая диагностика может быть масштабирована в более крупные системы технического обслуживания [2], [3]. Нынешнее исследование отличается тем, что фокусируется на проблеме меньшего, но практического депо: использование уже доступных данных TCMS для анализа ошибок до внедрения полной платформы мониторинга в реальном времени.

Для практики депо предлагаемая система может сократить время ручного обзора, автоматически выделяя повторяющиеся группы ошибок ACU, показывая последние тенденции ошибок с визуальными графами, чтобы сделать его легко анализировать на первый взгляд. Например, повторные инверторные сигнализации низкого напряжения в ACU1 или ACU2 могут направлять целенаправленные проверки питания ворот-драйвера, состояния IGBT/модуля, поведения постоянного тока, вспомогательного входного напряжения, охлаждения и проводки до следующего серьезного сбоя. Инженеры все еще принимают окончательное решение; модель организует только доказательства.

Исследование также поддерживает постановку цифровизации. Полная платформа дистанционного мониторинга остается долгосрочным направлением для электровозов HXD3C в Узбекистане, но она требует надежной коммуникации, безопасного обмена данными, приборных панелей и интеграции технического обслуживания.

Предложенный здесь оффлайн рабочий процесс представляет собой первый этап с меньшим риском, поскольку он использует существующий экспорт TCMS. После проверки на больших и подтвержденных ремонтом наборах данных такая же логика может быть перемещена в реальное время или в облачную среду.

Ограничения

Основные ограничения исследования связаны с данными. Набор данных не содержит непрерывных высокочастотных сигналов преобразователей. Подмножество данных, связанное с ACU, включает только 281 запись, что недостаточно для надежного применения методов глубокого обучения. Порог изменения параметров в 10% был выбран эмпирически, поэтому его необходимо проверить на большем количестве локомотивов, сезонов, маршрутов и данных технического обслуживания. В будущих исследованиях следует использовать более крупные наборы данных, учитывать сезонные эффекты и сравнивать результаты модели с реальными результатами технического обслуживания.

Заключение

В данной статье представлена локальная система диагностики неисправностей вспомогательных преобразователей в электровозах O'Z-EL на базе HXD3C. Метод очищает сырые записи TCMS, удаляет неспецифические сообщения, извлекает события, связанные с ACU, экраны до и после изменений параметров, ранжирует повторяющиеся группы ошибок ACU и сравнивает модели ARIMA, Prophet, Random Forest и LSTM для краткосрочной диагностической поддержки. Среди испытанных моделей LSTM дал наиболее последовательный 30-дневный результат, с MAE = 20,54, MAPE = 30,15%, и $R^2 = 0,71$. ARIMA и Prophet были полезными базовыми линиями, но не следовали кластерам хорошо, в то время как Random Forest предоставил полезный промежуточный ориентир.

Рабочий процесс подходит как промежуточный инструмент для железных дорог Узбекистана, так как он работает с существующими загруженными данными TCMS и не требует новых датчиков на первом этапе. Важной ценностью является частично автоматизированная диагностика ошибок. Его будущая ценность - предсказательное

обслуживание, но эта стадия должна быть реализована только после больших наборов данных и проверки локомотивов.

Доступность данных

Наборы данных по техническому обслуживанию TCMS, используемые в данном исследовании, являются внутренними операционными записями о деятельности по техническому обслуживанию железных дорог. Они не доступны публично, потому что содержат оперативную и специфическую информацию.

Список литературы

1. Ilončiak, L. Struharnanský, and J. Kuchta, "Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives," *Procedia Engineering*, vol. 192, pp. 359–364, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>.
2. Q. Xu, P. Zhang, W. Liu, Q. Liu, C. Liu, L. Wang, A. Toprac, and S. J. Qin, "A Platform for Fault Diagnosis of High-Speed Train Based on Big Data," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 18, pp. 309–314, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.318>.
3. A. Gozali et al., "Smart Train Control and Monitoring System with Predictive Maintenance and Secure Communications Features," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 31, Art. no. 101409, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101409>.
4. B.-K. Zhang, "Design and Realization of Fault Diagnosis Software for HXD3C Electric Locomotive Power Supply," *Electric Drive for Locomotives*, no. 5, pp. 93–95, 2012.
5. G. Yao-hui, W. Qian, L. Xin, Z. Shi-tao, and G. Hong-guang, "Research on the Safe Operation of HXD3C Locomotive High-Voltage Equipment Based on Sequential Control Optimization," *Electric Drive for Locomotives*, no. 4, 2013.
6. B. Gou, X. Ge, S. Wang, X. Feng, J. B. Kuo, and T. G. Habetler, "An Open-Switch Fault Diagnosis Method for Single-Phase PWM Rectifier Using a Model-Based Approach in High-Speed Railway Electrical Traction Drive System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3816–3826, May 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2465299>.
7. Y. Yu, Y. Song, H. Tao, and J. Hu, "Voltage and Current Sensor Fault Diagnosis Method for Traction Rectifier in High-Speed Trains," *Electronics*, vol. 13, no. 1, Art. no. 197, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics13010197>.
8. Y. Yu, Y. Song, and H. Tao, "Fault Location and Type Identification Method for Current and Voltage Sensors in Traction Rectifiers," *Journal of Power Electronics*, vol. 25, no. 4, pp. 666–674, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s43236-024-00916-z>.
9. H. Dong, F. Chen, Z. Wang, L. Jia, Y. Qin, and J. Man, "An Adaptive Multisensor Fault Diagnosis Method for High-Speed Train Traction Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 6, pp. 6288–6302, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3034190>.
10. Q. Deng, B. Gou, X. Ge, C. Lin, D. Xie, and X. Feng, "A High-Accuracy-Light-AI Data-Driven Diagnosis Method for Open-Circuit Faults in Single-Phase PWM Rectifiers," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 3, pp. 4352–4365, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3238009>.
11. Y. Fu, Y. Ji, G. Meng, W. Chen, and X. Bai, "Three-Phase Inverter Fault Diagnosis Based on an Improved Deep Residual Network," *Electronics*, vol. 12, no. 16, Art. no. 3460, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12163460>.

12. M. Z. Khaneghah, M. Alzayed, and H. Chaoui, "Open Gate, Open Switch and Short Circuit Fault Detection of Three-Phase Inverter Switches in Induction Motor Drive Applications," *Actuators*, vol. 15, no. 1, Art. no. 34, Jan. 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/act15010034>.
13. R. Sharma, "Intelligent Fault Diagnosis in Electric Railway Traction System: A Novel Hybrid Approach," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 21, no. 3, pp. 2421–2439, 2026, doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-026-02608-z>.
14. D. Gonzalez-Jimenez, J. del-Olmo, J. Poza, F. Garramiola, and I. Sarasola, "Machine Learning-Based Fault Detection and Diagnosis of Faulty Power Connections of Induction Machines," *Energies*, vol. 14, no. 16, Art. no. 4886, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14164886>.
15. K. Moulay, I. Merzouk, K. O. M. Touati, A. Hafaifa, and G. Alhussein, "Online IGBT Short-Circuit Fault Diagnosis in Modular Multilevel Converter Based on DWT and RBFNN," *IEEE Access*, vol. 14, pp. 22252–22273, 2026, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3662514>.
16. H.-M. Park, J.-H. Lee, H.-S. Jun, K.-B. Hwang, S.-J. Park, and J.-H. Park, "Reliability Diagnosis and Fault Prediction Technique for Three-Phase Inverters Using Artificial Neural Networks," *IEEE Access*, vol. 14, pp. 4576–4590, 2026, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3650960>.
17. M. Cui, Y. Liu, Z. Hu, and T. Shi, "Thermal-Electrical Fusion for Real-Time Condition Monitoring of IGBT Modules in Transportation Systems," *Micromachines*, vol. 17, no. 2, Art. no. 154, Jan. 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/mi17020154>.
18. K. Hasegawa, T. Yamasoto, K. Fujimoto, Y. Oyama, and N. Iida, "Condition Monitoring of a DC-Link Capacitor Using the Instantaneous Output Power of a Propulsion Inverter with One-Pulse Modulation," *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 15, no. 3, pp. 368–374, 2026, doi: <https://doi.org/10.1541/ieejia.20250328>.
19. T. Yokouchi, T. Takashige, and M. Kondo, "Anomaly Detection for Railway Vehicle Equipment Using Condition Monitoring Data," *Quarterly Report of RTRI*, vol. 63, no. 4, pp. 238–243, Nov. 2022, doi: https://doi.org/10.2219/rtriqr.63.4_238.
20. G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015.
21. S. J. Taylor and B. Letham, "Forecasting at Scale," *The American Statistician*, vol. 72, no. 1, pp. 37–45, Jan. 2018, doi: <https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080>.
22. L. Breiman, "Random Forests," *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, Oct. 2001, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
23. F. Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.
24. S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long Short-Term Memory," *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, Nov. 1997, doi: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
25. R. J. Hyndman and A. B. Koehler, "Another look at measures of forecast accuracy," *International Journal of Forecasting*, vol. 22, no. 4, pp. 679–688, Oct. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>.
26. D. Chicco, M. J. Warrens, and G. Jurman, "The Coefficient of Determination R-squared Is More Informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in Regression Analysis Evaluation," *PeerJ Computer Science*, vol. 7, no. 5, p. e623, 2021, doi: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>.

Davran Radjibayev*, Jasur Anarkulov

Tashkent State Transport University

Fault Diagnosis System for Auxiliary Converters in HXD3C Series Electric Locomotives

Abstract. This paper proposes a fault diagnosis system for auxiliary converters (ACUs) in HXD3C-based electric locomotives operating on the railways of Uzbekistan. Auxiliary converter faults are critical because they affect traction motors, cooling systems, compressors, and other auxiliary equipment required for the safe operation of locomotives. Currently, fault investigation in locomotive depots of Uzbekistan mainly relies on visual inspection and manual analysis of large fault logs exported from the Train Control and Monitoring System (TCMS). This process is time-consuming and highly dependent on personnel experience, which may result in important fault patterns being overlooked in historical records downloaded from the TCMS. The proposed system consists of three main components: an ARM-based mini-computer, diagnostic software integrated with a machine learning model for future predictive maintenance applications, and a display unit for presenting and transmitting diagnostic results to maintenance personnel. The proposed approach uses TCMS fault logs and auxiliary converter records as input data. Dedicated software then analyzes the collected data and generates conclusions, visual statistics, and recommendations for possible maintenance actions related to ACU failures.

Keywords: HXD3C; O'Z-EL electric locomotive; auxiliary converter; TCMS; fault diagnosis; railway rolling stock maintenance; LSTM; predictive maintenance readiness.

References

1. Ilončíak, L. Struharnanský, and J. Kuchta, "Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives," *Procedia Engineering*, vol. 192, pp. 359–364, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>.
2. Q. Xu, P. Zhang, W. Liu, Q. Liu, C. Liu, L. Wang, A. Toprac, and S. J. Qin, "A Platform for Fault Diagnosis of High-Speed Train Based on Big Data," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 18, pp. 309–314, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.318>.
3. A. Gozali et al., "Smart Train Control and Monitoring System with Predictive Maintenance and Secure Communications Features," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 31, Art. no. 101409, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101409>.
4. B.-K. Zhang, "Design and Realization of Fault Diagnosis Software for HXD3C Electric Locomotive Power Supply," *Electric Drive for Locomotives*, no. 5, pp. 93–95, 2012.
5. G. Yao-hui, W. Qian, L. Xin, Z. Shi-tao, and G. Hong-guang, "Research on the Safe Operation of HXD3C Locomotive High-Voltage Equipment Based on Sequential Control Optimization," *Electric Drive for Locomotives*, no. 4, 2013.
6. B. Gou, X. Ge, S. Wang, X. Feng, J. B. Kuo, and T. G. Habetler, "An Open-Switch Fault Diagnosis Method for Single-Phase PWM Rectifier Using a Model-Based Approach in High-Speed Railway Electrical Traction Drive System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3816–3826, May 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2465299>.
7. Y. Yu, Y. Song, H. Tao, and J. Hu, "Voltage and Current Sensor Fault Diagnosis Method for Traction Rectifier in High-Speed Trains," *Electronics*, vol. 13, no. 1, Art. no. 197, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics13010197>.

8. Y. Yu, Y. Song, and H. Tao, "Fault Location and Type Identification Method for Current and Voltage Sensors in Traction Rectifiers," *Journal of Power Electronics*, vol. 25, no. 4, pp. 666–674, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s43236-024-00916-z>.
9. H. Dong, F. Chen, Z. Wang, L. Jia, Y. Qin, and J. Man, "An Adaptive Multisensor Fault Diagnosis Method for High-Speed Train Traction Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 6, pp. 6288–6302, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3034190>.
10. Q. Deng, B. Gou, X. Ge, C. Lin, D. Xie, and X. Feng, "A High-Accuracy-Light-AI Data-Driven Diagnosis Method for Open-Circuit Faults in Single-Phase PWM Rectifiers," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 3, pp. 4352–4365, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3238009>.
11. Y. Fu, Y. Ji, G. Meng, W. Chen, and X. Bai, "Three-Phase Inverter Fault Diagnosis Based on an Improved Deep Residual Network," *Electronics*, vol. 12, no. 16, Art. no. 3460, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12163460>.
12. M. Z. Khaneghah, M. Alzayed, and H. Chaoui, "Open Gate, Open Switch and Short Circuit Fault Detection of Three-Phase Inverter Switches in Induction Motor Drive Applications," *Actuators*, vol. 15, no. 1, Art. no. 34, Jan. 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/act15010034>.
13. R. Sharma, "Intelligent Fault Diagnosis in Electric Railway Traction System: A Novel Hybrid Approach," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 21, no. 3, pp. 2421–2439, 2026, doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-026-02608-z>.
14. D. Gonzalez-Jimenez, J. del-Olmo, J. Poza, F. Garramiola, and I. Sarasola, "Machine Learning-Based Fault Detection and Diagnosis of Faulty Power Connections of Induction Machines," *Energies*, vol. 14, no. 16, Art. no. 4886, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14164886>.
15. K. Moulay, I. Merzouk, K. O. M. Touati, A. Hafaifa, and G. Alhussein, "Online IGBT Short-Circuit Fault Diagnosis in Modular Multilevel Converter Based on DWT and RBFNN," *IEEE Access*, vol. 14, pp. 22252–22273, 2026, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3662514>.
16. H.-M. Park, J.-H. Lee, H.-S. Jun, K.-B. Hwang, S.-J. Park, and J.-H. Park, "Reliability Diagnosis and Fault Prediction Technique for Three-Phase Inverters Using Artificial Neural Networks," *IEEE Access*, vol. 14, pp. 4576–4590, 2026, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3650960>.
17. M. Cui, Y. Liu, Z. Hu, and T. Shi, "Thermal-Electrical Fusion for Real-Time Condition Monitoring of IGBT Modules in Transportation Systems," *Micromachines*, vol. 17, no. 2, Art. no. 154, Jan. 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/mi17020154>.
18. K. Hasegawa, T. Yamasoto, K. Fujimoto, Y. Oyama, and N. Iida, "Condition Monitoring of a DC-Link Capacitor Using the Instantaneous Output Power of a Propulsion Inverter with One-Pulse Modulation," *IEEE Journal of Industry Applications*, vol. 15, no. 3, pp. 368–374, 2026, doi: <https://doi.org/10.1541/ieejia.20250328>.
19. T. Yokouchi, T. Takashige, and M. Kondo, "Anomaly Detection for Railway Vehicle Equipment Using Condition Monitoring Data," *Quarterly Report of RTRI*, vol. 63, no. 4, pp. 238–243, Nov. 2022, doi: https://doi.org/10.2219/rtriqr.63.4_238.
20. G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015.
21. S. J. Taylor and B. Letham, "Forecasting at Scale," *The American Statistician*, vol. 72, no. 1, pp. 37–45, Jan. 2018, doi: <https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080>.

22. L. Breiman, "Random Forests," Machine Learning, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, Oct. 2001, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
23. F. Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine Learning in Python," Journal of Machine Learning Research, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.
24. S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long Short-Term Memory," Neural Computation, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, Nov. 1997, doi: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
25. R. J. Hyndman and A. B. Koehler, "Another look at measures of forecast accuracy," International Journal of Forecasting, vol. 22, no. 4, pp. 679–688, Oct. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>.
26. D. Chicco, M. J. Warrens, and G. Jurman, "The Coefficient of Determination R-squared Is More Informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in Regression Analysis Evaluation," PeerJ Computer Science, vol. 7, no. 5, p. e623, 2021, doi: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>.

Информация об авторах

Давран Раджибаев – PhD, ассоциированный профессор, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан.

Ясур Анаркулов – докторант, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан.

Davran Radjibayev – PhD, Associate Professor, Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan.

Jasur Anarkulov – Doctoral Student, Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-211-227>

Методика и оборудование для проведения испытаний образцов сталей в дистиллированной воде высокой температуры и давления

**Х.А. Абшенов  , Б.Р. Арапов  *, К.К. Сейтказенова  ,
В.Н. Печерский  , Б.Б. Жайлыбек **

Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова Шымкент, Казахстан

E mail:hasen8585@mail.ru, b.arapov@rambler.ru, kseitkazi@mail.ru, vn-pecherskiy@mail.ru, . bakdaulet.zhailybek@mail.ru

Аннотация. В статье описывается конструкция разработанного и изготовленного испытательного стенда, который состоит из непосредственно испытательной камеры и вспомогательного оборудования, включающего насос высокого давления, ресивер, баллон со сжатым инертным газом и соединительные трубопроводы. Стенд обеспечивает проведение испытаний образцов сталей в дистиллированной воде высокой температуры и давления на статическое деформирование с различными скоростями растяжения, а также на циклическое малоцикловое симметричное нагружение. Отличительной особенностью стенда является возможность проведения испытаний образцов сталей с высокой точностью определения их статических механических характеристик и циклической прочности. В испытательной камере реализовано точное определение прикладываемого усилия к испытуемому образцу, находящемуся в воде высокой температуры, и измерение его деформаций косвенными методами с использованием предварительно построенных тарировочных графиков. С помощью данного стенда проведены испытания образцов стали 10ГН2МФА на статическое растяжение в воздухе и в дистиллированной воде при температуре 280 °С. Полученные результаты показали, что прочность стали практически не изменяется, тогда как ее пластические свойства снижаются, что необходимо учитывать при оценке надежности элементов энергетического оборудования.

Ключевые слова: разработка, испытательный стенд, испытание, коррозионная среда, прочность, пластичность, АЭС.

Received 09.10.2025. Revised 18.05.2026. Accepted 02.06.2026. Available online 30.03.20265.

* the correspondence author

Введение

Свойства материала, характеризующие его сопротивление коррозионному разрушению, трещиностойкость и длительную прочность, в такой коррозионной среде, как реакторная вода, достоверно могут быть определены только экспериментальным путем. При этом испытания образцов сталей должны быть проведены в условиях, идентичных соответствующим условиям эксплуатации элементов конструкций. Особенно это важно в случае, когда принятый расчетный эксплуатационный срок службы непрерывной работы оборудования составляет порядка 50 лет и выше. Такие эксплуатационные условия, как наличие воздействия высокой температуры и давления рабочей среды, характерны несущим элементам оборудования энергетических установок.

Основные элементы корпусов атомных реакторов, трубопроводов, парогенераторов, паропроводов, несущие элементы тепловых котлов испытывают воздействие окружающей среды, статических, циклических, термомеханических нагрузок, вследствие чего подвергаются коррозионно-механическому разрушению [1, 2, 3].

Одним из наиболее важных факторов, угрожающих безопасной эксплуатации атомных электростанций является коррозионное растрескивание под напряжением (SCC) в легководяных реакторах.

Коррозионное растрескивание под напряжением является причиной значительных сбоев в обслуживании, оно может возникать в области концевых деталей ТВЭЛов, в системах трубопроводов с теплоносителями, в местах сопряжения трубопроводов с корпусом реактора, в сварных соединениях, это очень сложный механизм разрушения, поэтому его прогнозирование является непростой задачей.

Для возникновения коррозии под напряжением должны присутствовать три обязательных фактора: растягивающее напряжение, окружающая среда и восприимчивый материал. Если внести изменения в любой из этих факторов, то восприимчивость к SCC часто может быть устранена или снижена. Растягивающее напряжение может быть вызвано остаточными напряжениями, эксплуатационными нагрузками, структурными и металлургическими факторами, такими как размер зерна, термическая обработка, холодная обработка и, наконец, факторами окружающей среды, которые зависят от химического состава воды и рабочей температуры [4].

Однако этот тип разрушения является внезапным, и его трудно предсказать, а также свойства материала могут изменяться со временем или в результате обработки. Поэтому правильный способ прогнозирования и моделирования SCC по-прежнему является важной областью исследований. К настоящему времени известны несколько типов механизмов коррозионного растрескивания под напряжением:

- Механизм растворения при разрыве пленки [5].
- Теория расширенной подвижности поверхности [6].
- Модель разрушения в сопряженной среде [7].
- Модель внутреннего окисления [8, 9].
- Механизм на основе водорода.

Механизм растворения/разрыва пленки. Данный механизм разработали Ford и Andersen. Они предложили механизм коррозионного растрескивания под напряжением и соответствующие модели скорости роста трещин. Модель была разработана в основном для нержавеющей сталей и предполагает, что основными этапами механизма SCC являются образование пленки, разрыв пленки, удаление материала и последующая повторная пассивация пленки. Все эти процессы зависят от скорости деформации вершины трещины,

плотности окисления заряда и коэффициентов интенсивности напряжений. Модель раскрывает механизм зарождения и распространения трещин в различных слоях материалов с помощью метода конечных элементов, основанного на механике разрушения.

Теория расширенной поверхностной подвижности. Механизм коррозионного растрескивания под напряжением с поверхностной подвижностью разработан недавно, и одним из его наиболее многообещающих свойств является то, что он позволяет прогнозировать скорости растрескивания при любой температуре, если известно значение при данной температуре. Основная особенность этого механизма заключается в том, что атомы перемещаются от вершины трещины с высоким напряжением к менее напряженным сторонам. Модель была разработана Galvele, он считал, что окислительные токи на вершине трещины не объясняют высокую скорость роста трещины. В основе этой модели лежит механизм охрупчивания, и он также может быть использован для характеристики водородного охрупчивания [6].

Модель разрушения в сопряженной среде. Модель была разработана Макдональдом и Уркиди-Макдональдом [7]. Она учитывает влияние концентрации кислорода, скорости потока и электропроводности внешней среды, а также влияние напряжений на рост трещин. Модель пытается связать две среды распространения трещин и предполагает следующее:

- с увеличением интенсивности напряжения потенциал на кончике трещины увеличивается, однако в устье трещины это не отражается;
- в случае концентрации кислорода ситуация обратная, влияние только на устье трещины;
- pH и температура не влияют на скорость роста трещины; они влияют на разность потенциалов между вершиной трещины и внешней окружающей средой.

Модель позволит провести количественный прогноз влияния концентрации водорода, предела текучести, коэффициента интенсивности напряжений и температуры на рост трещин [10].

Модель внутреннего окисления. Модель внутреннего окисления, разработанная П. М.Скоттом и М. Ле Кальваром, выражает собой гипотезу, что растрескивание вызвано явлением внутреннего окисления. Это показано на примере никелевых сплавов, широко используемых в ядерных реакторах с водой под давлением (PWR). Модель основана на механизме охрупчивания, вызванном образованием слоя адсорбированных атомов кислорода, который взаимодействует с выделениями на границах зерен материала и их дислокациями, что также зависит от коэффициента диффузии кислорода в материале. Этот механизм также может привести к образованию пузырьков газа под высоким давлением, которые усиливают развитие межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением.

Механизм на основе водорода. В процессе эксплуатации реактора материалы могут поглощать водород из теплоносителя или в результате коррозии. Водород диффундирует в области с наименьшими температурами и наибольшими растягивающими напряжениями. Это может приводить к образованию локальных хрупких зон с повышенным содержанием водорода. При этом механизме происходит адсорбция водорода на металле в вершине трещины при нейтральном значении pH, что приводит к водородному охрупчиванию. Часть выделяющихся атомов водорода не соединяется в молекулы, а проникает в металл, вызывая наводороживание и водородную хрупкость, а также рост зёрен. Водород снижает пластичность и прочность материалов, что может

привести к их преждевременному разрушению.

Определение реальных прочностных характеристик сталей экспериментальным путем в условиях, идентичных эксплуатационным условиям работы оборудования энергетических установок, является сложной задачей. Это связано с необходимостью разработки и изготовления соответствующего испытательного оборудования и методики проведения длительных экспериментов. Определение точного значения прикладываемого усилия на образец, который находится в камере с коррозионной средой, а измерение его деформации происходит непрерывно в ходе проведения испытания, вызывает определенную сложность при проведении эксперимента в реакторной воде, имеющей температуру до 300 °С и давление до 15 МПа [11, 12].

Выполнение инженерных расчетов на прочность высоконагруженных элементов конструкций энергетических установок в таких условиях должно базироваться на следующих научно-обоснованных и достоверных данных [13, 14, 15]:

- характер эксплуатационной загруженности оборудования;
- достоверно определенное напряженно-деформированное состояние несущих элементов конструкций;
- нормированные расчетные модели.

Методология

В связи с вышеуказанными особенностями авторами разработан испытательный стенд, позволяющий экспериментально определять фактические характеристики прочности сталей, рисунок 1. В разработанном стенде точное значение прикладываемого усилия к образцу, испытываемому в камере внешнее воздействие, измеряется механическим тензометром с индуктивным датчиком перемещения. Измерительные ножки тензометра устанавливаются во внутренней полости силового штока так, чтобы база измерения перемещения находилась между испытываемым образцом и зоной сальниковых уплотнений силового штока и полностью располагалась во внутренней полости камеры.

Такое расположение базы измерения позволяет исключить неконтролируемые погрешности, возникающие за счет сил трения силового штока в сальниковых уплотнениях.

При этом измерение величины усилия, прикладываемого к испытываемому образцу, осуществляется по значению деформации утоненной части силового штока на базе измерения, заключающегося между дном отверстия и буртика внутри отверстия штока, расположенного на расстоянии 20 мм от дна отверстия. Измерительные ножки механического тензометра, одна из которых представляет собой подвижную штангу диаметром $d = 3$ мм и упирается на дно отверстия, и вторая - одновременно является корпусом тензометра, упирается на буртике внутри отверстия в штоке. Таким образом, образуется база измерения деформации длиной 20 мм.

При приложении усилия к силовому штоку за счет деформации материала штока на базе измерения происходит перемещение подвижной штанги относительно корпуса тензометра, на конце которого устанавливается корпус индуктивного датчика перемещения.

Перемещение подвижной штанги тензометра, второй конец которого жестко связан с ферромагнитным сердечником, находящимся во внутренней полости на уровне катушек индуктивного датчика, приводит к появлению в выходной цепи датчика электрического

напряжения, величина которого изменяется пропорционально величине перемещения ферромагнитного сердечника.

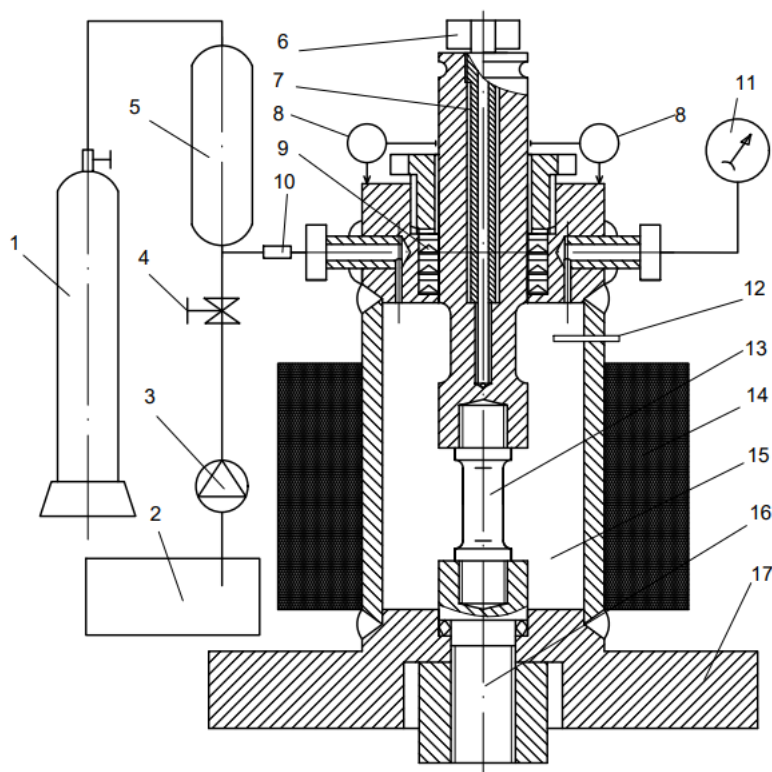


Рисунок 1. Стенд с камерой для проведения испытаний образцов сталей в дистиллированной воде высокой температуры и давления

1 – баллон со сжатым газом (аргон); 2 – емкость с дистиллированной водой; 3 – плунжерный насос высокого давления; 4 – вентиль; 5 – ресивер; 6 – индуктивный датчик перемещения; 7 – силоизмеритель; 8 – индикатор часового типа; 9 – сальниковое уплотнение силового штока; 10 – обратный клапан; 11 – манометр; 12 – датчик температуры; 13 – испытуемый образец; 14 – электрический нагреватель; 15 – полость камеры; 16 – неподвижный захват; 17 – основание камеры

Перевод величин электрических сигналов, исходящих из индуктивного датчика, измеряемых в милливольтках в значения сил, измеряемых в кН, производится с помощью тарировочного графика силы, показанного на рисунке 2. Данный график построен с использованием той же камеры в среде воздуха, при снятых уплотнительных сальниках и при температуре в камере, соответствующей проведению предстоящего испытания в дистиллированной воде.

При построении тарировочного графика силы значение приложенной нагрузки, создаваемой испытательной машиной на силовом штоке, задавалось пошагово и измерялось при помощи образцового динамометра ДОСМ-3, при этом одновременно

измерялось напряжение, выдаваемое индуктивным датчиком, соответствующее каждому значению приложенной силы с использованием милливольтметра КСП-4. В результате получен тарировочный график силы, показанный на рисунке 2. Как видно из графика, зависимость между приложенной к силовому штоку силой и показаниями индуктивного датчика в пределах измеренного диапазона усилия оказалась строго линейной.

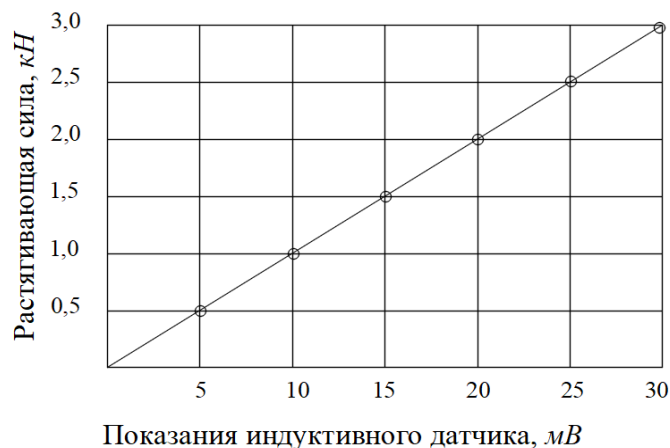


Рисунок 2. Тарировочный график зависимости сигнала индуктивного датчика от осевой силы, приложенной к силовому штоку

Прямое измерение деформации испытуемого образца с его рабочей части (на базе измерения), находящегося в высокотемпературной воде в камере с использованием существующих методов, представляется невозможным.

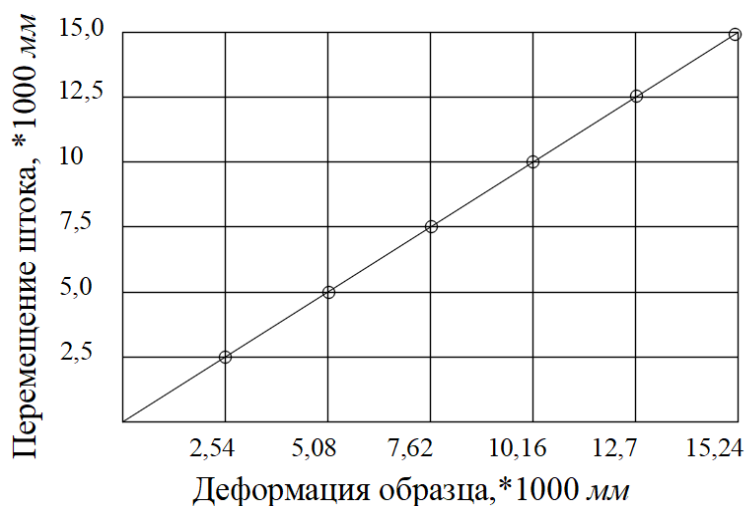


Рисунок 3. Тарировочный график деформации испытуемого образца

Поэтому был использован косвенный метод измерения, основанный на построении тарировочного графика деформации образца, связывающего перемещение силового штока относительно корпуса камеры с истинной деформацией испытуемого образца. Данный тарировочный график так же, как в первом случае, строился на воздухе в той же камере при нормальной температуре путем пошагового перемещения силового штока и

соответствующего измерения показаний деформометра, тензометрические датчики которого были наклеены на рабочую поверхность испытуемого образца. Перемещение силового штока измерялось и задавалось индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм, установленными на штангах, расположенных на диаметрально противоположных сторонах от оси штока, и жестко закрепленными к силовому штоку. Полученный таким методом тарировочный график деформации образца показан на рисунке 3.

Устройство испытательного стенда. Испытательный стенд состоит из двух основных узлов – узла системы, обеспечивающей заданные параметры дистиллированной воды в камере по температуре и давлению, и узла камеры, в которой создается высокое давление и необходимая высокая температура.

Основным узлом стенда является камера высокого давления, предназначенная для заполнения дистиллированной водой и установления испытуемого образца, обеспечивающая высокие температуры и давление среды. Камера высокого давления (рисунок 1) состоит из основания 17, полости 15, образованной цилиндрической обечайкой, закрытой снизу основанием камеры, а сверху крышкой, в центральном отверстии которой выполнена цилиндрическая полость, предназначенная для размещения сальниковых уплотнений 9. С боковых сторон крышки камеры ввинчены штуцера, предназначенные для соединения питающей трубы и манометра. Через центральное отверстие в крышке камеры вводится силовой шток, имеющий внутреннее продольное, глухое снизу отверстие, предназначенное для установки механического тензометра 6. На верхнем конце механический тензометр снабжен индуктивным датчиком перемещения 5.

Силовой шток нижним концом при помощи резьбового соединения взаимодействует с испытуемым образцом 13, а на некотором расстоянии от места крепления образца шток имеет утоненное сечение длиной равной базе измерения механического тензометра. Другой конец испытуемого образца с помощью резьбового соединения соединяется с неподвижным захватом 16. Такой надежно соединенный силовой шток собирается вне камеры и при ослабленном сальниковом уплотнении вставляется в центральное отверстие крышки камеры до соприкосновения буртика неподвижного захвата с ромбическим металлическим кольцом уплотнения. Затем затягивается гайка неподвижной опоры и прижимная втулка сальниковых уплотнений, что обеспечивает герметичность полости камеры. После этого устанавливается механический тензометр с индуктивным датчиком перемещения во внутреннюю полость силового штока, ввинчиванием корпуса тензометра в резьбовое гнездо силового штока до упора корпуса тензометра в буртик, имеющийся в отверстии штока.

В отверстие корпуса тензометра свободно вставляется подвижная ножка тензометра в виде тонкого стержня с ферромагнитным наконечником на конце, который под действием собственного веса упирается на глухое дно осевого отверстия силового штока. Установка показания индуктивного датчика в исходное нулевое положение обеспечивается осевым перемещением катушек индуктивного датчика и вращением его корпуса относительно корпуса тензометра, между которым имеется резьбовая связь.

В состав второго узла испытательного стенда – системы обеспечения необходимых параметров входят: баллон со сжатым газом (аргон) 1, ресивер 5, плунжерный насос высокого давления 3, вентиль высокого давления 4, обратный клапан 10, емкость для запаса дистиллированной воды 2 и электрический нагреватель 14, охватывающий

наружную цилиндрическую поверхность обечайки камеры. Задачей этого узла стенда является создание высокой температуры воды до значения 300 °С, давления в камере до 15 МПа и поддержание их постоянными в течение всего эксперимента. Нужное значение температуры воды в камере поддерживается путем периодического автоматического отключения и включения электронагревателя от питания. Заданное высокое давление среды после остановки плунжерного насоса 3 и закрытия вентиля высокого давления 4, поддерживается подключенными в систему ресивером 5 и баллоном со сжатым газом 1.

Экспериментальная часть

Методика проведения испытаний образцов сталей с низкими скоростями деформирования растяжением в среде высокотемпературной дистиллированной воды

Для проведения испытаний изготавливались образцы из стали 10ГН2МФА, форма и размеры которых показаны на рисунке 4. На каждую точку было испытано по три образца, ГОСТ 1497-2023.

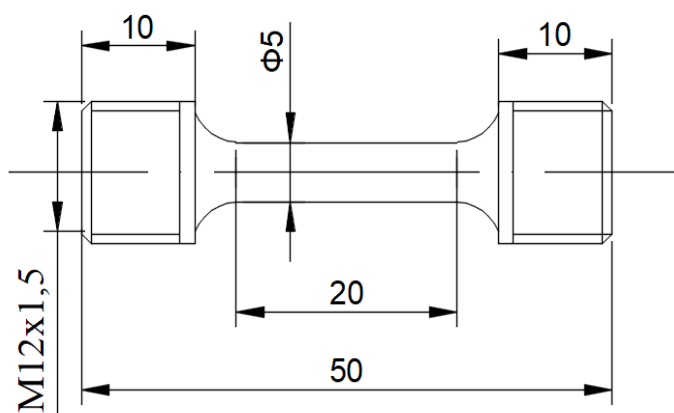


Рисунок 4. Образец для испытаний на растяжение

В камеру, установленную в испытательную машину через сальниковые уплотнения в крышке, вводится силовой шток с закрепленным в нем испытуемым образцом и неподвижным захватом на конце, затем затягиваются гайка неподвижного захвата и болты прижимной втулки сальниковых уплотнений. После полной сборки камеры при помощи плунжерного насоса высокого давления, дистиллированная вода подается в камеру с образцом и в ресивер. По мере повышения давления в камере воздух в ресивере сжимается и по достижении необходимого давления (в эксперименте до 15 МПа) вентиль 4 закрывается и насос 3 останавливается. В камере образуется замкнутое пространство, ограниченное металлическим кольцевым уплотнением неподвижного захвата, и сальниковым уплотнением, расположенным вокруг силового штока. Металлическое кольцевое уплотнение неподвижного захвата, изготовленное из нержавеющей стали, имеет ромбическую форму сечения, располагается между буртиком неподвижного захвата и корпусом камеры, обеспечивая его герметичность.

Сжатые газы в баллоне и в ресивере непрерывно поддерживают необходимое давление воды в камере. В случае снижения давления в камере включается насос и происходит подача воды в камеру. После проверки герметичности камеры включается нагреватель. По достижении необходимой температуры и давления включается испытательная машина, и силовой шток камеры растягивает испытуемый образец с соответствующей заданной

скоростью деформирования, принятой программой испытания.

В ходе проведения испытаний до разрушения образца периодически записываются величина усилия и соответствующее ему удлинение образца, по которым строится диаграмма растяжения. После разрушения образца измеряются удлинение рабочей его части l_1 и диаметр в месте разрушения на уровне образовавшейся «шейки», рассчитываются стандартные характеристики прочности и пластичности (σ_B - временное сопротивление, σ_T - предел текучести, ψ - относительное сужение, δ - относительное удлинение после разрыва).



Рисунок 5. Диаграмма растяжения образцов стали 10ГН2МФА на воздухе и в дистиллированной воде при температуре 280 °С и скорости

деформирования $\varepsilon = 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$

1 – Испытание на воздухе

2 – Испытание в дистиллированной воде

Были проведены металлографические исследования поверхности на поперечных и продольных шлифах образцов после их испытания.

На рисунке 5 показана диаграмма растяжения стали 10ГН2МФА, построенная по точкам измерений, полученных в ходе испытания образца. Испытания проведены на воздухе и в дистиллированной воде при температуре 280 °С и давлении 15 МПа. Из-за технической сложности проведения испытаний в вышеуказанных параметрах среды с низкой скоростью деформирования $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ испытание одного образца продолжается около 3,5 суток, а при этом $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ продолжительность составит уже 36 суток, кроме того требуется непрерывное поддержание заданного параметра среды и обеспечение круглосуточного наблюдения с организацией дежурства исполнителей) поэтому эксперименту были подвергнуты шесть образцов по три на воздухе и в указанной среде.

Экспериментальные точки, показанные на рисунке 5, являются средними значениями деформаций, полученных на каждом уровне приложенных напряжений по испытаниям трех образцов. Диаграммы растяжения для каждой тройки испытаний оказались практически идентичными, что является основанием считать полученные результаты

достоверными.

Предварительно проведенные испытания образцов стали позволили отработать разработанную нами методику проведения экспериментальных исследований по определению истинных характеристик механических свойств стали в условиях, соответствующих эксплуатационным условиям работы парогенератора АЭС. Разработанное оборудование и измерительные инструменты дали возможность с высокой точностью измерять усилия, прикладываемые на образец в камере и его деформацию. Результаты испытаний образцов стали 10ГН2МФА на статическое растяжение с низкими скоростями деформирования при температуре 280 °С

Осевое растяжение образца при длине рабочей части испытуемого образца (база измерения деформации) $l_0=20\text{мм}$ проводили со скоростью деформирования $\varepsilon=0,9\cdot 10^{-5}\text{с}^{-1}$. Для обеспечения такой скорости деформирования образца скорость растяжения, то есть скорость движения активного захвата машины, рассчитывалась следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{V}{l_0}; \text{ откуда } V = \varepsilon \cdot l_0 = 0,9 \cdot 10^{-5} \cdot 60 \cdot 20 \approx 0,011 \text{ мм/мин.},$$

где: ε – скорость деформирования,

V – скорость движения активного захвата машины,

l_0 – рабочая длина испытуемого образца

Таким образом, скорость перемещения силового штока должна равняться $V=0,011 \text{ мм/мин.}$

Для сравнительного анализа полученных результатов испытания образцов проведены как на воздухе, так и в дистиллированной воде. Полученные результаты испытаний в виде диаграмм зависимостей относительной осевой деформаций образца от приложенного растягивающего напряжения показаны на рисунке 5. Как видно из рисунка 5, дистиллированная вода оказывает существенное влияние в указанных условиях на деформационную способность стали. Пластичность стали в виде относительной продольной деформации значительно снижается, при этом предел прочности остается одинаковым как на воздухе, так и в дистиллированной воде.

Для анализа деформаций и напряжений в упругопластической области широкое применение получила степенная аппроксимация диаграммы деформирования в виде зависимости [16]:

$$\sigma = \sigma_m \left(\frac{e}{e_m} \right)^m,$$

где: e - продольная относительная деформация;

e_T - продольная относительная деформация, соответствующая пределу текучести материала;

m - характеристика упрочнения материала в упругопластической области.

Для стали при $E=2\cdot 10^5 \text{ МПа}$ и $\sigma_m \leq \sigma \leq \sigma_{\sigma}$, то есть на восходящем участке диаграммы деформирования, показатель упрочнения определяется следующим образом.

$$m = 0,75m^*$$

$$\text{где: } m^* = \frac{\lg \left[\frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma_{0,2}} (1 + 1,4\Psi_K) \right]}{\lg \left[\left(10^5 \ln \frac{1}{1 - \Psi_K} \right) / (200 + 0,5\sigma_{0,2}) \right]} = 0,126, \text{ тогда } m = 0,75 \cdot 0,126 = 0,095.$$

$$- \sigma_{\sigma} = 520 \text{ МПа}, \sigma_{0,2} = 410 \text{ МПа}, \sigma_m = 371 \text{ МПа}, \Psi_K = 78\%. e_m = 0,001855.$$

Результаты, полученные в данной работе, хорошо коррелируют с результатами,

полученными в работе [17] при испытании этой же стали. В работе [18] показано, что в диапазоне скоростей деформации от 10^{-7} с^{-1} до 10^{-6} с^{-1} в высокотемпературной воде наблюдается наибольшее снижение коэффициента сужения поперечного сечения. Снижение пластичности стали показано на рисунке 6, кривая 3.

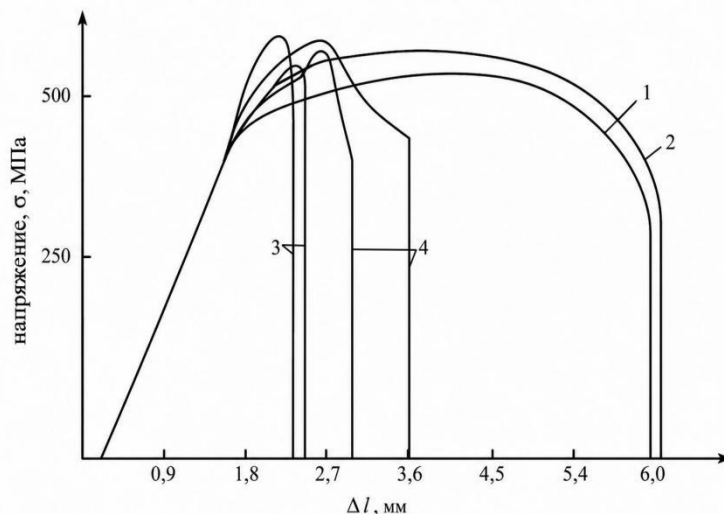


Рисунок 6. Диаграммы деформации стали 10ГН2МФА при испытании на склонность к коррозионному растрескиванию в воде высоких параметров: 1 – воздух, 280°C , $\varepsilon = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; 2 – бидистиллят, 280°C , $\varepsilon = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; 3 – бидистиллят, 280°C , $\varepsilon = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$; 4 – бидистиллят, 230°C , $\varepsilon = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ [19].

В работе [19] показано, что на поверхности корпуса холодного коллектора, находящегося под воздействием воды, температура которой $260^\circ\text{C} - 280^\circ\text{C}$ образуются трещины коррозионно-механического растрескивания. Это свидетельствует о склонности этой стали к охрупчиванию под воздействием окружающей среды. Отмечено, что в указанном диапазоне температур пластичность стали снижается в 8-10 раз.

Результаты и обсуждение

С целью осуществления экспериментальных испытаний сталей в среде эксплуатационных параметров и получения истинных характеристик механических свойств при воздействии коррозионных жидких сред, разработан лабораторный стенд с камерой высокого давления; установка позволяет проводить испытания на растяжение и обеспечивает точность измерения усилий и деформации испытываемого образца стали, находящегося в камере со средой.

Проведены испытания и получены экспериментальные данные, которые показали, что дистиллированная вода с температурой 280°C при скорости деформирования $\varepsilon = 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ снижает относительную продольную деформацию, определенную по моменту разрушения испытываемого образца по сравнению с ее значением, полученным по результатам испытания на воздухе при той же температуре и скорости деформирования. Это снижение составило 50% по сравнению с данными, полученными на воздухе. Предел прочности при

этом в условиях осевого растяжения со скоростью деформирования $\varepsilon=0,9 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$ не изменился. Несмотря на столь низкую скорость деформирования, продолжительность времени нахождения образца, длиной рабочей части 20 мм, до разрушения в дистиллированной воде составила 2,93 часа, что было недостаточно для проявления отрицательного влияния среды на прочность стали.

Защитная магнетитовая пленка, образующаяся на поверхности стали, находящейся под действием воды высоких температур, в ходе деформации образца с низкой скоростью периодически растрескивается и восстанавливается. Вследствие этого образуется шероховатость поверхности, растрескивается поверхностный слой испытуемого образца от растягивающей деформации, развивается процесс разрыхления поверхностного слоя за счет образования и развития микроскопических коррозионных трещин, что и приводит к охрупчиванию стали. Таким образом, интенсивность разрушения стали от коррозионного воздействия окружающей среды зависит от степени нарушения сплошности поверхностного защитного слоя магнетитовой пленки.

Результаты экспериментальных исследований, изложенные в работе [20] подтверждают образование коррозионно-механической трещины на «холодном» коллекторе парогенератора. На основе полученных результатов сделано заключение о механизме коррозионно-механического растрескивания, которое заключается в разрушении поверхностной пленки за счет деформации, происходящей с низкой скоростью при воздействии коррозионной среды. Трещины были обнаружены только на «холодном» коллекторе, где температура материала составляет около 280 °С, а на «горячем» коллекторе, где температура материала составляет 320 °С, трещин не обнаружено. Из сказанного следует, что основными факторами снижения пластичности стали в этих условиях, являются определенные сочетания температуры и скорости деформирования, приводящие к охрупчиванию и растрескиванию металла.

Заключение

1. Разработанный и изготовленный авторами испытательный стенд показал высокую надежность при проведении испытаний образцов стали в высокотемпературной дистиллированной воде, непрерывно обеспечивая необходимые параметры среды за все время проведения испытания.

2. Разработанная схема измерения усилия, прикладываемого к испытуемому образцу, и деформации образца, находящегося под воздействием внешней среды, с использованием косвенных методов с построением тарировочных графиков позволила повысить точность определения напряжения и деформации образца в ходе испытания.

3. Получены первые экспериментальные результаты испытания образцов стали 10ГН2МФА растяжением с низкими постоянными скоростями деформирования, как на воздухе, так и в дистиллированной воде.

4. Результаты первых испытаний показали, что коррозионная среда в виде воды высоких температур и давления существенно снижает пластические свойства стали, тогда как прочность ее остается неизменной по сравнению с данными, полученными на воздухе.

5. Полученные результаты и диаграммы растяжения образцов стали 10ГН2МФА в коррозионной среде и сопоставление их с данными других исследователей, позволяют сделать вывод о том, что низкие скорости деформирования стали в этой же среде являются одними из основных факторов ее охрупчивания и потери пластичности. Следовательно,

рекомендуется такой режим работы в процессе эксплуатации парогенератора, при котором сочетание высокой температуры и скорости деформирования не приводит к охрупчиванию материала его корпуса.

Благодарности/Источник финансирования

Исследование проводилось в Научно-исследовательской лаборатории “Проблемы машиностроения” в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP26199289 Разработка методики инженерного расчета элементов атомных и тепловых энергетических установок, подвергающихся воздействию механических напряжений и коррозионной среды, высокой температуры).

Вклад авторов

Абшенов Х.А. – постановка научной задачи, координация совместной работы авторского коллектива, разработка концепции исследования и общей методологии проведения испытаний, научное руководство работой, анализ и интерпретация полученных результатов, подготовка и редактирование рукописи статьи.

Арапов Б.Р. – разработка конструкции испытательного стенда, расчёт и проектирование испытательной камеры и силовых элементов, выбор схемы измерения усилий и деформаций, участие в подготовке технической документации, редактирование текста статьи, формирование научной интерпретации результатов.

Сейтказенова К.К. – обработка и статистический анализ экспериментальных результатов, построение зависимостей механических характеристик, подготовка графиков и таблиц, оформление аннотации и основной части статьи, подготовка статьи к публикации.

Печерский В.Н. – проведение экспериментальных испытаний образцов стали 10ГН2МФА на статическое растяжение и малоцикловое нагружение в воздухе и в высокотемпературной воде, построение тарировочных графиков, измерение усилий и деформаций, обработка первичных экспериментальных данных, участие в обсуждении результатов и формулировании инженерных рекомендаций.

Жайлыбек Б.Б. – изготовление, сборка и наладка испытательного стенда, монтаж вспомогательного оборудования (насос высокого давления, ресивер, газовая система, трубопроводы), проведение пуско-наладочных работ и обеспечение работоспособности установки.

Список литературы

1. Vilensky O.Yu., Dushev S.A., Shimin D.A. Models of material deformation under dynamic loading applied to various structural elements. // Atomic Energy. – 2025. – С. 231–235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01250-8>.
2. Kulakov G.V., Konovalov Yu.V., Savchenko A.M. Corrosion of E110 alloy fuel rod claddings in reactors of nuclear icebreakers and small nuclear power plants. // Atomic Energy. – 2025. – С. 35–39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01223-x>.
3. Smirnova L.S., Korolev S.A. Critical factors of an integrated approach to the economics of small modular reactors. // Atomic Energy. – 2025. – С. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01171-6>.
4. International Atomic Energy Agency. Stress corrosion cracking in light water reactors: good practices and lessons learned. Vienna: IAEA, 2011. – С. 1–15.

5. Andersen P.L., Ford F.P. Life prediction by mechanistic modeling and monitoring of environmental cracking of iron and nickel alloys in aqueous systems. // *Materials Science and Engineering A*. – 1988. – Vol. 103. – C. 167–184.
6. Galvele J.R. Application of the surface mobility stress corrosion cracking mechanism to nuclear materials. // *Journal of Nuclear Materials*. – 1996. – Vol. 229. – C. 139–148.
7. Macdonald D.D., Urquidi-Macdonald M. A coupled environment model for stress corrosion cracking in sensitized type 304 stainless steel in LWR environments. // *Corrosion Science*. – 1991. – Vol. 32. – C. 51–81.
8. Scott P.M., Le Calvar M. Some possible mechanisms of intergranular stress corrosion cracking of alloy 600 in PWR primary water. // *Proceedings of the 6th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*. – 1993. – C. –657.
9. Guellouh N., Sisodia R.P.S., Szamosi Z. Weldability of high-strength steels. // *Multiscience XXXII International Multidisciplinary Scientific Conference MicroCAD*. – Мишкольц, 2018. – C. 1–8.
10. Scott P.M. An overview of internal oxidation as a possible explanation of intergranular stress corrosion cracking of alloy 600 in PWRs. // *Proceedings of the 9th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*. – 2013. – C. 3–15. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118787618>.
11. Ortner S. Review of requirements for structural materials and their selection for nuclear power plants. // *Frontiers in Nuclear Engineering*. – 2023. – C. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1253974>.
12. Арапов Б.Р. О математической модели механического разрушения высокопрочной котельной стали 10ГН2МФА в воде высоких параметров // *Наука и образование ЮК*. – 1996. – С. 152–158.
13. ГОСТ Р 59115.3–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (кратковременные механические свойства конструкционных материалов). – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 12 с.
14. ГОСТ Р 59115.4–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (длительные механические свойства конструкционных материалов). – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 17 с.
15. ГОСТ Р 59115.5–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (расчетные характеристики циклической прочности конструкционных материалов). – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 22 с.
16. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
17. Tukur H., Yonghao L. Behavior of 308L weld overlay and its corrosion in nuclear power plants. // *Int. J. Electrochem. Sci*. – 2020. – C. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.20964/2020.01.67>.
18. Казанцев А.Г., Зубченко А.С., Харина И.Л., Григорьев В.А., Жуков Р.Ю., Петрова О.Ю. Прогнозирование склонности стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию в высокотемпературной воде // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. –

2009. – № 1. – С. 58–64.

19. Лкаевич Б.И., Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г., Давиденко С.Е. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – С. 376–391.
20. Korol O.A., Degaev E.N., Sabitov L.S., Ayzatullin M.M., Kiyamova L.I. Effect of temperature difference on bending of external panel walls. *Construction Materials and Products*, 2024, Vol. 7, No. 3, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-3-6>.

Kh.A. Abshenov, B.R. Arapov*, K.K. Seitzkazenova, V.N. Pecherskiy, B.B. Zhailybek

M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

Methods and equipment for testing steel samples in distilled water at high temperature and pressure

Abstract. This paper describes the design of a developed and manufactured experimental test bench consisting of a test chamber and auxiliary equipment, including a high-pressure pump, receiver, compressed inert gas cylinder, and connecting pipelines. The test bench enables testing of steel specimens in distilled water under high temperature and pressure conditions for static deformation at various strain rates, as well as for low-cycle symmetric loading. A distinctive feature of the test bench is the ability to determine static mechanical properties and cyclic strength of steel specimens with high accuracy. The test chamber provides precise measurement of the force applied to the specimen in a high-temperature water environment, while deformation is measured indirectly using previously obtained calibration curves. The applied force is determined using an inductive displacement sensor of a mechanical extensometer installed inside the loading rod. Using this test bench, tensile tests of 10GN2MFA steel specimens were carried out in air and in distilled water at a temperature of 280 °C. The results showed that the strength of the steel remains unchanged, whereas its plastic properties decrease.

Keywords: development, test bench, testing, corrosive environment, strength, ductility, nuclear power plant.

References

1. Vilensky O.Yu., Dushev S.A., Shimin D.A. Models of material deformation under dynamic loading applied to various structural elements. *Atomic Energy*, 2025, pp. 231-235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01250-8>.
2. Kulakov G.V., Konovalov Yu.V., Savchenko A.M. Corrosion of E110 alloy fuel rod claddings in reactors of nuclear icebreakers and small nuclear power plants. *Atomic Energy*, 2025, pp. 35-39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01223-x>.
3. Smirnova L.S., Korolev S.A. Critical factors of an integrated approach to the economics of small modular reactors. *Atomic Energy*, 2025, pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01171-6>.
4. International Atomic Energy Agency. Stress corrosion cracking in light water reactors: good practices and lessons learned. Vienna: IAEA, 2011, pp. 1-15.
5. Andersen P.L., Ford F.P. Life prediction by mechanistic modeling and monitoring of

- environmental cracking of iron and nickel alloys in aqueous systems. *Materials Science and Engineering A*, 1988, Vol. 103, pp. 167-184.
6. Galvele J.R. Application of the surface mobility stress corrosion cracking mechanism to nuclear materials. *Journal of Nuclear Materials*, 1996, Vol. 229, pp. 139-148.
 7. Macdonald D.D., Urquidi-Macdonald M. A coupled environment model for stress corrosion cracking in sensitized type 304 stainless steel in LWR environments. *Corrosion Science*, 1991, Vol. 32, pp. 51-81.
 8. Scott P.M., Le Calvar M. Some possible mechanisms of intergranular stress corrosion cracking of alloy 600 in PWR primary water. *Proceedings of the 6th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, 1993, p. 657.
 9. Guellouh N., Sisodia R.P.S., Szamosi Z. Weldability of high-strength steels. *Multiscience XXXII International Multidisciplinary Scientific Conference MicroCAD*, Miskolc, 2018, pp. 1-8.
 10. Scott P.M. An overview of internal oxidation as a possible explanation of intergranular stress corrosion cracking of alloy 600 in PWRs. *Proceedings of the 9th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, 2013, pp. 3-15. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118787618>.
 11. Ortner S. Review of requirements for structural materials and their selection for nuclear power plants. *Frontiers in Nuclear Engineering*, 2023, pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1253974>.
 12. Arapov B.R. On a mathematical model of mechanical fracture of high-strength boiler steel 10GN2MFA in high-parameter water. *Science and Education of South Kazakhstan*, 1996, pp. 152-158.
 13. GOST R 59115.3–2021. Strength justification of equipment and pipelines of nuclear power installations (short-term mechanical properties of structural materials). Moscow, 2021, 12 p.
 14. GOST R 59115.4–2021. Strength justification of equipment and pipelines of nuclear power installations (long-term mechanical properties of structural materials). Moscow, 2021, 17 p.
 15. GOST R 59115.5–2021. Strength justification of equipment and pipelines of nuclear power installations (cyclic strength characteristics of structural materials). Moscow, 2021, 22 p.
 16. Makhutov N.A. Deformation criteria of fracture and strength analysis of structural elements. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 272 p.
 17. Tukur H., Yonghao L. Behavior of 308L weld overlay and its corrosion in nuclear power plants. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2020, pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.20964/2020.01.67>.
 18. Kazantsev A.G., Zubchenko A.S., Kharina I.L., Grigoriev V.A., Zhukov R.Yu., Petrova O.Yu. Prediction of susceptibility of 10GN2MFA steel to slow strain rate stress corrosion cracking in high-temperature water. *Vestnik Magnitogorsk State Technical University*, 2009, No. 1, pp. 58-64.
 19. Lkasevich B.I., Trunov N.B., Dragunov Yu.G., Davidenko S.E. Steam generators of VVER reactor installations for nuclear power plants. Moscow: Akademkniga, 2004, pp. 376-391.
 20. Korol O.A., Degaev E.N., Sabitov L.S., Ayzatullin M.M., Kiyamova L.I. Effect of temperature difference on bending of external panel walls. *Construction Materials and Products*, 2024,

Сведения об авторах:

Абшенов Х.А. – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, руководитель научного проекта, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, пр. Тауке хана, 5, 160012, г. Шымкент, Казахстан.

Арапов Б.Р. – автор для корреспонденции, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник проекта, область научной деятельности: механика, механика деформируемого твердого тела, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, корпус «В», пр. Тауке хана, 5, кабинет 325, 160012, г. Шымкент, Казахстан.

Сейтказенова К.К. – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник проекта, область научной деятельности: материаловедение, механика деформируемого твердого тела, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, пр. Тауке хана, 5, 160012, г. Шымкент, Казахстан.

Печерский В.Н. – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник проекта, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, пр. Тауке хана, 5, 160012, г. Шымкент, Казахстан.

Жайлыбек Б.Б. – докторант, младший научный сотрудник проекта, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, пр. Тауке хана, 5, 160012, г. Шымкент, Казахстан.

Abshenov Kh.A. – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Head of the research project. M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan.

Arapov B.R. – Corresponding author, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the project. Research areas: Mechanics, Mechanics of Deformable Solid Bodies. M. Auezov South Kazakhstan University, Building “B”, Tauke Khan Avenue 5, Office 325, 160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan.

Seitkazenova K.K. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher of the project. Research areas: Materials Science, Mechanics of Deformable Solid Bodies. M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan.

Pecherskiy V.N. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher of the project. M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan.

Zhailybek B.B. – Doctoral student, Junior Researcher of the project. M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan





Шолу мақала

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-228-244>

Теміржол тасымалында тігінен бөлінген басқару құрылымы жағдайындағы қауіпсіздік тәуекелдерін сәйкестендіру әдістері

Н.А.Токмурзина¹ , Т.А.Токмурзин¹ , С.С.Абдуллаев¹ 
Ғ.Б.Бақыт^{*2} , О.Г. Киселёва¹ 

¹*Satbayev University, Алматы, Қазақстан*

²*Мұхаметжан Тынышбаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы, Қазақстан*

*E mail: seidulla@mail.ru, n.tokmurzina@satbayev.university,
timur93tokmurzin@gmail.com, *gaba_b@bk.ru*

Аңдатпа. Қазақстан Республикасында теміржол тасымалы нарығын либерализациялау жаңа жеке тасымалдаушылардың пайда болуына және «Қазақстан темір жолы» ұлттық компаниясы» акционерлік қоғамы атынан олардың ұлттық тасымалдаушымен бәсекелестігінің күшеюіне алып келеді. Мақала тасымалдау саласында басқару тәсілін ескере отырып, қауіпсіздік бойынша тәуекелдерді талдау және әсер ететін негізгі себептерді анықтауға бағытталған. Бұл процесс саланың ұйымдық құрылымын өзгертуден басқа, қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз ету жүйесіне қойылатын талаптарды күшейтеді. Мұндай жағдайларда әрбір тасымалдаушы қызметінің ерекшеліктерін ескеретін, сондай-ақ бірыңғай қағидаттарға негізделген тәуекелдерді басқару тәсілдерін әзірлеу өзекті болып табылады. Зерттеудің мақсаты – қозғалыс қауіпсіздігі саласындағы тәуекелдерді басқару процестерін жетілдіру және тігінен бөлінген басқару құрылымы жағдайында жұмыс істейтін тасымалдаушылар үшін әдістемелік ұсынымдар әзірлеу болып табылады. Зерттеу барысында қозғалыс қауіпсіздігін реттейтін нормативтік-құқықтық базаға кешенді талдау жүргізілді, жекелеген тасымалдаушыларда қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйесінің қалыптасуы мен дамуына кедергі келтіретін институционалдық және ұйымдастырушылық факторлар анықталды. Тәуекелдерді анықтау, бағалау және бақылаудың қолданыстағы әдістері салыстырмалы талдау негізінде қарастырылды. Нәтижесінде тасымалдаушылар қызметінің сипатын ескеретін ықтимал тәуекелдерді жіктеу және сипаттау бойынша әдістемелік тәсіл ұсынылды.

Түйінді сөздер: локомотивтердің сенімділігі, пойыз қозғалысының қауіпсіздігі, компоненттердің істен шығуы, істен шығуды болжау, тәуекелге негізделген басқару, қозғалыс қауіпсіздігін басқару.

Кіріспе

Теміржол компаниясын басқару модельдері. Теміржол саласындағы технологиялық қызметтің негізгі түрлері:

- инфрақұрылымды және жылжымалы құрамды ұстау және пайдалану;
- тасымалдау қызметі.

Осы екі қызмет бір ұйымда біріктірілгеніне немесе біріктірілмегеніне байланысты теміржол жүйесі тігінен біріктірілген (интеграцияланған компаниялардың тік жұмысымен) немесе тігінен бөлінген (жеке тасымалдаушылар мен жеке инфрақұрылым иелерінің жұмысымен) [1].

Қазіргі уақытта «ҚТЖ» ҰК» АҚ тігінен интеграцияланған компания болып табылады, дегенмен 2018 жылдан бастап Ұлттық холдингті инфрақұрылым операторының функциясын бөле отырып, көлік-логистикалық компанияға айналдыру процесі басталды.

Қазақстанның магистральдық теміржол желісі мемлекет басқаруында болғандықтан, жеке тасымалдаушылар әрқашан тігінен бөлінген басқару құрылымына ие болады.

Тік бөлу моделі тасымалдау қызметінен бөлінген бірыңғай инфрақұрылымды пайдаланатын мамандандырылған тасымалдаушылар арасындағы бәсекелестікті болжайды. Еуропалық Одаққа (ЕО) мүше мемлекеттерде тік бөлу моделі («еуропалық модель») таратылды..

1-кесте. Теміржол компаниясының құрылымдық ұйымының модельдерінің сипаттамасы

№	Мемлекеттер	Тасымалдауды құрылымдық ұйымдастырудың модельдері	
		тік интеграция	тік бөлу
1	АҚШ	✓	
2	ЕО		✓
5	Швеция		✓
6	Ұлыбритания		✓
7	Дания		✓
8	Ресей	✓	бөлу процесінде
10	Қытай	✓	
11	Қазақстан	✓	бөлу процесінде

1-кестеге ескертпе:

-тік интеграция-бір компания инфрақұрылымға ие және тасымалдауды жүзеге асырады.

-тік бөлу-инфрақұрылым мен тасымалдау функциялары әртүрлі субъектілер арасында бөлінеді.

Инфрақұрылымның меншігіне қарамастан, тасымалдаушылар арасындағы бәсекелестік инфрақұрылымға кепілді кемсітусіз қол жеткізу жағдайында ғана болуы мүмкін. Бұл ретте инфрақұрылымы бар компанияның қызметін мемлекет табиғи-монополиялық ретінде реттей алады [2]. Егер инфрақұрылым тасымалдаушылардың біріне тиесілі болса (басқалармен қатар, ол пойыздардың қозғалысын басқаруға жауап береді және өткізу қабілеттілігінің таралуына әсер етуі мүмкін), онда бәсекелес тасымалдаушылардың жұмысын әртүрлі тәсілдермен шектеуге ынталандырулар пайда болады. Сондықтан инфрақұрылымды тасымалдау қызметінен толық

ұйымдастырушылық бөлу тасымалдаушылардың инфрақұрылымға кемсітусіз қол жеткізуіне үлкен кепілдік беру үшін қолданылады.

1-кестеде кейбір елдердің теміржол саласын басқарудың қабылданған модельдері туралы мәліметтер келтірілген. Әлемде саланы құрылымдық ұйымдастырудың әртүрлі модельдері жұмыс істейді – толық интеграцияланған мемлекеттік монополиялардан бастап, функциялары бөлінген нарықтарға дейін.

Қазіргі уақытта теміржол көлігінде тасымалдау қызметтері жүзеге асырылады:

Қазіргі уақытта теміржол көлігінде тасымалдау қызметтері жүзеге асырылады:

- «Жүк тасымалы» ЖШС атынан Ұлттық жүк тасымалдаушы («ҚТЖ» ҰК» АҚ-ның еншілес кәсіпорны);

- «Жолаушылар тасымалы» АҚ атынан жолаушылардың ұлттық тасымалдаушысы («ҚТЖ» ҰК» АҚ-ның еншілес кәсіпорны);

- жеке жүк тасымалдаушылар: «Dar Rail» ЖШС, «TTT service» ЖШС;

- жеке жолаушылар тасымалдаушылары: 18 компания.

Осылайша, Қазақстанда теміржол көлігінде жүктерді және жолаушыларды тасымалдау бойынша қызметтерді басқару құрылымы тігінен бөлінген 20 жеке тасымалдаушы ұсынады. Көлік қызметтері нарығын одан әрі ырықтандыруға байланысты тасымалдаушылар саны артуы мүмкін.

Меншік нысанына қарамастан тасымалдаушыларда қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйесі (ҚҚБЖ) болуы және қауіпсіздік сертификатын алу мақсатында уәкілетті орган тарапынан ҚҚБЖ-ның мерзімді сыртқы аудитінен өтуі тиіс. Тасымалдаушылардың ҚҚБЖ-сына қойылатын талаптардың бірі – бағалау мен басқарудың тәуекелге бағдарланған принципі.

Нормативтік-құқықтық шектеулер. Бірқатар мемлекеттерде қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйесіне қойылатын талаптарды егжей-тегжейлі реттеу жоқ. Мысалы, Қазақстанда «Теміржол көлігі туралы» Заңға [3] және теміржол көлігіндегі қолданыстағы қауіпсіздік Ережелеріне [4] сәйкес тасымалдаушылар өздерінің ҚҚБЖ-сын әзірлеуге міндетті, алайда қауіпсіздіктің бірыңғай көрсеткіштері мен оларға қол жеткізу әдістері нормативтік түрде анықталмаған. Сол сияқты, ұлттық заңнамада тасымалдаушының ҚҚБЖ-сының нәтижелілігін, тиімділігін және жетілуін бағалаудың нақты критерийлері жоқ, бұл тасымалдаушының қызметін қауіпсіздік пен тұрақтылық тұрғысынан сапалы бағалау процесін қиындатады [5]. Нәтижесінде, әрбір ұйым ҚҚБЖ аудитінің метрикасы мен рәсімдерінің жүйесін дербес қалыптастырады, бұл тәуекелдерді салыстыруды қиындатады және оларды азайту стратегиясымен келісілген тәсілдердің дамуына жол бермейді. Ресей Федерациясында теміржол қауіпсіздігі туралы Федералды заң сияқты тиісті құқықтық актілер негізінен декларативті болып табылады және тәуекелдерді басқарудың нақты алгоритмдерін немесе тасымалдаушыны басқарудың құрылымдық модельдерін ескеретін проактивті талдау талаптарын қарастырмайды.

Еуропалық стандарттардың Қазақстанның нормативтік базасына интеграциялануына қатысты ішінара бейімделу ғана байқалады. Еуропалық Одақта 2004 жылдан бастап 2004/49/ЕС «Теміржолдағы қауіпсіздік туралы» директивасы бар [6], тәуекелдерді бағалаудың жалпы әдістерін (CSM-RA) қолдануды қоса алғанда, тәуекелге бағытталған ҚҚБЖ енгізуді белгілейді [7]. ТМД елдерінде бұл принциптер ұлттық реттеуде ресми түрде көрсетілген немесе әлі нормативтік базаға интеграцияланбаған. Нәтижесінде нормативтік реттеу фрагментті болып қалады: проактивті қауіпсіздікті басқарудың тиімділігіне теріс әсер ететін бірыңғай қолдану ережелері (CSM-RA) және тәуекелдерді бақылау жоқ.

Мемлекеттік және жеке тасымалдаушылар арасындағы айырмашылық

1) Деректер мен ресурстарға қол жеткізу. «Ресей темір жолдары» АҚ және «ҚТЖ» ҰК» АҚ сияқты ұлттық холдингтер техникалық жай-күйді мониторингілеу және тәуекелдерді талдау үшін мамандандырылған деректер орталықтары мен талдамалық платформаларды қамтитын қозғалыс қауіпсіздігін басқарудың дамыған корпоративтік инфрақұрылымына ие. Олардан айырмашылығы, жеке тасымалдаушылар көбінесе заманауи IT-ресурстарға қол жетімділікпен шектеледі және жеңілдетілген немесе фрагментті шешімдерді қолдануға мәжбүр болады, бұл олардың жедел бақылау және қауіптерді белсенді басқару қабілетін төмендетеді.

2) ҚҚБЖ жетілу деңгейі. Ұлттық тасымалдаушылар халықаралық стандарттарға (мысалы, ISO, CSM-RA стандарттары) сәйкес келетін ресімделген ҚҚБЖ-ны бірінші болып енгізді және кешенді басқару процедураларын әзірледі. Жеке компаниялар, керісінше, көбінесе ҚҚБЖ-ның базалық элементтерін қалыптастыру сатысында болады. Қазақстанда ҚҚБЖ-ның болуына қойылатын нормативтік талаптар негізінен тасымалдаушыларға қолданылады, ал кірме жолдардың жеке иелері, инфрақұрылым және жылжымалы құрам объектілерін техникалық ұстау және жөндеу қызметтерін көрсететін кәсіпорындар, жылжымалы құрам операторлары, экспедиторлар мұндай міндеттемелерден ресми түрде босатылады.

3) Құжатталған шараларды енгізу деңгейі. Ұлттық және халықаралық қауіпсіздік тұжырымдамаларына біріктірілген ірі тасымалдаушылар тәуекелге бағдарланған бағалау және басқару процестерін стандарттауға және біріздендіруге ықпал ететін тәсілдер. Жеке тасымалдаушылар көбінесе осы процестерді енгізуден артта қалады, бұл олардың ҚҚБЖ-сының жетілу деңгейінің төмендігіне және тәуекелдерді басқару тәжірибесіне әкеледі. Статистикалық деректер жеке тасымалдаушылар мен тасымалдау процесінің басқа қатысушыларының үлесіне қозғалыс қауіпсіздігін бұзушылықтардың көпшілігі тиесілі екенін растайды, бұл олардың ҚҚБЖ жетілдіру қажеттілігін көрсетеді [5, 8].

«ҚТЖ» ҰК» АҚ (2024) [9, 10] жыл сайынғы есебіне сәйкес, бір жыл ішінде барлығы 717 қауіпсіздік бұзушылықтары тіркелген: бұл ретте «ҚТЖ» ҰК» АҚ-ның өзі жол берген бұзушылықтардың тек 15 %-ы, қалған 85%-ы тасымалдау процесінің басқа қатысушыларымен (көптеген жеке тасымалдаушыларды қоса алғанда) байланысты. Қауіпсіздікті қамтамасыз ету саласындағы нормативтік базаның жетілмегендігі, бірыңғай көрсеткіштердің болмауы және ҚҚБЖ бағалау әдістемесі елеулі әкімшілік кедергі болып табылады. Жеке тасымалдаушылар санының өсуі тәуекелдерді белсенді басқарудың үйлестірілген құралдарының болмауымен қатар жүретін жағдай байқалады. Жеке тасымалдаушылар интегралды түрде бөлінгендіктен, оларға ЕО тәсілдерін қолдануды ұсынуға болады [11]. Еуропалық Одақта 2004/49/ЕС директивасымен [6] теміржол тасымалдаушыларының ҚҚБЖ талаптарының бірыңғай жүйесі енгізілді. CSM-RA ережесі [7] жүйедегі кез келген өзгерістер кезінде тәуекелдерді бағалаудың бірыңғай «жалпы әдісін» анықтайды. Бұл ЕО елдеріндегі белсенді тәуекел-менеджментті стандарттауға ықпал етеді: әрбір ірі оператор қауіптерді жалпы әдістемелер бойынша үнемі талдап отыруы тиіс. Салыстыру үшін, Қазақстанда мұндай регламенттердің болмауы ҚҚБЖ иелеріне (мысалы, жеке тасымалдаушыларға) бірыңғай талдау құралдары берілмейтінін білдіреді, бұл алдын алу шараларының тиімділігін төмендетеді. Зерттеудің ғылыми жаңалығы теміржол тасымалын басқарудың тігінен бөлінген құрылымы жағдайында поездар қозғалысы қауіпсіздігінің тәуекелдерін сәйкестендірудің жүйелі тәсілін әзірлеу

болып табылады. Ұсынылған тәсіл жеке тасымалдаушылар қызметінің ерекшеліктерін ескереді және ішкі және сыртқы факторлар бойынша операциялық тәуекелдерді құрылымдауға мүмкіндік береді. Халықаралық стандарттарды (ISO 31000, CSM-RA) және қолданыстағы тәжірибені талдау негізінде тәуекелдерді анықтау мен жіктеудің әдістемелік схемасы әзірленді. Бұл тәсіл қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйесін жетілдіруге және қабылданған басқару шешімдерінің негізділігін арттыруға ықпал етеді.

Ұсынылған әдістемелік тәсілдер іс жүзінде теміржол тасымалдаушыларының қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйелерін (ҚҚБЖ) әзірлеу және жетілдіру кезінде қолданылуы мүмкін. Атап айтқанда, ұсынылған тәуекелдерді жіктеу және сәйкестендіру рәсімі тәуекелдер тізілімін қалыптастыру, ішкі қауіпсіздік аудиттерін жүргізу және тәуекелдерді басқарудың басым бағыттарын айқындау кезінде пайдаланылуы мүмкін. Мысалы, жеке тасымалдаушының жүк тасымалын пайдалану кезінде техника локомотивтер мен вагондардың техникалық жағдайына, технологиялық процестердің бұзылуына немесе персоналдың біліктілігінің жеткіліксіздігіне байланысты тәуекелдерді анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, тасымалдаушының инфрақұрылым операторымен өзара әрекеттесуі кезінде бұл тәсіл дабыл ақауларынан, өткізу қабілеттілігінің шектеулерінен немесе қолайсыз ауа-райынан туындайтын тәуекелдерді бағалау үшін қолданылуы мүмкін. Ұсынылған әдістерді қолдану қауіпті факторларды жүйелі түрде анықтауға, алдын алу шараларын жоспарлауға және сол арқылы пойыздардың қозғалыс қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді.

ҚҚБЖ-ға тәуекелдерді басқарудың жүйелі әдістерін енгізу халықаралық және ұлттық заңнаманың міндетті талабы болып табылады. Мысалы, 2004/49/ЕС директивасы [12] теміржол компаниясында тәуекелдерді бағалау және пайдалану жағдайларының өзгеруін бақылау шараларын енгізу процедурасы болуы керек деп қарастырады. Осыған ұқсас талаптар Қазақстан Республикасының заңнамасында бекітілген, онда «... тасымалдау процесіне қатысушылар ұйымдастыру және техникалық шаралар кешенін жүзеге асыру арқылы қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз етеді» делінген. CSM-RA әдіснамасына сәйкес (ЕО тәуекелдерін бағалаудың жалпы әдістемесі) [13] компания жұмысындағы өзгерістерді басқару кезінде «CSM-RA қолдану арқылы жаңа ЕО тәуекелдерін анықтау және оларға жауап беру» қажет, ал ҚҚБЖ осы тәуекелдерді бағалау мен бақылаудың рәсімделген процедураларына ие болуы керек. Осылайша, тәуекелдерді анықтау – бұл «тәуекелдерді табу, тану және сипаттау» процесі. Бұл процесс қауіпсіздікті тиімді басқарудың негізі болып табылады.

Бұл жұмыста тігінен бөлінген басқару құрылымы бар тасымалдаушыларға қатысты темір жолдардағы қауіптерді анықтау және қауіпсіздік тәуекелдерін сәйкестендіру тәсілі талданды. Жұмыста қауіптер мен тәуекелдерді жіктеу жүйесі сипатталған, жүйелік құралдарды қолдану бойынша ұсыныстар берілген.

Әдеби шолу

Теміржол тасымалдаушы компаниялары жүктер мен жолаушыларды тасымалдау кезінде қызмет көрсету кезінде әртүрлі тәуекелдерге тап болады. Тәуекелдер басқарудың барлық деңгейлерінде пайда болуы мүмкін және көлік нарығында белгілі бір ерекшеліктерге ие. Сондықтан оларды уақтылы анықтау және олардың салдарын азайту маңызды.

Ғылыми әдебиеттердегі тәуекел ұғымы айтарлықтай эволюциядан өтті: оны зиян, теріс салдар немесе шығындар ретінде түсіндіруден – тәуекелді компанияның қызметіне

әсер етуі мүмкін оқиғаның пайда болу ықтималдығы ретінде түсіндіруге және одан әрі – тәуекелді кәсіпорынның мақсаттарына жетудегі белгісіздік ретінде түсінуге дейін [12, 13].

Теміржол көлігіне қатысты тәуекел «Зиян келтіру оқиғасының ықтималдығы мен осы зиянның ауырлығының үйлесімі» [14] немесе «Оқиға ықтималдығы мен оның салдарының үйлесімі» [15] ретінде анықталады.

Халықаралық стандарттау ұйымының анықтамасына сәйкес, тәуекел «белгісіздіктің қойылған мақсаттарға қол жеткізуге әсерінің салдары» болып табылады, ол іске асырылған кезде ұйымның мақсаттарына жету үшін оң, теріс немесе екіұшты салдарға әкелуі мүмкін [16]. Белгісіздік әсерінен күтілетін нәтижеден немесе оқиғадан ауытқу түсініледі.

Тәуекелдің пайда болуы қызмет барысында туындайтын күтпеген жағдайларға немесе жоспарланған оқиғалардың күтілетін сценарийден ауытқуына байланысты. Бұл ғылыми қоғамдастықта қауіптер, мүмкіндіктер және белгісіз салдарлар сияқты тәуекел аспектілерінің арақатынасына қатысты бірыңғай ұстаным жоқ [17].

Тәуекелдерді басқару процесінің бастапқы кезеңі ықтимал қауіпті оқиғаларды анықтау болып табылады, бұл Компанияның қызметіне әсер етуі мүмкін тәуекелдер тізімін қалыптастыруды және кейінгі бағалау мен талдауды қамтиды. Тәуекелдерді басқару үздіксіз болуы керек, өйткені ұйымның бүкіл өмірлік циклінде жаңа тәуекелдер пайда болуы мүмкін, тұрақты жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін үнемі бақылау мен бақылауды қажет етеді [18].

Тәуекелдерді дұрыс жіктеу және сәйкестендірудің толықтығы қауіптер тізілімін қалыптастыру, басқарушылық басымдықтарды таңдау және тәуекелдерді бағалау әдістерін қолдану үшін қажет. Бұл кезеңде егжей-тегжейлердің жеткіліксіздігі ҚҚБЖ тиімділігін төмендетеді.

Жекелеген зерттеулердің эмпирикалық бөлімінде қозғалыс қауіпсіздігіне, жылжымалы құрамның техникалық жағдайына және адам факторына байланысты он негізгі операциялық тәуекел көрсетілген. Оларды бағалау үшін ықтималдық пен салдарды сараптамалық бағалауға негізделген тәуекел индексі мен тәуекел матрицасының әдістері қолданылды. Алынған нәтижелер тәуекелдерді басқару стратегиялары бойынша жіктеуге (жою, беру, өңдеу) және нақты ұсынуға мүмкіндік берді оларды азайту бойынша іс-шаралар. Авторлар көптеген тәуекелдердің жоғары маңыздылығы және белсенді басқарушылық араласу қажеттілігі туралы қорытынды жасайды; ұсынылған алгоритм тасымалдаушы компаниялар үшін олардың қызметінің ерекшелігіне қарамастан әмбебап болып табылады. Қауіпсіздік үшін қауіп факторлары пойыздарды пайдалану кезінде әртүрлі адамдардың, машиналардың, материалдардың және қоршаған ортаның салдарынан пайдалану апаттарына әкелетін факторларға жатады [15].

Әдіснама

Тәуекелдерді анықтау – бұл бір реттік іс-шара емес, мақсатқа және қажеттілікке байланысты мезгіл-мезгіл немесе үздіксіз жүзеге асырылатын қызмет. Теміржол тасымалдаушыларының операциялық тәуекелдерін анықтау үшін жұмыс барысында бірнеше әдістер қолданылды.

ҚҚБЖ-да тәуекелдерді анықтау үшін тасымалдау процесінің барлық элементтерін кешенді талдауға негізделген жүйелік тәсіл қолданылады. Бірінші кезеңде талдаудың мақсаттары мен шекаралары анықталады, мысалы, теміржол желісінің белгілі бір бөлігінде

жолаушылар немесе жүк пойыздарының қозғалысының қауіпсіздігін қамтамасыз ету. Бұдан әрі рәсімдердің реттілігі іске асырылады: алдыңғы оқиғалар, бұзушылықтар және операциялық деректер туралы ақпаратты жинау және талдау жүзеге асырылады; сауалнамалар, ми шабуылдары және қолданыстағы рәсімдерді талдау арқылы сараптамалық қоғамдастықты тарта отырып, қауіп факторларын анықтау жүргізіледі; тәуекелдерді белгіленген критерийлер бойынша топтастыру және жіктеу жүзеге асырылады.

Жүйелік талдау құралдары ретінде келесі әдістер қолданылады:

- Исикава диаграммасы (себеп-салдарлық диаграмма) жасырын қауіп факторларын анықтауға ықпал ететін апаттық оқиғалардың ықтимал салдары (мысалы, пойыз апаты) мен себептер санаттары (бас тарту, қызметкерлердің қателіктері және т.б.) арасындағы байланысты визуализациялауға мүмкіндік береді.

- Delphi әдісі және миға шабуыл жасау олардың кәсіби тәжірибесіне сүйене отырып, ықтимал қауіптер туралы сарапшылардың пікірлері мен пікірлерін жинауды қамтамасыз етеді.

- FMEA (істен шығу түрлері мен салдарын талдау) негізгі объектілерді (локомотив, вагон, дабыл жүйесі және т.б.) жүйелі түрде қарауды, істен шығудың ықтимал сценарийлерін және олардың тасымалдау процесінің қауіпсіздігі үшін салдарын анықтауды көздейді.

- Оқиға ағашы мен сәтсіздік ағашын құру әдістері төтенше жағдайлардың дамуының логикалық схемаларын құру үшін қолданылады, бұл тәуекел факторларының әр түрлі комбинациясының ықтималдығын сандық бағалауға мүмкіндік береді.

- SWOT және PEST талдаулары сыртқы және ішкі факторларды кешенді бағалау үшін қолданылады қозғалыс қауіпсіздігінің деңгейіне әсер ету.

Зерттеу барысында бірнеше жеке тасымалдаушылар мен «ҚТЖ» ҰК» АҚ өкілдерінен сауалнама жүргізілді, олар зерттеу үшін тәуекелдердің ішкі тізімдерін, басшылықтың тексеру туралы есептерін, жылдық есептерді және қауіпсіздік аудиті туралы есептерді ұсынды. Барлық мүдделі тараптарды тарту Тәуекелдерді жіктеу және сәйкестендіру кезеңін сәтті орындау үшін қажетті шарт болып табылады.

Осы зерттеуде бенчмаркингті қолдану мақсаттары тәуекел санаттарының иерархиясын құруға, халықаралық стандарттармен (European Union Agency for Railways (ERA), International Union of railways (UIC) салыстыруды қамтамасыз етуге және табысты модельдерді ұлттық жағдайларға бейімдеуге мүмкіндік беретін құрылымдық ұқсастықтарды, әдіснамалық үлгілерді және ақпараттық олқылықтарды анықтауды қамтиды.

Эталондық зерттеулер тәуекелдердің негізгі типологиясын анықтады: техникалық, мінез-құлық, ұйымдастырушылық, инфрақұрылымдық (сыртқы), экзогендік.

Осылайша, бенчмаркинг құрылымдық салыстыруды және тәуекелдерді жіктеудің нормативтік тұрақтылығын қамтамасыз етеді, қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйесінің ашықтығы мен қайталануына ықпал етеді. Басқару құрылымы тігінен бөлінген теміржол тасымалдаушыларының ҚҚБЖ үшін қолданылатын «Қозғалыс қауіпсіздігі тәуекелдерін сәйкестендіру» процесін әзірлеуге арналған әдістемелік ұсынымдар.

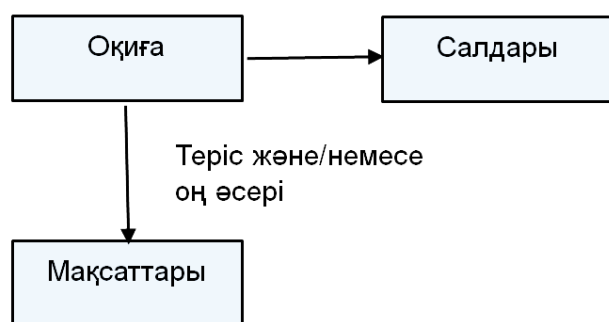
Бұл әдістемелік ұсынымдар халықаралық стандарттардың (ISO 31000, CSM-RA), нормативтік-техникалық құжаттардың (ERA, UIC, «ҚТЖ» ҰК» АҚ, «РЖД» АҚ) және бенчмаркингтің контент-талдауы негізінде әзірленді. ISO 31000:2018 - Risk management – Guidelines халықаралық стандарты [16] кез келген кәсіпорынды тәуекелге бағытталған

басқару үшін кеңінен қолданылады. ISO 31000: 2018 тәуекелдерді басқарудың әмбебап принциптері мен ұсыныстарын ұсынады. Ол келесі шарттарды орындау кезінде тасымалдаушылардың ҚҚБЖ-да қозғалыс қауіпсіздігіне байланысты тәуекелдерді анықтау үшін тиімді қолданылуы мүмкін:

1) тәуекелдерді басқарумен байланысты қауіпсіздік саласындағы саясат пен мақсаттың болуы;

2) басшылық деңгейінде қолдау, бұл жауапкершілікті белгілеуді, ресурстарды бөлуді және тәуекелдерді басқаруда жетекші рөлді білдіреді;

3) тәуекелдерді сәйкестендірудің бейімделген әдістемелерін әзірлеу. Халықаралық тәжірибеде тәуекел белгісіздіктің жоспарланған мақсаттарға әсері ретінде сипатталады, тәуекел құрылымы 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1. ISO 31000:2018 сәйкес тәуекел құрылымы

Осылайша, тәуекел – бұл белгілі бір көздерден туындайтын ықтимал оқиға, оның материалдануы қолайлы немесе жағымсыз салдардың басталуына әкелуі мүмкін.

Басқару стратегиясына және мақсатты индикаторларға байланысты белгіленген мақсаттарға қол жеткізуге әсер етуі мүмкін қозғалыс қауіпсіздігіне байланысты тәуекелдердің тізімін белгілеу қажет.

Мысалы, тасымалдаушының стратегиялық мақсатының бірі жүк теміржол тасымалының тұрақты, сенімді және қауіпсіз процесін қамтамасыз ету болып табылады. Көрсетілген мақсат үшін ықтимал тәуекел мазмұнын қарастырамыз (1-сурет).

Тәуекелді анықтау процесі тәуекелдерді бағалаудың элементі болып табылатын тәуекелдерді басқарудың бірінші кезеңі болып табылады.

Тәуекелді анықтау процесі келесі негізгі функцияларды қамтиды:

1) қозғалыс қауіпсіздігін бұзудың және тасымалдау процесінің қауіпсіздігіне әсер ететін басқа да жағымсыз оқиғалардың дерекқорын жасау және жүргізу;

2) қауіптер мен тәуекелдердің жіктелуі;

3) тәуекелдер тізілімін қалыптастыру;

4) тәуекел тізілімін бекіту;

5) тәуекелдер тізілімін мерзімді қайта қарау.

Тәуекелдерді анықтау әдістерін таңдау белгілі бір тасымалдаушыға қатысты белгіленген қауіпсіздік мақсаттарымен тікелей байланысты. Сондықтан бұл процесс қауіпсіздік саласындағы саясат пен мақсаттарды талдаудан, тасымалдаушы қызметінің

сыртқы және ішкі факторларын талдаудан басталады.

Нәтижелер мен талқылау

Тәуекелдер мен қауіпті факторларды сәйкестендіру процесінде анықталған қауіптердің бір бөлігі тасымалдаушының қызметіне байланысты емес екендігі анықталуы мүмкін, сондықтан оның басқару әсерінен тыс сыртқы тәуекелдер санатына жатады. Алайда, теміржол компаниясы осы тәуекелдердің көздері оның бақылауында болғанына қарамастан, тәуекелдер мен қауіптерді анықтауы керек. Көптеген әртүрлі материалдық немесе материалдық емес салдарға әкелуі мүмкін бірнеше нәтижелердің мүмкіндігін ескеру қажет.



Сурет 2. Тігінен бөлінген басқару құрылымы бар теміржол тасымалдаушысының операциялық тәуекелінің жіктелуі (авторлар құрастырған).

Тігінен бөлінген басқару құрылымы бар теміржол тасымалдаушысына қатысты тасымалдау қауіпсіздігімен байланысты операциялық тәуекелді толығырақ қарастырайық. Операциялық тәуекел деп ішкі процестердің кемшіліктерінен не қателіктерінен, персоналдың немесе өзге де қатысушылардың іс-әрекеттерінен, теміржол инфрақұрылымы мен жылжымалы құрам объектілерінің, технологиялық және өзге де жүйелердің істен шығуынан, сондай-ақ сыртқы факторлар мен оқиғалардың әсерінен болатын тікелей және жанама шығындардың туындау ықтималдығын түсінетін боламыз. Тасымалдаушының қозғалыс қауіпсіздігіне байланысты операциялық тәуекелін 2-суретте көрсетілген бірнеше санатқа жіктеуге болады.

Тәуекелдерді ішкі және сыртқы деп бөлу халықаралық стандарттарда бекітілген (ISO 31000, CSM-RA) және басқару критерийлеріне негізделген: тасымалдаушының бақылау дәрежесі.

Ішкі тәуекелдер тасымалдаушының ұйымдық-технологиялық құрылымында қалыптасады (техникалық ақаулар, техникалық ақаулар, персоналдың қателіктері, регламенттердің кемшіліктері, тасымалдау технологиясының бұзылуы және т.б.). Оларды сәйкестендіру және бақылау Тасымалдаушының өзі үшін жауапкершілік аймағы болып табылады.

Мысалы, процестердің тәуекелдері кәсіпорынның бизнес-процестерінің, оның жоспарлау, басқару және бақылау жүйелерінің төмен тиімділігімен, сондай-ақ компания басшылығы, менеджерлері мен қызметкерлері арасындағы нашар дамыған коммуникациялармен байланысты. Персоналдың тәуекелдері, ең алдымен, қызметкерлердің біліктілігінің жеткіліксіздігінен, төмен еңбек тәртібінен, әлсіз кадр саясатынан және кәсіпорын қызметкерлерін ынталандыру жүйесінен көрінеді.

Сыртқы тәуекелдер тасымалдаушының бақылауынан тыс факторлардан туындайды:

- инфрақұрылымдық объектілердің (көрсеткілер, сигналдар, байланыс желілері, кірме және магистральдық жолдар) істен шығуы;
- локомотив иелері тарапынан ақаулар (жалға алған жағдайда);
- табиғи құбылыстар (нөсер, мұздану, дауыл);
- бөгде адамдардың араласуы;
- реттеуші өзгерістер және саяси шектеулер.

Бұл тәуекелдер ведомстволар арасындағы өзара іс-қимылды және салалық реттеуді талап етеді.

Теміржол көлігі қозғалысының қауіпсіздігін қамтамасыз ету контекстінде кәсіпорын мен серіктестер арасындағы коммуникациялармен байланысты тәуекелдер серіктестердің шарттық міндеттемелерін бұзу салдарынан, сондай-ақ ұйым мен оның контрагенттері арасындағы ақпарат алмасудың уақтылығы мен толықтығына жүйелі бақылаудың болмауы салдарынан қауіптердің туындау ықтималдығында көрінеді. Сыртқы ортаның тәуекелдері нормативтік-құқықтық талаптардың өзгеруіне, бәсекелестердің әрекеттеріне, сондай-ақ тасымалдау процесінің тұрақтылығына теріс әсер етуі мүмкін инфрақұрылым объектілеріне рұқсатсыз қол жеткізудің салдарына байланысты. Табиғи апаттар, авариялар және технологиялық іркілістер сияқты Форс-мажорлық мән-жайлар күтпеген және бақыланбайтын оқиғалардың салдарынан қозғалыс қауіпсіздігінің бұзылуына әкеп соғуы мүмкін тәуекелдердің жекелеген санатын қалыптастырады.

Тәуекелдерді саралау жауап беру басымдықтарын нақтылауға, тәуекел матрицасын құруға, жауапкершілік аймақтарын бөлуге және есеп беру мен сертификаттаудың тиісті рәсімдерін жасауға мүмкіндік береді.

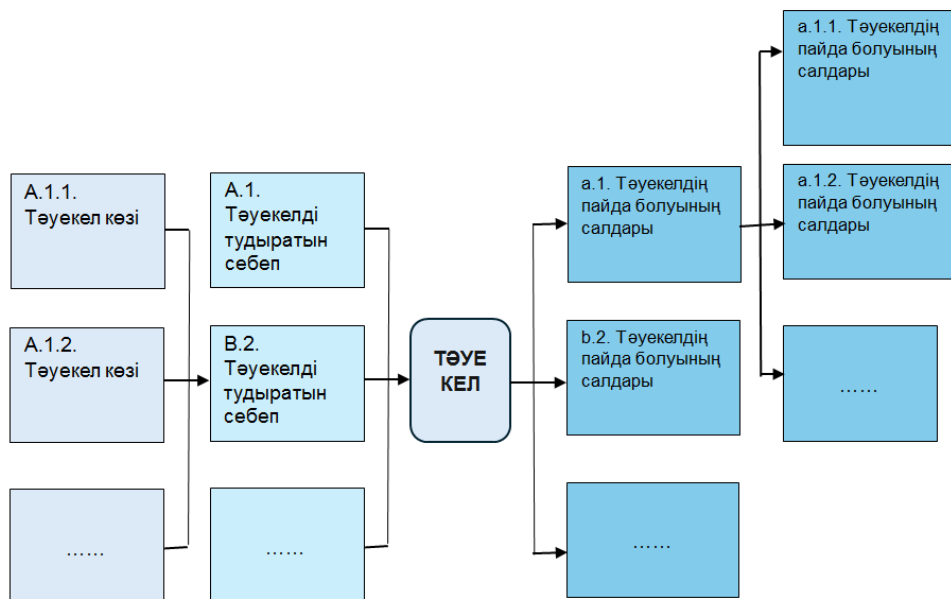
Осылайша, тәуекелдерді ішкі және сыртқы болып бөлу тәуекел жіктеуішінің логикасын арттыруға ғана емес, сонымен қатар қозғалыс қауіпсіздігін басқарудың тиімді архитектурасын құруға мүмкіндік береді. Меншікті инфрақұрылымдық активтері мен локомотивтік тартымы жоқ жеке тасымалдаушылар үшін мұндай бөлу сыртқы операторлармен өзара іс-қимылға және сертификаттау талаптарын сақтауға бағдарланған меншікті ҚҚБЖ әзірлеу кезінде өте маңызды.

Тәуекелдерді анықтау үшін тиісті, тиісті және тиісті ақпаратты пайдалану маңызды. Сондықтан есепті құжаттаманы жүргізу үшін жеткілікті ресурстар мен қажетті рәсімдердің болуы өте маңызды. Анықталған тәуекелдерді тіркейтін құжат тәуекелдер тізілімі деп аталады.

ҚҚБЖ менеджерлері үшін тәуекелдер тізілімін жүргізу тәртібін реттейтін пайдалануға

ұсынылған нормативтік құжаттар ретінде [7,11,15] көздерін көрсетуге болады.

Тәуекелдің себептері-бұл ұйымның мақсаттарына қол жеткізуге әсер етуі мүмкін оқиғаларды бастау мүмкіндігі бар жағдайлар мен факторлардың жиынтығы. Тәуекел көздері мақсаттарды іске асыру барысына әсер ететін осындай оқиғаларды тудыру қабілеті бар объектілер немесе процестер ретінде түсіндіріледі. Тәуекелдің салдары тәуекелдің материалдануы нәтижесінде пайда болатын жаңа жағдайларда көрінеді және кәсіпорын қызметінің әртүрлі аспектілеріне әсер ететін оң және теріс сипатта болуы мүмкін (3-сурет).



Сурет 3. «Себептері-көздері-тәуекел-салдары» тәуекел құрылымы

Енді қауіпті оқиғалардың жіктелуін әзірлеуге көшейік. Тасымалдаушының қауіпті оқиғаларын сәйкестендіру, есепке алу және талдау көлік жүйесін қорғауды қамтамасыз етуге бағытталған тиімді шараларды әзірлеу және іске асыру үшін әдіснамалық негіз қалыптастырады. Қауіпті оқиғалардың жіктелуі белгілі бір жағдайға тән ең маңызды және типтік оқиғаларды анықтау мақсатын көздейді теміржол компания, сондай-ақ оларды белгілі бір белгілер бойынша топтастыру, бұл әртүрлі жіктеу топтары шеңберінде тәуекелдерді талдау тәсілдерін біріздендіруге ықпал етеді. Ұсынылған қауіптілік жіктемесін тасымалдаушының қозғалыс қауіпсіздігінің бұзылуы туралы электрондық деректер базасын құру кезінде пайдалануға болады. Бұл жағдайда келтірілген белгілер бойынша қауіптерді шифрлау бірыңғай цифрлық кодты тағайындаумен ««топ – кіші топ – түр» форматында мүмкін болады (3-сурет) [7].

Халықаралық тәжірибе (ERA, UIC, «ҚТЖ» ҰК» АҚ, «РЖД» АҚ) негізінде авторлар әзірлеген қауіптердің толық жіктелуі Қазақстан Республикасының ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырған AP26199023 «Жалпы және жалпы пайдаланымдағы темір жолдардағы тасымалдаушылардың қауіпсіздігін басқару жүйесінің тиімділігін бағалау әдістемесі» жобасының орындалуы туралы аралық есепте келтірілген.

Бенчмаркет негізінде қозғалыс қауіпсіздігінің негізгі тәуекелдерін олардың қозғалыс қауіпсіздігі мақсатына қол жеткізуге әсер ету дәрежесі бойынша саралау жүргізілді. Талдау

негізіне ERA; UIC, экономикалық ынтымақтастық және даму ұйымының (ЭЫДҰ) есептері; уәкілетті органдардың (Қазақстан Республикасы Көлік министрлігінің теміржол және су көлігі комитеті), «ҚТЖ» ҰК» АҚ аудиторлық және қадағалау есептері кірді.

Ұсынылған рейтингті тасымалдаушылар келесі міндеттерді шешкен кезде қабылдай алады:

- Онда поездар қозғалысының қауіпсіздігіне барынша әсер ететін басым қатерлерді айқындау;

- тасымалдаушының ресурстарын (ұйымдық, қаржылық, кадрлық) аса қауіпті тәуекелдердің алдын алуға және төмендетуге негізделген бөлуді қамтамасыз ету;

- сертификаттау және қадағалау талаптарына сәйкес қалдық тәуекелдің қолайлы деңгейін ұстап тұру;

- ҚҚБЖ ішкі және сыртқы аудит рәсімдері шеңберінде дәлелдемелік базаны қамтамасыз ету.

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (06.10.2025 ж. № 25-27 ГФ/398 гранты «Жалпы және жалпыға ортақ пайдаланылмайтын теміржол жолдарындағы тасымалдаушылардың қауіпсіздігін басқару жүйесінің тиімділігін бағалау әдістемесі» 06.10.2025 AP26199023).

Осы зерттеу шеңберінде көлік қызметтері нарығын ырықтандыру жағдайында тасымалдаушылардың ҚҚБЖ тиімділігін арттыруға байланысты ғылыми-әдістемелік сипаттағы мақалалардың тұтас циклін жариялау болжанады.

Бұл мақала тігінен бөлінген басқару құрылымы бар тасымалдаушылар үшін әдістемелік ұсыныстар түрінде дайындалған.

Осы зерттеудің нәтижесі тасымалдаушылардың ҚҚБЖ-ны дамыту үшін бар кедергілерді сипаттау, тәуекелдер мен қауіптерді сәйкестендіру кезеңдерін егжей-тегжейлі сипаттау болып табылады.

Зерттеу авторлары жеке тасымалдаушылардың тәуекелдерін анықтау үшін тәуекелдер мен қауіптердің жіктелуін ұсынады. Бұл жіктеу қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз ету саласындағы үздік әлемдік тәжірибелерді жалпылау негізінде әзірленген, теміржол көлігіндегі тәуекелдерді басқарудың бірыңғай тәсілдерін әзірлеуге ықпал ететін болады.

Поездар қозғалысының қауіпсіздігін қамтамасыз ету мақсатына қол жеткізу үшін ұсынылған тәуекелдерді сыни деңгей бойынша саралау теміржол компаниясының стратегиялық мақсаттарын сипаттау, тәуекелдер тізілімін қалыптастыру және тасымалдау процесінің қауіпсіздігін арттыруға бағытталған іс-шараларды әзірлеу үшін пайдалы болады.

Қорытынды

Зерттеу нәтижесінде жеке теміржол тасымалдаушылары санының өсуі және сала құрылымының күрделенуі жағдайында локомотивтердің сенімділігі мен қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз ету мәселелері шешуші мәнге ие болатындығы анықталды. Қолданыстағы қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйелері тәуекелдерді бағалау мен болжаудың белсенді әдістерін енгізуді талап етеді.

Ақаулықтарды талдау қауіпсіздікті бұзудың едәуір бөлігі локомотивтердің жауапты бөліктері мен тораптарының істен шығуымен байланысты екенін көрсетті. Мұндай сәтсіздіктерді ерте болжаудың тиімді әдістерінің болмауы пайдалану шығындарының өсуіне және тасымалдау процесінің сенімділігінің төмендеуіне әкеледі.

Жұмыста тігінен бөлінген басқару құрылымы бар тасымалдаушылар үшін қозғалыс қауіпсіздігі тәуекелдерін сәйкестендіруге және жіктеуге кешенді тәсіл ұсынылған. Әзірленген әдіс қауіпті факторларды жүйелеуге және басқару шешімдерінің дұрыстығын арттыруға мүмкіндік береді.

Пайдалану деректері мен диагностика нәтижелерін талдау негізінде локомотивтердің көтергіш және жауапты элементтерінің істен шығуын болжау әдістемесі әзірленді. Бұл әдістемені қолдану реактивті тәсілден жылжымалы құрамның техникалық жай-күйін алдын ала басқаруға көшу мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

Зерттеудің тәжірибелік маңыздылығы алынған нәтижелерді тасымалдаушылардың ҚҚБЖ жетілдіру, локомотивтердің істен шығу санын азайту және поездар қозғалысының қауіпсіздік деңгейін арттыру үшін пайдалану мүмкіндігі болып табылады. Әзірленген ұсынымдар теміржол компаниялары мен реттеу органдарының қызметіне енгізілуі мүмкін.

Алғыстар:

Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (06.10.2025 ж. № 25-27 ГФ/398 гранты «Жалпы және жалпыға ортақ пайдаланылмайтын теміржол жолдарындағы тасымалдаушылардың қауіпсіздігін басқару жүйесінің тиімділігін бағалау әдістемесі» 06.10.2025 AP26199023).

Авторлардың қосқан үлесі

Абдуллаев С.С. – зерттеудің тұжырымдамасын әзірлеу, ғылыми әдістемені қалыптастыру, деректерді талдау және мақала мәтінінің негізгі бөлігін жазу.

Токмурзина Н.А.– эксперименттік зерттеулерді жүргізу, бастапқы деректерді жинау және өңдеу.

Токмурзин Т.А.– алынған нәтижелерді интерпретациялау және оларды ғылыми тұрғыдан талдау.

Бақыт Ғ.Б. – зерттеу нәтижелерін жүйелеу, қорытындылар мен ұсыныстарды әзірлеу, сондай-ақ мақаланың құрылымын жетілдіру және мақаланың мазмұнын қайта қарау (редакциялау).

Әдебиеттер тізімі

1. Yi, C., Lin, J., Zhang, W., & Ding, J. (2015). Faults diagnostics of railway axle bearings based on IMF's confidence index algorithm for ensemble EMD. *Sensors*, 15(5), 10991–11011. <https://doi.org/10.3390/s150510991>.
2. Luo, H., et al. (2020). Speed train axle-box bearing fault diagnosis using simplified shallow information fusion convolutional neural network. *Sensors*, 20(17), 4930. <https://doi.org/10.3390/s20174930>.
3. Symonds, N., Corni, I., Wood, R. J. K., Wasenczuk, A., & Vincent, D. (2015). Observing early stage rail axle bearing damage. *Engineering Failure Analysis*, 56, 216–232. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.02.008>.
4. Abdullayev, S., Kiseleva, O., Adilova, N., Bakyt, G., Vakhitova L. (2016) Key development factors of the transit and transport potential of Kazakhstan. *Transport Problems*, 11(2), pp. 17-26. <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.2.2/>.
5. Zhu, C., He, J., Peng, J., Ren, Y., Lin, X., & Zhu, M. (2019). Failure mechanism analysis on railway wheel shaft of power locomotive. *Engineering Failure Analysis*, 104, 25–38.

- <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.013>.
6. Javanmardi, D., & Rezvani, M. A. (2023). Rail vehicle axle-box roller bearing life and failure analysis based on the Hertz contact theory, finite element modeling, and field observations. *World Journal of Engineering*. <https://doi.org/10.1108/WJE-01-2023-0010>.
 7. Crespo Márquez, A., de la Fuente Carmona, A., Marcos, J. A., & Navarro, J. (2020). Designing CBM plans based on predictive analytics and big-data tools for train wheel bearings. *Computers in Industry*, 122, 103292. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103292>.
 8. Binder, M., Mezhyuev, V., & Tschandl, M. (2023). Predictive maintenance for railway domain: A systematic literature review. *IEEE Engineering Management Review*, 51(2), 120–140. <https://doi.org/10.1109/EMR.2023.3262282>.
 9. Oginni, D., Camelia, F., Chatzimichailidou, M., & Ferris, T. L. J. (2023). Applying a System-Theoretic Process Analysis (STPA)-based methodology supported by systems engineering models to a UK rail project. *Safety Science*, 167, 106275. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106275>.
 10. Randall, R. B., & Antoni, J. (2011). Rolling element bearing diagnostics — A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 485–520. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>.
 11. Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, 32(4), 469–480. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00077-8).
 12. Tiboni, M., Remino, C., Bussola, R., & Amici, C. (2022). A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery. *Applied Sciences*, 12(3), 972. <https://doi.org/10.3390/app12030972>.
 13. Soomro, A.A., Muhammad, M.B., Mokhtar, A.A., Md Saad, M.H., Lashari, N., Hussain, M., Sarwar, U., & Palli, A. S. (2024). Insights into modern machine learning approaches for bearing fault classification: A systematic literature review. *Results in Engineering*, 23, 102700. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102700>.
 14. Abboud, D., Elbadaoui, M., Smith, W. A., & Randall, R. B. (2019). Advanced bearing diagnostics: A comparative study of two powerful approaches. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 114, 604–627. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.011>.
 15. Davari, N., Veloso, B., Costa, G. A., Pereira, P. M., Ribeiro, R. P., & Gama, J. (2021). A survey on data-driven predictive maintenance for the railway industry. *Sensors*, 21(17), 5739. <https://doi.org/10.3390/s21175739>.
 16. Hou, D., Qi, H., Li, D., Wang, C., Han, D., Luo, H., & Peng, C. (2022). High-speed train wheel set bearing fault diagnosis and prognostics: Research on acoustic emission detection mechanism. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 179, 109325. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109325>.
 17. Правила идентификации и оценки рисков акционерного общества «Национальная компания «Қазақстан темір жолы». Редакция 5.0, утвержденные Решением Совета директоров акционерного общества «Национальная компания «Қазақстан темір жолы» от 1 февраля 2018 года протокол № 1. Астана: АО «НК «КТЖ», с. 54.
 18. Промежуточный отчет о выполнении темы АР26199023 «Методология оценки эффективности системы управления безопасностью перевозчиков на железнодорожных путях общего и необщего пользования»/Алматы: НАО «КНИТУ им. К. Сатпаева, 2026, с. 128.

N.A.Tokmurzina¹, T.A.Tokmurzin¹, S.S.Abdullayev¹, G.B.Bakyt*², O.G Kisselyova¹

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan

Methods of identification of safety risks in conditions of vertically distributed management structure in railway transportation

Abstract. The liberalization of the railway transportation market in the Republic of Kazakhstan will lead to the emergence of new private carriers and increase their competition with the national carrier on behalf of JSC National Company Kazakhstan Temir Zholy. The article is aimed at analyzing safety risks and identifying the main causes of impact, taking into account the approach to management in the field of transportation. This process, in addition to changing the organizational structure of the industry, strengthens the requirements for the traffic safety system. In such cases, it is important to develop risk management approaches that take into account the specifics of each carrier's activities, as well as those based on common principles. The purpose of the study is to improve risk management processes in the field of traffic safety and develop methodological recommendations for carriers operating in a vertically distributed management structure. In the course of the study, a comprehensive analysis of the regulatory framework governing traffic safety was carried out, and institutional and organizational factors were identified that hinder the establishment and development of a traffic safety management system for individual carriers. The existing methods of risk identification, assessment, and control were evaluated through a comparative analysis. As a result, a methodological approach has been proposed to classify and describe possible risks, taking into account the nature of the carriers' activities.

Keywords: locomotive reliability, train safety, component failure, failure prediction, risk-based management, traffic safety management.

References

1. Yi, C., Lin, J., Zhang, W., & Ding, J. (2015). Faults diagnostics of railway axle bearings based on IMF's confidence index algorithm for ensemble EMD. *Sensors*, 15(5), 10991–11011. <https://doi.org/10.3390/s150510991>.
2. Luo, H., et al. (2020). Speed train axle-box bearing fault diagnosis using simplified shallow information fusion convolutional neural network. *Sensors*, 20(17), 4930. <https://doi.org/10.3390/s20174930>.
3. Symonds, N., Corni, I., Wood, R. J. K., Wasenczuk, A., & Vincent, D. (2015). Observing early stage rail axle bearing damage. *Engineering Failure Analysis*, 56, 216–232. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.02.008>.
4. Abdullayev, S., Kiseleva, O., Adilova, N., Bakyt, G., Vakhitova L. (2016) Key development factors of the transit and transport potential of Kazakhstan. *Transport Problems*, 11(2), pp. 17-26. <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.2.2/>.
5. Zhu, C., He, J., Peng, J., Ren, Y., Lin, X., & Zhu, M. (2019). Failure mechanism analysis on railway wheel shaft of power locomotive. *Engineering Failure Analysis*, 104, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.013>.
6. Javanmardi, D., & Rezvani, M. A. (2023). Rail vehicle axle-box roller bearing life and failure analysis based on the Hertz contact theory, finite element modeling, and field observations.

- World Journal of Engineering. <https://doi.org/10.1108/WJE-01-2023-0010>.
7. Crespo Márquez, A., de la Fuente Carmona, A., Marcos, J. A., & Navarro, J. (2020). Designing CBM plans based on predictive analytics and big-data tools for train wheel bearings. *Computers in Industry*, 122, 103292. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103292>.
 8. Binder, M., Mezhyuev, V., & Tschandl, M. (2023). Predictive maintenance for railway domain: A systematic literature review. *IEEE Engineering Management Review*, 51(2), 120–140. <https://doi.org/10.1109/EMR.2023.3262282>.
 9. Oginni, D., Camelia, F., Chatzimichailidou, M., & Ferris, T. L. J. (2023). Applying a System-Theoretic Process Analysis (STPA)-based methodology supported by systems engineering models to a UK rail project. *Safety Science*, 167, 106275. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106275>.
 10. Randall, R. B., & Antoni, J. (2011). Rolling element bearing diagnostics — A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 485–520. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>.
 11. Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, 32(4), 469–480. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00077-8).
 12. Tiboni, M., Remino, C., Bussola, R., & Amici, C. (2022). A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery. *Applied Sciences*, 12(3), 972. <https://doi.org/10.3390/app12030972>.
 13. Soomro, A.A., Muhammad, M.B., Mokhtar, A.A., Md Saad, M.H., Lashari, N., Hussain, M., Sarwar, U., & Palli, A. S. (2024). Insights into modern machine learning approaches for bearing fault classification: A systematic literature review. *Results in Engineering*, 23, 102700. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102700>.
 14. Abboud, D., Elbadaoui, M., Smith, W. A., & Randall, R. B. (2019). Advanced bearing diagnostics: A comparative study of two powerful approaches. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 114, 604–627. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.011>.
 15. Davari, N., Veloso, B., Costa, G. A., Pereira, P. M., Ribeiro, R. P., & Gama, J. (2021). A survey on data-driven predictive maintenance for the railway industry. *Sensors*, 21(17), 5739. <https://doi.org/10.3390/s21175739>.
 16. Hou, D., Qi, H., Li, D., Wang, C., Han, D., Luo, H., & Peng, C. (2022). High-speed train wheel set bearing fault diagnosis and prognostics: Research on acoustic emission detection mechanism. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 179, 109325. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109325>.
 17. Pravila identifikacii i ocenki riskov akcionernogo obshestva «Nacionalnaya kompaniya «Kazakhstan temir zholy». Redakciya 5.0, utverzhdennye Resheniem Soveta direktorov akcionernogo obshestva «Nacionalnaya kompaniya «Kazakhstan temir zholy» ot 1 fevralya 2018 goda protokol № 1 [Rules of identification and risk assessment of the Joint-stock company "National Company "Kazakhstan Temir Zholy". Revision 5.0, approved by the Decision of the Board of Directors of the National Company Kazakhstan Temir Zholy Joint Stock Company dated February 1, 2018 Protocol No. 1]. Astana: AO «NK «KTZh», s. 54. [in Russian]
 18. Promezhutochnyi otchet o vypolnenii temy AP26199023 «Metodologiya ocenki effektivnosti sistemy upravleniya bezopasnostyu perevozchikov na zheleznodorozhnyh putyah obshego i neobshego polzovaniya» [Interim report on the implementation of the

topic AP26199023 "Methodology for evaluating the effectiveness of the safety management system for carriers on public and non-public railway tracks"]/Almaty: NAO «KNITU im. K. Satpaeva, 2026, s. 128.

Авторлар туралы мәлімет:

Токмурзина Наталья Анатольевна – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, жетекші ғылыми қызметкер, Satbayev University, Сәтбаев к-сі, 22, 050013, Алматы, Қазақстан

Токмурзин Тимур Аскарлович – кіші ғылыми қызметкер, Satbayev University, Сәтбаев к-сі, 22, 050013, Алматы, Қазақстан

Абдуллаев Сейдулла Сейдеметович – техника ғылымдарының докторы, профессор, жоба жетекшісі, Satbayev University, Сәтбаев к-сі, 22, 050013, Алматы, Қазақстан

Бақыт Ғабит Бақытұлы – хат-хабар авторы, PhD докторы, Мұхаметжан Тынышбаев атындағы АЛТ Университетінің АЛТ профессоры, Шевченко көшесі, 97, 050012, Алматы, Қазақстан

Киселёва Ольга Геннадьевна – техника ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкер, Satbayev University, Сәтбаев к-сі, 22, 050013, Алматы, Қазақстан

Bakyt Gabit – corresponding author, PhD, ALT professor, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, 97 Shevchenko Street, 050012

Abdullayev Seidulla – Doctor of technical sciences, professor, project manager, Satbayev University, 22 Satbayev Street, 050013, Almaty

Tokmurzina Natalya – Candidate of Technical Sciences, leading researcher, Satbayev University, 22 Satbayev Street, 050013, Almaty, Kazakhstan

Tokmurzin Timur – junior research associate, Satbayev University, 22 Satbayev Street, 050013, Almaty, Kazakhstan

Kisselyova Olga – Candidate of Technical Sciences, senior researcher, Satbayev University, 22 Satbayev Street, 050013, Almaty, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-245-256>

Расчет конструктивных параметров регулярной насадки теплообменного аппарата из непрерывно соединенных труб

Д.К.Камалбек^{ID}, А.А.Волненко^{ID}, А.А. Абжапбаров^{ID},
Д.К. Жумадуллаев*^{ID}

Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан

*E mail: kamalbekovd@mail.ru, nii_mm@mail.ru, abaimilan@mail.ru,
daulet_ospl@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены конструкции аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры с внешним и внутренним расположением коллекторов. На основе анализа существующих конструкций создан аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединенных труб одного диаметра внутри корпуса аппарата. Целью исследования является получение расчетных зависимостей для определения конструктивных параметров трубчатой насадки из непрерывно соединенных труб. Методология исследования основана на известном подходе движения газа по извилистым каналам, образованным насадочными телами. Получены уравнения для расчета порозности трубчатой насадки в сечении аппарата, объемной порозности и эквивалентного диаметра, учитывающие конструктивные параметры трубчатого пучка и шаги размещения труб в вертикальном и радиальном направлениях. Проведены вычислительные эксперименты и выполнено сопоставление расчетных данных для трубчатых насадок с прямыми трубами и выносными коллекторами и насадок из непрерывно соединенных труб. Установлено, что наличие отводов приводит к снижению объемной порозности и эквивалентного диаметра вследствие уменьшения свободного пространства контактной зоны. Полученные зависимости могут быть использованы при расчете и проектировании теплообменных аппаратов с регулярной трубчатой насадкой.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, регулярная трубчатая насадка, отводы, порозность в сечении, объемная порозность, эквивалентный диаметр, вертикальный шаг, радиальный шаг.

Введение

Известно, что практически во всех отраслях промышленности наибольшее распространение для проведения процессов тепломассообмена получили тарельчатые и насадочные аппараты. Несмотря на огромное разнообразие конструкций, тепломассообменные аппараты постоянно совершенствуются в направлении снижения энергозатрат и повышения эффективности проводимых процессов.

Перспективным направлением является создание конструкций насадочных аппаратов с регулярной структурой трубчатого пучка, позволяющих одновременно реализовать процессы тепло и массообмена в интенсивных (синфазных) режимах взаимодействия фаз при внешнем обтекании труб и осуществлять процесс теплообмена при движении теплоносителя в трубах. Причем поглотительный раствор в зоне контакта не смешивается с теплоносителем, движущимся в трубах. Это может явиться важным обстоятельством при использовании теплоносителя для производственных нужд.

В настоящее время создан ряд конструкций аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры и внешним расположением коллекторов [1]. К их числу можно отнести аппарат с гладкими прямыми трубами [2], а также аппарат с турбулизаторами теплоносителя в трубах [3,4], аппараты с комбинированной регулярно-взвешенной насадкой двух типов: трубчато-взвешенной [5] и трубчато-фонтанирующей насадкой [6], аппарат с насадкой с раздельными коллекторами для подачи и слива теплоносителя нечетных и четных слоев регулярной кольцевой трубчатой насадки [7]. Для достижения компактности созданы аппараты с трубчатой насадкой регулярной структуры и расположением коллекторов в зоне контакта [8], двухступенчатый аппарат ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой [9], а также аппарат, обеспечивающий чередование противоточного движения потоков холодных и горячих теплоносителей в трубах по сечению рабочей зоны трубчатой насадки [10]. Нами для проведения исследований гидродинамики и процессов тепломассообмена был создан аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединенных труб одного диаметра внутри корпуса аппарата [11].

Для определения степени влияния конструктивных параметров исследуемого трубчатого пучка на гидродинамические характеристики и параметры тепломассообмена необходимо получение расчетных зависимостей для определения порозности насадки и эквивалентного диаметра насадочной зоны аппарата с трубчатым пучком из непрерывно соединенных труб, что и определяет актуальность данной статьи.

Новизной темы является получение уравнений для расчета порозности насадки и эквивалентного диаметра новой конструкции регулярной трубчатой насадки в виде непрерывно соединенных труб.

Методология

Изучение конструктивных параметров тепломассообменного аппарата квадратного поперечного сечения проводилось для трубчатой насадки, представляющей собой трубчатый пучок в виде непрерывно соединенных с помощью отводов труб. Перед проведением численных экспериментов определяются размеры конструктивных составляющих трубчатого пучка (длины и диаметра труб, размеры отводов), количество прямых участков труб и отводов, а также шаги трасположения труб в вертикальном и радиальном направлении. В дальнейшем на основе известных расчетных зависимостей при движении газа по извилистым каналам получены уравнения для определения порозности

в сечении аппарата, объемной порозности и эквивалентного диаметра, которые учитывают параметры трубчатой насадки. С помощью языка программирования Pascal проведены расчеты по полученным уравнениям и сопоставление с аналогичным по конструкции аппаратом с прямыми трубами и выносными коллекторами.

В статье решается исследовательский вопрос по влиянию размеров трубчатых элементов и шагов расположения труб на конструктивные параметры: порозность и эквивалентный диаметр трубчатой насадки.

Основной гипотезой является определение характера влияния конструктивных параметров на ключевые показатели – энергопотребление и эффективность проводимых процессов.

Этапами исследования являются: определение размеров трубчатого пучка, получение расчетных зависимостей порозности и эквивалентного диаметра трубчатой насадки, проведение вычислительных экспериментов.

Методы исследования - вычислительные эксперименты на основе полученных расчетных зависимостей.

Результаты и Обсуждение

Известно, что газ движется через насадку по извилистым каналам, образованным насадочными телами [12]. Нами для получения расчетных зависимостей конструктивных параметров трубчатой насадки рассмотрена конструкция аппарата квадратного поперечного сечения, в рабочей зоне которого расположен трубчатый пучок в виде непрерывно соединенных с помощью отводов труб. Конструкция аппарата с трубчатым пучком в виде непрерывно соединенных с помощью отводов труб защищена патентом РК на изобретение [11]. Все полученные уравнения, представленные ниже, получены применительно к данному аппарату.

Конструктивные параметры трубчатой насадки (порозность в сечении аппарата, объемную порозность и эквивалентный диаметр) определим для ячейки, расположенной в центральной части аппарата.

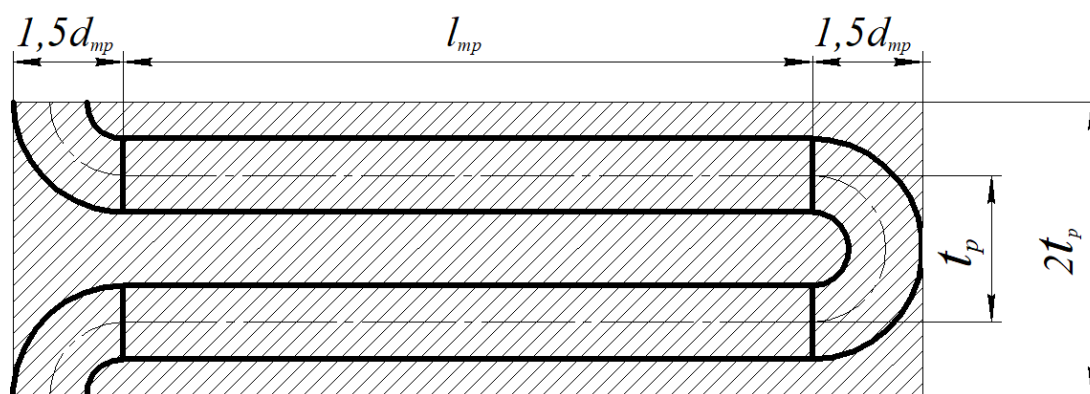


Рисунок 1. Фрагмент трубчатой насадки в центральной части аппарата (вид сверху)

Как видно из рисунка 1, в рассматриваемый фрагмент входят две трубы, один полный отвод и две половинки отводов, составляющих также один полный отвод.

Порозность в сечении аппарата определяется по зависимости:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{S_{\text{эл}}}{S_{\text{яч}}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{эл}}$ – площадь элементов в миделевом сечении, входящих в ячейку, м^2 ; $S_{\text{яч}}$ – площадь ячейки, м^2 .

Площадь элементов в миделевом сечении определим по формуле:

$$S_{\text{эл}} = S_{\text{тр}} + S_{\text{кольца}} \quad (2)$$

Площадь сечения труб в ячейке рассчитываем по формуле:

$$S_{\text{тр}} = 2 \cdot d_{\text{тр}} \cdot l_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где $d_{\text{тр}}$ – диаметр труб, м; $l_{\text{тр}}$ – длина труб, м.

Площадь кольца рассчитывается по известной зависимости:

$$S_{\text{кольца}} = \pi \cdot (R^2 - r^2) \quad (4)$$

Здесь $R = 1,5 \cdot d_{\text{тр}}$ – наружный радиус кольца, м; $r = 0,5 \cdot d_{\text{тр}}$ – внутренний радиус кольца, м.

После подстановки и преобразований получим:

$$S_{\text{кольца}} = 2 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}}^2. \quad (5)$$

Тогда

$$S_{\text{эл}} = 2 \cdot d_{\text{тр}} \cdot (l_{\text{тр}} + \pi \cdot d_{\text{тр}}). \quad (6)$$

Площадь ячейки определим по формуле:

$$S_{\text{яч}} = (l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}}) \cdot 2 \cdot t_{\text{р}} \quad (7)$$

После подстановки формул (6) и (7) в выражение (1) получим:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{d_{\text{тр}} \cdot (l_{\text{тр}} + \pi \cdot d_{\text{тр}})}{(l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}}) \cdot t_{\text{р}}} \quad (8)$$

В уравнении (8) отношение $\frac{l_{\text{тр}} + \pi \cdot d_{\text{тр}}}{l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}}} \approx 1$, тогда порозность в сечении аппарата может быть определена по выражению:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{d_{\text{тр}}}{t_{\text{р}}}. \quad (9)$$

Ячейка для определения объемной порозности представлена на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что выделенная ячейка содержит четыре трубы, два полных отвода

и четыре половинки отводов, составляющих два полных отвода.

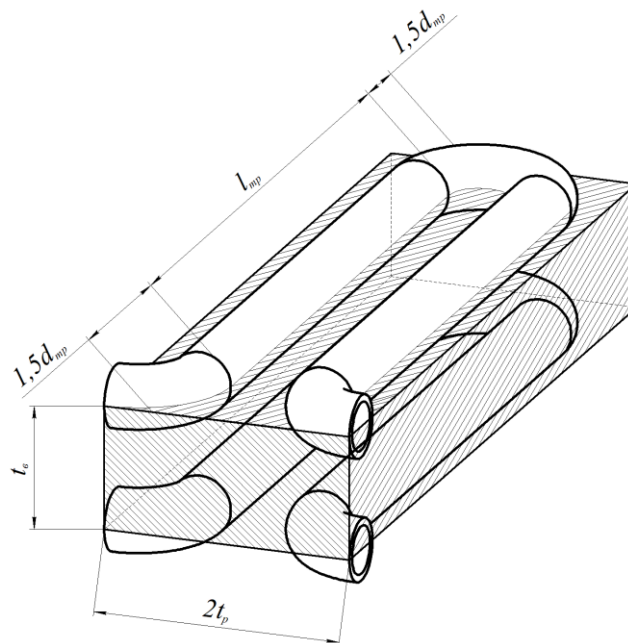


Рисунок 2. Ячейка трубчатой насадки в центральной части аппарата

Объемная порозность трубчатой насадки определяется по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{яч}}}, \quad (10)$$

где $V_{\text{эл}}$ – объем элементов насадки, входящих в ячейку, м^3 ; $V_{\text{яч}}$ – объем ячейки, м^3 .
Объем элементов насадки определяется по формуле:

$$V_{\text{эл}} = V_{\text{тр}} + V_{\text{отв}} \quad (11)$$

Объем труб в ячейке определим по формуле:

$$V_{\text{тр}} = \pi \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot l_{\text{тр}}, \quad (12)$$

Объем отвода составляет половину объема тора. Для расчета объема тора известна формула:

$$V_{\text{тора}} = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r^2, \quad (13)$$

где $R = 1,5 \cdot d_{\text{тр}}$ – наружный радиус тора, м; $r = 0,5 \cdot d_{\text{тр}}$ – внутренний радиус тора, м.
Преобразовав известную формулу с подстановкой значений радиусов, получим уравнение для расчета объема отводов:

$$V_{\text{отв}} = 1,5 \cdot \pi^2 \cdot d_{\text{тр}}^3. \quad (14)$$

следовательно объем элементов насадки, с учетом (12) и (14), можно рассчитать по формуле:

$$V_{\text{эл}} = \pi \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot (l_{\text{тр}} + 1,5 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}}). \quad (15)$$

объем ячейки определим по формуле:

$$V_{\text{яч}} = 2 \cdot t_p \cdot t_b \cdot (l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}}) \quad (16)$$

подставляя (15) и (16) в уравнение (10), получим:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot (l_{\text{тр}} + 1,5 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}})}{2 \cdot t_p \cdot t_b \cdot (l_{\text{тр}} + 3 \cdot d_{\text{тр}})} \quad (17)$$

эквивалентный диаметр трубчатой насадки рассчитывается по формуле [12]:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_n} \quad (18)$$

удельную поверхность трубчатой насадки определим по формуле:

$$a_n = \frac{S_{\text{эл}}^H}{V_{\text{яч}}} \quad (19)$$

удельную площадь составляющих элементов трубчатой насадки определим по формуле:

$$S_{\text{эл}}^H = S_{\text{тр}}^H + S_{\text{отв}}^H \quad (20)$$

здесь удельная площадь труб:

$$S_{\text{тр}}^H = 4 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot l_{\text{тр}} \quad (21)$$

удельная площадь отводов может быть рассчитана с использованием уравнения площади поверхности тора:

$$S_{\text{тор}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r \quad (22)$$

подставляя значения радиусов ($R = 1,5 \cdot d_{\text{тр}}$; $r = 0,5 \cdot d_{\text{тр}}$), получим формулу для определения удельной площади отводов:

$$S_{\text{отв}}^H = 6 \cdot \pi^2 \cdot d_{\text{тр}}^2 \quad (23)$$

с учетом (18) и (20) уравнение (17) примет вид:

$$S_{\text{эл}}^H = 2 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot (2 \cdot l_{\text{тр}} + 3 \cdot \pi \cdot d_{\text{тр}}) \quad (24)$$

подставляя (24) и (16) в уравнение (19), получим:

$$a_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot d_{тр} \cdot (2 \cdot l_{тр} + 3 \cdot \pi \cdot d_{тр})}{2 \cdot t_p \cdot t_b \cdot (l_{тр} + 3 \cdot d_{тр})} \quad (25)$$

тогда с учетом (25) и (17) уравнение (18) примет вид:

$$d_{эКВ} = \frac{2 \cdot [2 \cdot t_p \cdot t_b \cdot (l_{тр} + 3 \cdot d_{тр}) - \pi \cdot d_{тр}^2 \cdot (l_{тр} + 1,5 \cdot \pi \cdot d_{тр})]}{\pi \cdot d_{тр} \cdot (2 \cdot l_{тр} + 3 \cdot \pi \cdot d_{тр})} \quad (26)$$

На основании инженерной методики расчета, представленных в работах [13-15], содержащей уравнения для расчета порозности трубчатой насадки в сечении аппарата, объемной порозности и эквивалентного диаметра, а также рекомендации по выбору оптимальных конструктивных параметров применительно к трубчатой насадке с прямыми трубами и выносными коллекторами, составлена программа расчета на языке Pascal, т.е. выполнен расчет по формулам. В таблице 1 приведены расчетные данные конструктивных параметров для трубчатых насадок с прямыми трубами и выносными коллекторами и непрерывно соединенных труб.

Таблица 1. Сравнительные характеристики трубчатых насадок

Расчетные параметры	С прямыми трубами и выносными коллекторами [13]	Непрерывно соединенные трубы (наши данные)
Порозность в сечении аппарата $\varepsilon_0, \text{м}^2/\text{м}^2$	0,5	0,5
Объемная порозность $\varepsilon, \text{м}^3/\text{м}^3$	0,804	0,553
Эквивалентный диаметр $d_{эКВ}, \text{м}$	0,102	0,032

Как видно из таблицы, в аппарате с прямыми трубами и выносными коллекторами значения объемной порозности и эквивалентного диаметра выше, чем для аппарата из непрерывно соединенных труб. Это очевидно, так как в объеме аппарата из непрерывно соединенных труб присутствуют отводы, занимающие определенную часть свободного пространства.

Заключение

Рассмотрены конструкции аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры с внешним и внутренним расположением коллекторов, и на основе анализа их работы нами создан аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединенных труб одного диаметра внутри корпуса аппарата.

Основываясь на известном подходе движения газа по извилистым каналам, получены уравнения для расчета порозности трубчатой насадки из непрерывно соединенных труб в сечении аппарата, объемной порозности и эквивалентного диаметра, учитывающие конструктивные составляющие трубчатого пучка и шаги размещения труб в вертикальном и радиальном направлениях.

Проведено сопоставление расчетных данных конструктивных параметров для трубчатых насадок с прямыми трубами и выносными коллекторами из непрерывно соединенных труб, которые показали, что присутствие отводов в пучке из непрерывно соединенных труб приводит к снижению численных значений объемной порозности и эквивалентного диаметра за счет уменьшения свободного пространства контактной зоны.

Благодарность, конфликт интересов

Работа выполняется при поддержке грантового финансирования Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (проект No AP25794939). Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов.

Д.К. Камалбек – разработка концепции исследования, постановка задачи, получение расчетных зависимостей для определения конструктивных параметров трубчатой насадки, проведение вычислительных экспериментов, анализ результатов, подготовка первоначального варианта рукописи.

А.А. Волненко – научное руководство исследованием, формирование методологии расчета, теоретический анализ полученных зависимостей, критический пересмотр содержания статьи и утверждение окончательной версии рукописи.

А.А. Абжапбаров – выполнение расчетов по разработанной методике, обработка и интерпретация результатов вычислительных экспериментов, подготовка табличных материалов, редактирование текста статьи.

Д.К. Жумадуллаев – анализ существующих конструкций теплообменных аппаратов и патентных решений, обсуждение результатов исследования, проверка корректности инженерных расчетов, участие в подготовке и согласовании окончательной версии статьи.

Список литературы

1. Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Корганбаев Б.Н., Сарсенбекулы Д., Ешжанов А.А., Абжапбаров А.А. Теплообменные и пылеулавливающие аппараты с регулярной структурой трубчатой насадки. - Шымкент: Южно-Казахстанский университет им. М.О.Ауэзова, 2023. – 164 с. – монография.
2. Инновационный патент №27719, Республика Казахстан, МПК B01D 53/20, B01D 47/14. Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания/ А.А. Волненко, О.С. Балабеков, Б.Н. Корганбаев, Ж.Е. Хусанов, Н.С. Бекибаев; опубл. 18.12.13, Бюл. №12. – 4 с. – патент.
3. Инновационный патент №30217, Республика Казахстан. МПК B01D 53/20, B01D 47/14. Аппарат с насадкой для теплообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Балабеков О. С., Сарсенбекулы Д., Жумадуллаев Д.К., Корганбаев Б.Н.; заявитель и патентообладатель ЮКГУ им.М.Ауэзова. - № 2014/1176.1; заявл. 09.09.14; опубл. 17.08.15, Бюл. №8. – 4 с. – патент.
4. Инновационный патент №28151, Республика Казахстан, МПК F28F 1/42. Теплообменная труба / Волненко А.А., Голубев В.Г., Балабеков О.С., Бажиров Т.С., Хусанов Ж.Е., Жумадуллаев Д.К.; заявитель и патентообладатель ЮКГУ им.М.Ауэзова.- №2012/0374.1; заявл. 28.11.12; опубл. 17.02.2014, Бюл.№2.- 4 с. – патент.
5. Патент на полезную модель №2092 по заявке №2016/0474.2 от 25.08.2016г. МПК

- B01D 53/20, 47/14. Приоритет от 9.02.2016. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Бишимбаев В.К., Волненко А.А., Ескендиоров М.З., Протопопов А.В., Жантасов К.Т., Анарбаев А.А. Опубл. 30.03.17, бюл. №6. – патент.
6. Yeshzhanov A.A., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N. Calculation of hydrodynamic characteristics of combined apparatuses with a regular-suspended packing, *International Review of Mechanical Engineering*, 13(7), 382–389 (2019). – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i7.16645>.
 7. Issayeva A.N., Korganbayev B.N., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Jumadillayeva G.N. Calculation of Hydrodynamic Characteristics of Apparatus with Regular Tubular Packing, *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 23, 868-882 (2021) – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2021.059>.
 8. Патент РК № 34418 на изобретение по заявке №2017/0048.1 от 20.01.2017г. МПК B01J 2/04 (2006/1); B01J 19/32 (2006/1). Приоритет установлен 22.06.2018г. №22011 Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Балабеков О.С., Крганбаев Б.Н., Ескендиоров М.З., Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А., Байгутов Н.Т., Абжапбаров А.А. Бюл. №25 от 26.06.2020 г. – патент.
 9. Volnenko A.A., Abzhapbarov A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N., Kamalbek D.K. Calculation of Heat and Mass Transfer Characteristics and Dust Collection Parameters of a Shock-Vortex Apparatus with a Regular Tubular Packing, *International Review of Mechanical Engineering*, 16(6), 309-318 (2022). – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i6.22605>.
 10. Патент РК №36995 по заявке №2023/0587.1 от 07.09.2023г. МПК B01D 53/20 (2006.01), 47/14(2006.01). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Шамбилова А.С., Исмаилов Б.Р., Абжапбаров А.А., Крганбаев Б.Н., Нурымбетов Р.А. Опубл. 18.10.24, бюл. №42. – патент.
 11. Abzhapbarov A.A., Volnenko A.A., Kamalbek D.K., Zhidebayev Y.A., Zhumadullayev D.K. Calculation of Hydraulic Resistance of Various Types of Regular Hollow-Ring Beams in Heat-and-Mass Exchangers, *International Review of Mechanical Engineering*, 19(4), 182-193 (2025). – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v19i4.26191>.
 12. Рамм В.М. Абсорбция газов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656с. – книга.
 13. Сарсенбекулы Д. Методология расчета и проектирования аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2016. -143 с. – диссертация.
 14. Volnenko A.A., Balabekov O.S., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D. Purification apparatuses with new types of regular packings for chromium salts production // *Chemical Engineering Transactions*. 2015. Vol. 43. P. 1147–1152. – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1543192>.
 15. Yeshzhanov A.A., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N. Calculation of Hydrodynamic Characteristics of Combined Apparatuses with a Regular-Suspended Packing // *International Review of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 13, No. 7. P. 382–389. – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i7.16645>.

D.K. Kamalbek, A.A. Volnenko, A.A. Abzhapbarov, D.K. Zhumadullaev*

M.Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

Calculation of design parameters of the regular packing of heat and mass transfer apparatus from continuously connected pipes

Abstract. Designs of apparatuses with regular tubular packing and external or internal collector arrangements are considered. Based on an analysis of existing designs, an apparatus with regular packing made of continuously connected pipes of equal diameter was developed. The study aims to obtain calculation relationships for determining design parameters of tubular packing. Methodology is based on a known approach describing gas flow through tortuous channels formed by packing elements. Equations were derived for calculating cross-sectional porosity, volumetric porosity, and equivalent diameter, taking into account design parameters of the tubular bundle and tube spacing. Computational experiments were performed, and calculated data for packings with straight tubes and external collectors were compared with those for continuously connected pipes. Results showed that bends reduce volumetric porosity and equivalent diameter due to the reduction of free space in the contact zone. Obtained relationships can be applied in the calculation, design, and optimization of heat and mass transfer apparatuses with regular tubular packing.

Keywords: heat and mass transfer apparatus, regular tubular packing, bends, cross-sectional porosity, volumetric porosity, equivalent diameter, vertical pitch, radial pitch.

References

1. Volnenko A.A., Zhumadullaev D.K., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D., Eshzhanov A.A., Abzhapbarov A.A. Teplomassoobmennyye i pyleulavlivayushchiye apparaty s regul'yarnoy strukturoy trubchatoy nasadki [Heat and mass transfer and dust collection devices with a regular structure of tubular packing]. - Shymkent: South Kazakhstan University named after M.O. Auezov, 2023. - 164 p. [in Russian]
2. Innovative patent No. 27719 Republic of Kazakhstan, IPC B01D 53/20, B01D 47/14. Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with packing for heat and mass transfer and dust collection] / A.A. Volnenko, O.S. Balabaykov, B.N. Korganbaev, Zh.E. Khusanov, N.S. Bekibaev; publ. 18.12.13, Bull. №12. – 4 p. [in Russian]
3. Innovation patent №30217 Republic of Kazakhstan. IPC B01D 53/20, B01D 47/14. Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with packing for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Balabekov O.S., Sarsenbekuly D., Zhumadullaev D.K., Korganbaev B.N.; applicant and patent holder M.Auezov SKSU. - № 2014/1176.1; declared 09.09.14; published 17.08.15, Bulletin №8. – 4 p. [in Russian]
4. Innovative patent No. 28151 Republic of Kazakhstan, IPC F28F 1/42. Teploobmennaya truba [Heat exchange tube] / Volnenko A.A., Golubev V.G., Balabaykov O.S., Bazhirov T.S., Khusanov Zh.E., Zhumadullaev D.K.; applicant and patent holder M.Auezov SKSU. - No. 2012/0374.1; declared. 28.11.12; published. 17.02.2014, Bulletin No. 2. - 4 p. [in Russian]
5. Utility Model Patent No. 2092 for Application No. 2016/0474.2 dated 25.08.2016. IPC B01D 53/20, 47/14. Priority dated 9.02.2016. Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Bishimbayev V.K., Volnenko A.A., Yeskendirov M.Z., Protopopov A.V., Zhantasov K.T., Anarbayev A.A. Published 30.03.17, Bulletin No. 6. [in Russian]

6. Yeshzhanov A.A., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N. Calculation of hydrodynamic characteristics of combined apparatuses with a regular-suspended packing, *International Review of Mechanical Engineering*, 13(7), 382–389 (2019). DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i7.16645>.
7. Issayeva A.N., Korganbayev B.N., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Jumadillayeva G.N. Calculation of Hydrodynamic Characteristics of Apparatus with Regular Tubular Packing, *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 23, 868-882 (2021). DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2021.059>.
8. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 34418 for invention based on application No. 2017/0048.1 dated 20.01.2017. IPC B01J 2/04 (2006/1); B01J 19/32 (2006/1). Priority established on 22.06.2018. No. 22011 Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection]/ Volnenko A.A., Balabaykov O.S., Korganbaev B.N., Yeskendirov M.Z., Zhumadullaev D.K., Eshanov A.A., Baigutov N.T., Abzhapbarov A.A. Bull. №25 dated 26.06.2020. [in Russian]
9. Volnenko A.A., Abzhapbarov A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N., Kamalbek D.K. Calculation of Heat and Mass Transfer Characteristics and Dust Collection Parameters of a Shock-Vortex Apparatus with a Regular Tubular Packing, *International Review of Mechanical Engineering*, 16(6), 309-318 (2022). DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i6.22605>.
10. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 36995 for application No. 2023/0587.1 dated 09/07/2023. IPC B01D 53/20 (2006.01), 47/14 (2006.01). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Shambilova A.S., Ismailov B.R., Abzhapbarov A.A., Korganbaev B.N., Nurymbetov R.A. Published 10/18/24, Bulletin No. 42. [in Russian]
11. Abzhapbarov A.A., Volnenko A.A., Kamalbek D.K., Zhidebayev Y.A., Zhumadullayev D.K. Calculation of Hydraulic Resistance of Various Types of Regular Hollow-Ring Beams in Heat-and-Mass Exchangers, *International Review of Mechanical Engineering*, 19(4), 182–193 (2025). DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v19i4.26191>.
12. Ramm V.M. Absorbciya gazov. 2-e izd. pererab. i dop. [Absorption of gases. 2nd ed. reworked and additional] – M.: Chemistry, 1976. – 656 p. [in Russian]
13. Sarsenbekuly D. Metodologiya rascheta i proyektirovaniya apparatov s trubchatoy nasadkoy regul'yarnoy struktury [Methodology of calculation and design of devices with tubular packing of regular structure]: dis. ... doctor PhD. – Shymkent. 2016. -143 p. [in Russian]
14. Volnenko A.A., Balabekov O.S., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D. Purification apparatuses with new types of regular packings for chromium salts production // *Chemical Engineering Transactions*. 2015. Vol. 43. P. 1147–1152. – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1543192>.
15. Yeshzhanov A.A., Volnenko A.A., Zhumadullayev D.K., Korganbayev B.N. Calculation of Hydrodynamic Characteristics of Combined Apparatuses with a Regular-Suspended Packing // *International Review of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 13, No. 7. P. 382–389. – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i7.16645>.

Сведения об авторах:

Камалбек Д.К. – докторант, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана 5, 160012, Шымкент, Казахстан

Волненко А.А. – доктор технических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана 5, 160012, Шымкент, Казахстан

Абжапбаров А.А. – доктор PhD, доцент, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана 5, 160012, Шымкент, Казахстан

Жумадуллаев Д.К. – автор для корреспонденции, доктор PhD, доцент, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана 5, 160012, Шымкент, Казахстан,

Kamalbek D.K. – Doctoral student, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan

Volenko A.A. – Doctor of Technical Sciences, Professor, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan

Abzhapbarov A.A. – PhD, Associate Professor, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan

Zhumadullayev D.K. – Corresponding author, PhD, Associate Professor, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-257-272>

Повреждаемость режущих инструментов из TiCN-кермета при сухом высокоскоростном точении низколегированной стали AISI 4340

Д.С. Мырзалиев , **К.К. Бернадин** , **Н.Н. Рахымтай** 
О.Б. Сейдуллаева 

*Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова,
Шымкент, Казахстан*

*E mail: darkhan-m7@mail.ru, k_bernadin@mail.ru, saya_rakhumtay@mail.ru,
orynkul_s@mail.ru*

Аннотация. В данной статье рассматривается эффективность применения керамических металлических (керметовых) режущих инструментов на основе TiCN при высокоскоростной сухой обработке сталей. Также присутствует анализ современных исследований, в которых отмечаются высокая износостойкость и стабильность режущих характеристик керметов по сравнению с традиционными инструментами из твёрдого сплава и керамики. Основное внимание уделено термической стойкости, химической инертности и способности сохранять геометрию режущей кромки при повышенных температурах. С использованием программных комплексов Autodesk Nastran и Deform 3D выполнено численное моделирование напряжённо-деформированного состояния и температурного поля в инструменте и обрабатываемой заготовке из стали AISI 4340 при скорости резания 450 м/мин. Максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу в инструменте составило 769,2 МПа, температура достигала 1130 °С, что находится в пределах допустимых для TiCN. В зоне резания заготовки зафиксированы температуры до 934 °С и напряжения до 1350 МПа. Полученные результаты подтверждают возможность применения кермет-инструментов для высокоскоростной чистовой обработки. Расчёт износа на основе модели Усуи позволяет оценивать срок службы инструмента с учётом фактических термомеханических нагрузок. Проведённый анализ способствует уточнению представлений о рабочих характеристиках керметов и подтверждает целесообразность их использования в современных технологиях резания металлов.

Ключевые слова: инструменты кермета, TiCN, AISI 4340, сухая токарная обработка, высокоскоростное резание, симуляция резания

Введение

Повышенные требования к производительности современных технологий металлообработки стимулируют поиск новых конструкционных материалов для режущих инструментов, особенно тех, что способны сохранять эффективность в условиях высокоскоростной и сухой резки. На этом фоне особый интерес вызывает использование керметов на основе карбонитрида титана (TiCN), сочетающих в себе положительные свойства как металлов, так и керамики. Эти композиты характеризуются высокой твёрдостью, устойчивостью к термическим и механическим нагрузкам, а также химической инертностью, что делает их перспективными для чистовой обработки легированных сталей без применения охлаждающих жидкостей.

Актуальность представленного исследования обусловлена ограниченным количеством прикладных и экспериментальных работ, направленных на комплексное изучение поведения TiCN-керметов при высокоскоростной сухой обработке сталей, в частности стали марки AISI 4340. Несмотря на растущий интерес к безжидкостной резке в условиях экологических и экономических ограничений, многие аспекты износостойкости и устойчивости керметов по-прежнему остаются недостаточно изученными, что и определяет научную новизну и практическую значимость настоящей работы.

Объектом исследования является процесс высокоскоростной токарной обработки, легированной стали AISI 4340 без использования охлаждающих жидкостей. Предметом выступают особенности износа и повреждаемости режущих пластин из кермета TiCN.

Целью исследования является изучение эксплуатационных характеристик керметных инструментов при сухом резании с помощью моделирования напряжённо-деформированного состояния и температурных полей.

К основным задачам можно отнести:

- анализ научных публикаций по исследуемой тематике;
- проведение численного моделирования процесса резания с использованием программных комплексов;
- интерпретацию полученных результатов с последующей оценкой износа по модели Усуи.

Значимость работы заключается в возможности использовать полученные данные для совершенствования технологии высокоскоростной механической обработки и продления срока службы инструмента.

Обзор литературы

Результаты экспериментальных исследований последних лет указывают на перспективность TiCN-керметов в условиях сухой механической обработки сталей. Так, в работе В. Хи и соавторов выполнено сравнение керамики, карбидов и керметов при точении стали 42CrMo4. Выявлено, что керметные пластины характеризуются наименьшим уровнем износа и наибольшей стабильностью работы даже при изменении режимов резания.

Исследования R. Magalhães и коллег показали, что при точении стали AISI 1045 керметы демонстрируют постепенный абразивный износ, сохраняют геометрию режущей кромки и не способствуют образованию наростов, несмотря на значительные температуры, возникающие в зоне резания.

Обобщённый анализ свойств TiCN-керметов представлен в обзоре M. Elgazzar и соавт., где подчёркиваются высокая твёрдость при нагреве, стойкость к окислению, а также экономическая эффективность их применения. Также отмечено положительное влияние

различных технологических улучшений (нанопокрyтия, градиентные структуры и пр.) на износостойкость инструмента.

В работе T.Yang и коллег анализировались условия износа при точении высокоуглеродистой стали. Результаты показали, что увеличение скорости резания существенно сокращает срок службы керметного инструмента, изменяя преобладающий механизм износа с абразивного на адгезионный. Это подчёркивает важность подбора оптимальных режимов обработки.

Кроме того, A. Das и соавт. провели сравнительный анализ керметов и твердых сплавов при точении стали AISI 4340. Выводы подтвердили более низкое сопротивление резанию и меньшую интенсивность износа у TiCN-керметов, особенно при повышенных подачах.

Несмотря на наличие значительного числа работ, в литературе сохраняется дефицит системных исследований, сочетающих экспериментальные данные и численные симуляции с расчётами износа по эмпирическим моделям, что и обосновывает проведение данной работы.

Керметные режущие инструменты, в особенности на основе карбонитрида титана TiCN, рассматриваются как перспективная альтернатива традиционным инструментам из карбида вольфрама и керамики в высокопроизводительной обработке металлов. Эти материалы сочетают высокую твердость и износостойкость керамики с ударной вязкостью и теплопроводностью металлов, что делает их особенно подходящими для чистовой и получистовой обработки твёрдых и низколегированных сталей. Рост их популярности обусловлен требованиями промышленности к увеличению производительности, повышению стойкости инструмента и снижению необходимости применения охлаждающих жидкостей в экологически чувствительных условиях или при сухой обработке.

Ряд экспериментальных исследований подчёркивает значительный потенциал керметных инструментов в операциях сухого резания. Так, в исследовании сухого точения легированной стали 42 CrMo₄, В. Ху с соавторами провели сравнение керметов на основе TiCN с традиционными карбидными и керамическими (Si₃N₄) инструментами. Керметные инструменты продемонстрировали наибольший срок службы и наиболее стабильные показатели износа при всех режимах испытаний, характеризуясь постепенным абразивным износом и низкой адгезией стружки. В отличие от керамических и карбидных пластин, которые подвергались выраженному выкрашиванию, выкрашиванию кромок и отслоению покрытий, керметы сохраняли остроту режущих кромок и стабильность рабочих характеристик [1].

Это наблюдение подтвердили R. Magalhães с соавторами при сухом точении стали AISI 1045. Используя непокрытые керметные пластины на основе TiCN, исследователи установили, что скорость резания оказывала незначительное влияние на шероховатость поверхности, в то время как подача существенно влияла на качество поверхности и износ инструмента. Износ по задней поверхности происходил постепенно, носил преимущественно абразивный характер, при этом не наблюдалось существенного образования нароста. Несмотря на повышенные температуры, связанные с сухой обработкой, на детали не выявлено микротрещин или снижения твёрдости, что подтверждает термическую и структурную стабильность керметов в условиях сухого резания [2]. Обзор M. Elgazzar с соавторами подтвердил, что керметы на основе TiCN сочетают горячую твёрдость, износостойкость и экономичность при сухой обработке

низколегированных и закалённых сталей. Эти инструменты устойчивы к окислению и сохраняют режущую способность при температурах выше 900 °С, особенно в высокоскоростной чистовой обработке. Обзор также отметил эффективность наноструктурных покрытий, градиентных структур и текстурирования поверхности в улучшении рабочих характеристик [8].

T. Yang с соавторами [11] исследовали износ по задней поверхности и стойкость керметного инструмента (Ti,W)C–Mo₂C–Co при сухом точении высокоуглеродистой подшипниковой стали твёрдостью около 62 HRC. Стойкость инструмента была определена при ширине износа VB = 0,3 мм. При скорости резания 180 м/мин срок службы составил примерно 33 минуты. Увеличение скорости до 280 и 450 м/мин сократило срок службы соответственно на ~40% и ~75%, показывая чувствительность инструмента к скорости резания согласно модели Тейлора. На низких скоростях преобладал абразивный износ, на высоких – адгезионный. Переход механизмов износа подчёркивает важность оптимизации скорости резания [11].

A. Das с соавторами [12] выполнили сравнительный анализ обработки закалённой стали AISI 4340 (48 HRC) непокрытыми карбидными пластинами WC-Co и покрытыми керметными пластинами TiN в сухих условиях. Керметы стабильно демонстрировали меньшие силы резания и износ. Наибольшее влияние на износ у керметов оказывала подача, а у карбидных пластин – глубина резания. Результаты подтверждают высокую устойчивость керметов к термомеханическим нагрузкам, особенно при высокоскоростной сухой обработке [12].

Разнообразие экспериментальных данных по прогрессирующему износу, силам резания, шероховатости поверхности и механизмам разрушения керметных инструментов, представленное в исследованиях, формирует надёжную базу для проведения симуляционных исследований с использованием специализированных программных пакетов, таких как Nastran и Deform3D. Представленные результаты демонстрируют, что керметные инструменты на основе TiCN и других карбидных соединений эффективны в различных условиях сухой и устойчивой обработки твёрдых и жаропрочных сплавов. Они способны обеспечивать баланс между долговечностью, качеством обрабатываемой поверхности и производительностью благодаря различным подходам к улучшению структуры материала, включая применение функционально-градиентных конструкций, наноструктурированных покрытий и оптимизации параметров резания. Полученные экспериментальные данные могут использоваться для верификации конечных элементных моделей температурных полей, концентраций напряжений и прогнозирования износа инструмента, способствуя разработке более совершенных и долговечных инструментов.

Методология

Выдвигаемая гипотеза предполагает, что инструменты из TiCN-кермета способны сохранять высокие эксплуатационные характеристики даже при воздействии экстремальных тепловых и механических нагрузок.

Методология исследования основана на применении численных методов моделирования (Autodesk Nastran и Deform 3D), анализе контактных напряжений и температурных полей, а также на эмпирическом моделировании процессов износа. TiCN – керметы известны формированием микроструктуры «ядро–оболочка» во время спекания: керамические зерна имеют ядра, богатые TiC, окруженные оболочками из TiCN-Me

композита (где $Me = W, Mo$ и др. из добавок) [16]. Эта структура, в сочетании с кобальтовой или никелевой связкой, обеспечивает кермету хорошее сочетание твердости и прочности.

В целом, TiCN-керметы более химически инертны по отношению к сталям, чем карбиды WC-Co, поэтому они менее подвержены диффузионному износу (образованию кратеров) и устойчивы к образованию наростов на режущей кромке. Эти свойства делают их идеальными для высокоскоростной чистовой обработки легированных сталей, где они могут достигать отличного качества поверхности при высоких скоростях резания.

Несмотря на свою керамическую составляющую, TiCN-керметы сохраняют умеренную прочность при высокой твердости и жесткости. Основные механические свойства включают: модуль Юнга 400–450 ГПа, твердость 14–16 ГПа по Виккерсу ($\approx$ HRA 90–93), коэффициент трещиностойкости (K_{Ic}): 8–10 МПа для высокотвердых сортов [18].

TiCN-керметы имеют тепловые характеристики, промежуточные между металлами и керамикой. Их теплопроводность значительно ниже, чем у карбида вольфрама из-за фазы TiC/TiN. Например, типичный кермет показывает $\sim 30\text{--}35$ Вт/м·К теплопроводности при комнатной температуре, по сравнению с $\sim 100\text{--}110$ Вт/м·К для WC-Co твердого сплава. Эта низкая теплопроводность означает, что тепло резания склонно оставаться около режущей кромки, что может повысить температуру резания (керметовые вставки часто полагаются на свою горячую твердость и покрытия).

В целом, эти тепловые свойства (низкая теплопроводность, умеренная теплоемкость и среднее расширение) должны учитываться при моделировании и выборе скоростей резания и охлаждения: керметовые инструменты часто работают всухую на высоких скоростях, чтобы тепло уносилось стружкой, а не проводилось в вставку.

Износостойкость является главным преимуществом TiCN-керметов при чистовой обработке. Твердые частицы TiC/TiN обеспечивают превосходную стойкость к абразивному износу и высокую горячую твердость, благодаря чему режущая кромка остается острой даже при высоких температурах. Не менее важна химическая стабильность TiCN, которая уменьшает кратерный износ и сцепление с обрабатываемым материалом – что означает меньший износ по задней поверхности и практически отсутствие наростов при обработке сталей. Это приводит к лучшей чистоте поверхности и более стабильному сроку службы инструмента.

Это показывает, как керметы превосходят при высокоскоростной, легкой чистовой обработке: они обеспечивают длительный срок службы и снижают силы резания (благодаря низкому коэффициенту трения по металлам), если резание не является прерывистым или ударным [24].



Рисунок 1. а) 3D Модель державки; б) 3D Модель режущей пластины

Тем не менее, ограничивающим фактором остается прочность – керметы склонны к скалыванию при высоких нагрузках или вибрациях.

Таблица 1. Используемые показатели для симуляции

Параметр	Значение	Примечания
Инструмент	DCGX-FL	Пластина из кермета, тип FL, R = 0.3 мм,
Материал заготовки	Низколегированная сталь	AISI 4340
Операция	Чистовая обработка	
Сила резания	300	N
Скорость резания	450 м/мин	V _c
Глубина резания	1 мм	t
Подача	0.1 мм/об	f

Этапы исследования

В настоящем исследовании проводится оценка износостойкости и долговечности режущих инструментов из керметов при высокой скорости резания с целью анализа их эксплуатационных характеристик в сравнении с режущими пластинами, изготовленными из других материалов.

Таблица 2. Параметры режущей пластины - DCGX-FL-437 960

Параметр	Значение
Тип	FL
Форма	Ромбическая (55°)
Угол свободного выхода	7° положительный
Точность	G (средняя)
Описанная окружность (IC)	11 мм
Толщина	3 мм
Радиус скругления (R)	0.03 мм
Применение	Тонкое точение
Материал	TiCN

Рекомендуется использовать их для непрерывной чистовой и получистовой обработки легированных сталей, инструментальных сталей, чугуна и т.д., где их превосходная износостойкость дает наилучшие результаты. Покрытия (TiN, TiAlN и др.) на керметах дополнительно увеличивают срок службы инструмента, улучшая износостойкость и устойчивость к окислению, особенно при обработке материалов (например, нержавеющей сталей), которые могут реагировать со связкой.

Исследование основано на результатах компьютерного моделирования процесса резания с использованием программных комплексов Deform 3D и Autodesk Nastran, а также расчетах, выполненных с применением общепринятых аналитических методик и моделей прогнозирования износа инструмента.

Для эксперимента взята режущая пластина из кермета без покрытия марки DIAMETAL.

Пластина DCGX-FL изготовлена из титаново-карбонитридного (TiCN) кермета-композита, состоящего из керамических твердых фаз в металлической связке. Согласно данным Diametal, этот кермет содержит примерно 50% твердых фаз TiC/TiN, около 16% WC (добавленного для улучшения прочности) и около 10–12% металлической связки (Co и/или Ni). Остальная часть включает другие карбиды (такие как Mo₂C, TaC), используемые для улучшения микроструктуры. Данная пластина и подходящая для симуляции державка были смоделированы в программном обеспечении Autodesk Inventor (Рисунок 1).

Таблица 3. Характеристики материала пластины используемые в симуляции

Параметр	Значение	Единица измерения
Плотность (ρ)	7.2×10^{-6}	т/мм ³
Коэффициент демпфирования (GE)	0.02	-
Референсная температура (TREF)	293	К (Кельвин)
Модуль упругости (E)	4.8×10^5	МПа
Модуль сдвига (G)	1.92×10^5	МПа (расчетное)
Коэффициент Пуассона (ν)	0.25	-
Коэффициент теплового расширения (α)	9.5×10^{-6}	К
Предел прочности при растяжении (ST)	1500	МПа
Предел прочности при сжатии (SC)	4000	МПа
Предел прочности при сдвиге (SS)	1200	МПа
Предел текучести (SY)	1200	МПа
Теория отказа	Напряжение фон Мизеса	

Входные данные для симуляции определены на основе заданных условий резания, геометрических параметров державки и характеристик режущей пластины. В таблице 1 представлены параметры симуляции чистовой обработки низколегированной стали AISI 4340, в таблице 2 — геометрические и физико-механические характеристики используемой в симуляции режущей пластины DCGX-FL-437 960, включая угол свободного выхода, радиус скругления и толщину. В первую очередь, для анализа напряженно-деформированного состояния режущего инструмента используется программный комплекс Autodesk Nastran.

Ключевым параметром для оценки прочности и долговечности инструмента является эквивалентное напряжение по критерию фон Мизеса (von Mises stress), поскольку именно этот критерий наиболее точно отражает интенсивность напряжений при сложных нагрузках, характерных для процесса резания – подробные настройки представлены в Таблице 3.

Важным этапом подготовки модели является создание расчетной сетки конечных элементов. В ходе работы была создана специальная адаптированная расчетная сетка с повышенной плотностью элементов в зонах, наиболее подверженных концентрации напряжений (закругления режущих кромок и зоны резания). В этих критических областях

сетка была дополнительно настроена вручную для достижения более точных результатов.

Следующим шагом является применение корректных граничных условий и нагрузок на модель инструмента. Для вычисления напряжений по фон Мизесу необходимо задать действующие на инструмент силы резания. Основная сила, влияющая на интенсивность напряжений, — тангенциальная сила резания (F_t), направленная вдоль скорости резания и обозначаемая в расчетной модели как F_x . Перед расчетом напряжений необходимо сперва определить значение данной силы. Для токарной обработки радиальная и осевая силы составляют долю от тангенциальной силы. Для керметного инструмента при чистовой обработке используем следующие показатели: радиальная сила (F_r) – 90 Н, осевая сила (F_a) – 60 Н. Тангенциальное направление (направление скорости резания, F_t) – 300 Н, Радиальное направление (от заготовки) F_y – 90 Н, Осевое направление (вдоль оси инструмента) F_z – 60 Н.

Результаты и обсуждение

Проведенная численная симуляция в Autodesk Nastran показала, что максимальное эквивалентное напряжение по фон Мизесу, возникающее в инструменте при заданных условиях резания составило 769.2 МПа (Рисунок 2).

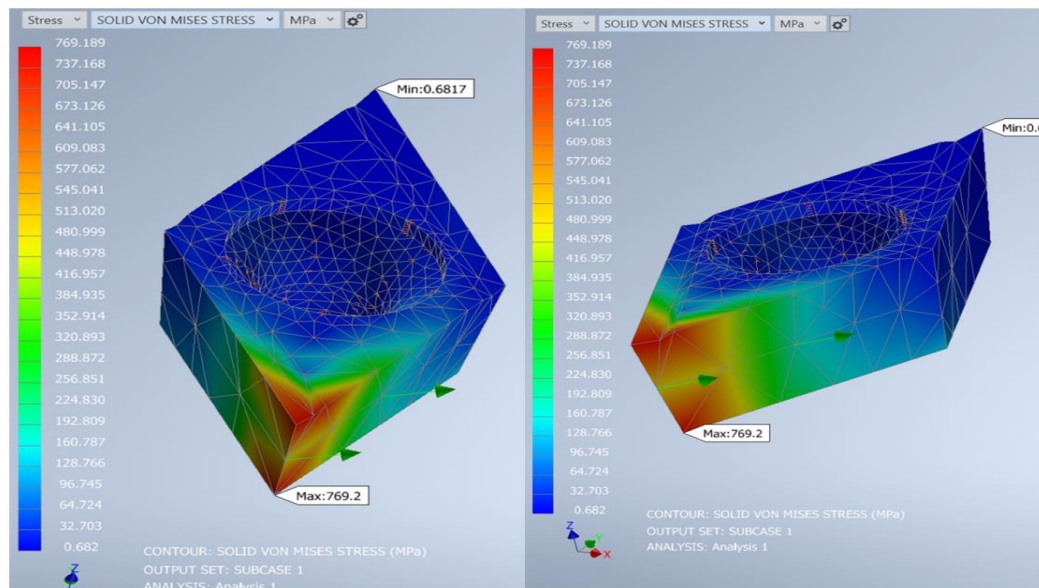


Рисунок 2. Визуализация симуляции в Autodesk Nastran, показывающая распределение напряжения инструмента по фон Мизесу

Данное значение напряжения сосредоточено преимущественно в области режущей кромки пластины, что согласуется с ожидаемыми результатами, так как максимальная нагрузка приходится именно на эту зону. При удалении от режущей кромки наблюдается значительное снижение напряжений, достигая минимальных значений, близких к нулю, в наиболее удаленных от зоны резания участках инструмента. Полученные результаты свидетельствуют о том, что инструмент из керметного материала (TiCN кермет) способен эффективно рассеивать и выдерживать возникающие в процессе резания напряжения, сохраняя свою структурную целостность и работоспособность.

Для оценки поведения обрабатываемого материала (низколегированная сталь AISI 4340) и образующейся в процессе резания стружки была проведена симуляция с

использованием программного комплекса DEFORM-3D. Основными параметрами анализа являлись распределение температур и напряжений в зоне резания.

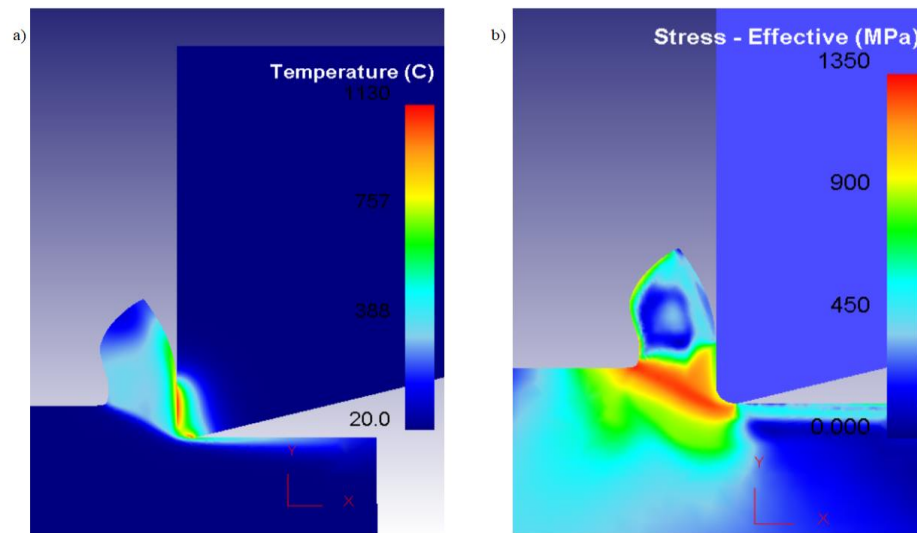


Рисунок 3. Визуализация симуляции в Deform 3D, показывающая показатели температуры и напряжения в зоне контакта для инструмента и заготовки.

а) Температурные показатели зоны контакта; б) Показатели эквивалентного напряжения зоны контакта.

На Рисунке 3 и в Таблице 4, в дополнение к визуализации распределения температуры и напряжения, изображены показатели, полученные в результате численного моделирования: максимальная температура заготовки в зоне контакта, составила 944 °С, режущего инструмента – 1130 °С; максимальное эквивалентное напряжение по фон Мизесу в обрабатываемой детали на заготовке достигло 1350 МПа. Наибольшие значения температуры и напряжений локализуются непосредственно в зоне образования стружки, что является типичным для процесса высокоскоростного резания и подтверждает достоверность полученных результатов.

Таблица 4. Показатели полученные в результате симуляций

Параметр	Температура (°C)	Напряжение (МПа)
Инструмент (DCGX)	1130	769.2
Заготовка (AISI-4340)	934	1350

В результате проведённой симуляции установлено, что при скорости резания 450 м/мин инструмент сохраняет работоспособность, несмотря на сокращённый срок службы вследствие интенсивного износа. Керметы на основе TiCN способны выдерживать температуры до 1200 °С и напряжения до 1700 МПа до начала существенной деградации или разрушения. Аналогично, температурная нагрузка на обрабатываемую заготовку не превышает критических значений: допустимый предел температуры на поверхности составляет порядка 1000 °С, а предел текучести закалённой стали AISI 4340 – 1500 МПа.

Для расчёта предельного времени износа инструмента в данном исследовании мы используем модель Усуи. Модель Усуи (Usui model) — это эмпирическая модель, применяемая для количественной оценки износа режущего инструмента, особенно в

условиях металлорежущих процессов. Данный её вариант позволяет рассчитывать скорость износа на задней поверхности инструмента, основываясь на механических и тепловых нагрузках, действующих в зоне резания.

$$\frac{dVB}{dt} = C \times (\tau \times V)^n \times \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Коэффициент C в модели Усуи является агрегированным параметром, который компенсирует неучтённые эффекты, такие как абразивный и адгезионный износ. В данном случае значение $C=28.0$ косвенно учитывает эти механизмы.

Таблица 5. Обозначения переменных для расчётов по модели Усуи

dVB/dt	Скорость износа по задней поверхности.		Искомое
C	Коэффициент износа (калибруется экспериментально).	28	типовое значение для TiCN-керметов, откалиброванное для скорости в 450 м/мин
τ	Касательное напряжение на контакте инструмента и стружки. В данных условиях 50% от нормального напряжения.	384.6 МПа	-
V	Относительная скорость скольжения (м/с)	7.5 м/с	(из 450 м/мин)
n	Эмпирический показатель степени	1	принятое значение для TiCN
Q	Активационная энергия (Дж/моль)	180000 Дж/моль	типовое значение для TiCN
R	Газовая постоянная	8.314 Дж/моль·К	-
T	Температура на границе резания (К)	1148 К	875°C из симуляции

Расчётное значение C критически зависит от точности определения касательного напряжения и температуры и было получено путём калибровки модели под наблюдаемые скорости износа при сухом резании на высокой скорости (450 м/мин). С учетом этого показателя, мы получаем следующие вычисления:

$$\begin{aligned} \exp\left[\frac{-Q}{RT}\right] &= \exp\left(\frac{-180000}{8.314 \times 1148}\right) = \\ &= \exp(-18.86) = e^{-18.86} = 6.0 \times 10^{-9} \\ \frac{dVB}{dt} &= 28 \times (384.6 \times 7.5)^1 \times 6.0 \times 10^{-9} = \\ &= 28 \times 17307 \times 6.0 \times 10^{-9} = 4.86 \times 10^{-4} \text{ мм/с} \end{aligned}$$

В результате проведённых расчётов была определена скорость износа инструмента по задней поверхности (мм/с).

Зная это значение, можно рассчитать время до достижения критического износа по формуле:

$$t = \frac{V_b}{\frac{dV_b}{dt}},$$

где V_b - средняя ширина износа по задней поверхности. Согласно стандарту ISO 3685, критическим считается значение $V_b = 0,3$ мм.

$$t = \frac{0.3}{4.86 \times 10^{-4}} = 619 \text{ секунд} = 10.3 \text{ минут}$$

Таким образом, при заданных условиях резания инструмент достигает предельного износа за указанное время.

Заключение

В результате проведённого анализа установлено, что режущие пластины из TiCN-кермета являются более предпочтительными для высокоскоростной сухой обработки по сравнению с инструментами, изготовленными из других распространённых материалов, таких как быстрорежущая сталь и твёрдые сплавы. Керметы демонстрируют устойчивую работу даже в условиях интенсивных термических и механических нагрузок, характерных для обработки легированных сталей на повышенных скоростях. Это обусловлено совокупностью эксплуатационных свойств материала, в частности его высокой термостойкостью, стойкостью к износу и химической инертностью. Основные преимущества использования керметов представлены ниже.

1. Высокая термостойкость и износостойкость керметов.

Керметы обладают высокой твердостью при повышенных температурах, что делает их особенно эффективными при высокоскоростной обработке. В отличие от HSS, которая теряет твердость при температурах выше 600 °С, керметы сохраняют свои механические свойства при температурах до 1000 °С и выше. Это позволяет использовать керметы при более высоких скоростях резания, снижая при этом износ инструмента и повышая производительность обработки.

2. Низкий коэффициент трения и улучшенное качество поверхности.

Керметы характеризуются низким коэффициентом трения, что способствует снижению тепловыделения в зоне резания и уменьшению прилипания материала заготовки к инструменту. Это приводит к улучшению качества обрабатываемой поверхности и снижению вероятности образования наростов на режущей кромке. В сравнении с WC-Co, керметы обеспечивают более чистую обработку при высоких скоростях резания, особенно при чистовой обработке сталей.

3. Повышенная стойкость к химическому износу.

Керметы обладают высокой химической инертностью, что снижает вероятность диффузионного износа при обработке труднообрабатываемых материалов. Это особенно важно при сухой обработке, где отсутствует охлаждающая жидкость, и инструмент подвергается воздействию высоких температур и агрессивных сред. В таких условиях керметы демонстрируют лучшую стойкость по сравнению с HSS и WC-Co.

В заключение, использование керметов в качестве режущего инструмента при высокоскоростной обработке обеспечивает ряд преимуществ, включая высокую термостойкость, низкий коэффициент трения, улучшенное качество поверхности и повышенную стойкость к химическому износу. Чрезмерные скорости резания и подачи приводят к ускоренному износу инструмента и снижению качества обработанной поверхности. В связи с этим рекомендуется использовать режимы резания, обеспечивающие увеличенный ресурс инструмента и более высокое качество поверхности, с пониженными скоростями резания (около 90 м/мин) и подачей (меньше 0.1 мм/об) – это позволит продлить время предельного износа до 40 и более минут работы инструмента.

Вклад авторов.

Д.С.Мырзалиев, К.К.Бернадин – разработка концепции статьи; написание текста и/или его критический пересмотр; утверждение финальной версии статьи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты работы, включая проверку и устранение возможных проблем, связанных с достоверностью данных и целостностью содержания.

О.Б.Сейдуллаева, Н.Н.Рахымтай – значительный вклад в сбор анализ и интерпретация результатов исследования; регистрацию, обработку, анализ, визуализацию и оформление данных; участие в обеспечении финансирования исследования.

Список литературы

1. Xu B, Liu X, Li C, Huang H. Cutting performance of tools made of different materials in the machining of 42CrMo4 high-strength steel: a comparative study. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017;93:2061–9. doi.org/10.1007/s00170-017-0666-6
2. Magalhães R, Santos LF, da Silva CA. Tool wear effect on surface integrity in AISI 1045 steel dry turning. *Materials.* 2022;15(6):2031. doi.org/10.3390/ma15062031
3. Zhou Z, Zhang Y, Liu W. Unraveling the wear mechanism of Ti(C, N)-based cermet tools during high-speed cutting. *SSRN.* 2024. doi.org/10.2139/ssrn.4792020
4. Cui C, Wang J, Li S. Wear mechanisms and crack-healing mechanisms of TiCN-(W,Ti)C-TiSi₂ gradient cermet tool in dry turning of 17-4PH stainless steel. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2025;130:107153. doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2025.107153
5. Li J, Fu S, Wang Y. Study on serrated chip formation and tool wear of cermet tools for milling stainless steel 3Cr13Cu. *Int J Adv Manuf Technol.* 2015;77:461–7. doi.org/10.1007/s00170-014-6476-1
6. Das D, Maity P, Bandyopadhyay A. Experimental investigation of various machining attributes and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with untreated and cryo treated cermet inserts. *Mech Ind.* 2020;21:110. doi.org/10.1051/meca/2019082
7. Lác T, Pánek M, Mucha M. Tool life experiment of coated cermet during nodular cast iron turning. *Int J Adv Manuf Technol.* 2024;133:1129–41. doi.org/10.1007/s00170-024-13741-2
8. Elgazzar M, Ramesh K, Qasim B. A critical review of high-temperature tribology and cutting performance of cermet and ceramic tool materials. *Lubricants.* 2023;11(3):122. doi.org/10.3390/lubricants11030122
9. Sarjana SS, Bencheikh I, Nouari M, Ginting A. Study on cutting performance of cermet tool in turning of hardened alloy steel. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2020;91:105255. doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105255

10. Şirin Ş. Investigation of the performance of cermet tools in the turning of Haynes 25 superalloy under gaseous N₂ and hybrid nanofluid cutting environments. *J Manuf Process.* 2022;76:428–43. doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.029
11. Yang T, Ni L, Xiong J, Shi R, Zheng Q. Flank wear mechanism and tool endurance of (Ti,W)C–Mo₂C–Co cermets during dry turning. *Ceram Int.* 2018;44:8447–55. doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.040
12. Das A, Mukhopadhyay A, Patel SK, Biswal BB. Comparative assessment on machinability aspects of AISI 4340 alloy steel using uncoated carbide and coated cermet inserts during hard turning. *Arab J Sci Eng.* 2016;41:4531–52. doi.org/10.1007/s13369-016-2160-0
13. Zheng G, Li L, Li Z, Gao J, Niu Z. Wear mechanisms of coated tools in high-speed hard turning of high strength steel. *Int J Adv Manuf Technol.* 2018;94:4553–63. doi.org/10.1007/s00170-017-1132-1
14. Reis BC, dos Santos AJ, dos Santos NP, Câmara MA, de Faria PE, Abrão AM. Cutting performance and wear behavior of coated cermet and coated carbide tools when turning AISI 4340 steel. *Int J Adv Manuf Technol.* 2019;105:1655–63. doi.org/10.1007/s00170-019-04392-9
15. Ji W, Zou B, Zhang S, Xing H, Wang Y. Design and fabrication of gradient cermet composite cutting tool, and its cutting performance. *J Alloys Compd.* 2018;732:25–31. doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.187
16. Heydari L, Lietor PF, Corpas-Iglesias FA, Laguna OH. TiCN and WC-based cermets: a review of synthesis, properties and applications in additive manufacturing. *Materials.* 2021;14(22):6786. doi.org/10.3390/ma14226786
17. Qin Y, Zhang Z, Liang W, Tian Y, Ma J. Study on the effect of temperature and pressure environments on the mechanical and electronic properties of titanium carbon nitride ceramics. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2025;17(1):1556–64. doi.org/10.1021/acsami.4c16864
18. Verma V. Sliding wear behavior of TaC-containing Ti(CN)-WC-Ni/Co cermets. *Int J Appl Ceram Technol.* 2016;13:41–8. doi.org/10.1111/ijac.12430
19. Gao J, Song J, Lv M. Microstructure and mechanical properties of TiC_{0.7}N_{0.3}-HfC-WC-Ni-Mo cermet tool materials. *Materials.* 2018;11(6):968. doi.org/10.3390/ma11060968
20. Yan D, Xu G, Yao Z, Liu H, Chen Y. Synergistic effect of SiC particles and whiskers on the microstructures and mechanical properties of TiCN-based cermets. *Materials.* 2022;15(6):2080. doi.org/10.3390/ma15062080
21. Wilzer J, Windmann M, Weber S, Hill H. Thermal conductivity of advanced TiC reinforced metal matrix composites for polymer processing applications. *J Compos Mater.* 2013;49(2):243–50. doi.org/10.1177/0021998313516143
22. Ishida T, Moriguchi H, Ikegaya A. Development of cemented carbide tool of reduced rare metal usage. *SEI Tech Rev.* 2011;(73):55–61.
23. KYOCERA SGS Precision Tools Group. Finishing steel faster: cermet vs. carbide, uncoated vs. coated [Internet]. 2024 Jan [cited 2025 Jun 21]. Available from: <https://www.kyocera-sgstool.com>
24. Jose SA, John M, Menezes PL. Cermet systems: synthesis, properties, and applications. *Ceramics.* 2022;5(2):210–36. doi.org/10.3390/ceramics5020018

D.S. Myrzaliyev, K.K. Bernadin, N.N. Rakhymtay, O.B. Seidullayeva

M.Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan

Damage behavior of TiCN cermet cutting tools during dry high-speed turning of low-alloy steel AISI 4340

Abstract. This paper examines the performance of TiCN-based cermet cutting tools in high-speed dry machining of steels. It also provides an overview of recent research highlighting the superior wear resistance and stable cutting performance of cermets compared to conventional carbide and ceramic tools. Particular attention is given to their thermal stability, chemical inertness, and ability to maintain cutting-edge geometry at elevated temperatures. Numerical simulations of the stress-strain state and thermal field in the cutting tool and AISI 4340 steel workpiece were conducted using Autodesk Nastran and Deform 3D software. At a cutting speed of 450 m/min, the maximum von Mises equivalent stress in the tool reached 769.2 MPa, while the temperature rose to 1130 °C, which remains within the acceptable limits for TiCN-based cermets. In the cutting zone of the workpiece, temperatures up to 934 °C and stresses up to 1350 MPa were observed. The results confirm the feasibility of employing cermet tools for high-speed finishing operations. Tool wear was estimated using the Usui wear model, enabling a realistic assessment of tool life under actual thermomechanical loads. The analysis clarifies the operational characteristics of cermets and supports their application in modern metal cutting technologies.

Keywords: cermet cutting tools, TiCN, AISI 4340, dry turning, high-speed machining, cutting simulation

References

1. Xu B, Liu X, Li C, Huang H. Cutting performance of tools made of different materials in the machining of 42CrMo4 high-strength steel: a comparative study. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017;93:2061–9. doi.org/10.1007/s00170-017-0666-6
2. Magalhães R, Santos LF, da Silva CA. Tool wear effect on surface integrity in AISI 1045 steel dry turning. *Materials.* 2022;15(6):2031. doi.org/10.3390/ma15062031
3. Zhou Z, Zhang Y, Liu W. Unraveling the wear mechanism of Ti(C, N)-based cermet tools during high-speed cutting. *SSRN.* 2024. doi.org/10.2139/ssrn.4792020
4. Cui C, Wang J, Li S. Wear mechanisms and crack-healing mechanisms of TiCN-(W,Ti)C-TiSi₂ gradient cermet tool in dry turning of 17-4PH stainless steel. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2025;130:107153. doi.org/10.1016/j.jirmhm.2025.107153
5. Li J, Fu S, Wang Y. Study on serrated chip formation and tool wear of cermet tools for milling stainless steel 3Cr13Cu. *Int J Adv Manuf Technol.* 2015;77:461–7. doi.org/10.1007/s00170-014-6476-1
6. Das D, Maity P, Bandyopadhyay A. Experimental investigation of various machining attributes and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with untreated and cryo treated cermet inserts. *Mech Ind.* 2020;21:110. doi.org/10.1051/meca/2019082
7. Lánc T, Pánek M, Mucha M. Tool life experiment of coated cermet during nodular cast iron turning. *Int J Adv Manuf Technol.* 2024;133:1129–41. doi.org/10.1007/s00170-024-13741-2
8. Elgazzar M, Ramesh K, Qasim B. A critical review of high-temperature tribology and cutting

- performance of cermet and ceramic tool materials. *Lubricants*. 2023;11(3):122. doi.org/10.3390/lubricants11030122
9. Sarjana SS, Bencheikh I, Nouari M, Ginting A. Study on cutting performance of cermet tool in turning of hardened alloy steel. *Int J Refract Met Hard Mater*. 2020;91:105255. doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105255
 10. Şirin Ş. Investigation of the performance of cermet tools in the turning of Haynes 25 superalloy under gaseous N₂ and hybrid nanofluid cutting environments. *J Manuf Process*. 2022;76:428–43. doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.029
 11. Yang T, Ni L, Xiong J, Shi R, Zheng Q. Flank wear mechanism and tool endurance of (Ti,W)C–Mo₂C–Co cermets during dry turning. *Ceram Int*. 2018;44:8447–55. doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.040
 12. Das A, Mukhopadhyay A, Patel SK, Biswal BB. Comparative assessment on machinability aspects of AISI 4340 alloy steel using uncoated carbide and coated cermet inserts during hard turning. *Arab J Sci Eng*. 2016;41:4531–52. doi.org/10.1007/s13369-016-2160-0
 13. Zheng G, Li L, Li Z, Gao J, Niu Z. Wear mechanisms of coated tools in high-speed hard turning of high strength steel. *Int J Adv Manuf Technol*. 2018;94:4553–63. doi.org/10.1007/s00170-017-1132-1
 14. Reis BC, dos Santos AJ, dos Santos NP, Câmara MA, de Faria PE, Abrão AM. Cutting performance and wear behavior of coated cermet and coated carbide tools when turning AISI 4340 steel. *Int J Adv Manuf Technol*. 2019;105:1655–63. doi.org/10.1007/s00170-019-04392-9
 15. Ji W, Zou B, Zhang S, Xing H, Wang Y. Design and fabrication of gradient cermet composite cutting tool, and its cutting performance. *J Alloys Compd*. 2018;732:25–31. doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.187
 16. Heydari L, Lietor PF, Corpas-Iglesias FA, Laguna OH. TiCN and WC-based cermets: a review of synthesis, properties and applications in additive manufacturing. *Materials*. 2021;14(22):6786. doi.org/10.3390/ma14226786
 17. Qin Y, Zhang Z, Liang W, Tian Y, Ma J. Study on the effect of temperature and pressure environments on the mechanical and electronic properties of titanium carbon nitride ceramics. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2025;17(1):1556–64. doi.org/10.1021/acsami.4c16864
 18. Verma V. Sliding wear behavior of TaC-containing Ti(CN)-WC-Ni/Co cermets. *Int J Appl Ceram Technol*. 2016;13:41–8. doi.org/10.1111/ijac.12430
 19. Gao J, Song J, Lv M. Microstructure and mechanical properties of TiC_{0.7}N_{0.3}-HfC-WC-Ni-Mo cermet tool materials. *Materials*. 2018;11(6):968. doi.org/10.3390/ma11060968
 20. Yan D, Xu G, Yao Z, Liu H, Chen Y. Synergistic effect of SiC particles and whiskers on the microstructures and mechanical properties of TiCN-based cermets. *Materials*. 2022;15(6):2080. doi.org/10.3390/ma15062080
 21. Wilzer J, Windmann M, Weber S, Hill H. Thermal conductivity of advanced TiC reinforced metal matrix composites for polymer processing applications. *J Compos Mater*. 2013;49(2):243–50. doi.org/10.1177/0021998313516143
 22. Ishida T, Moriguchi H, Ikegaya A. Development of cemented carbide tool of reduced rare metal usage. *SEI Tech Rev*. 2011;(73):55–61.
 23. KYOCERA SGS Precision Tools Group. Finishing steel faster: cermet vs. carbide, uncoated vs. coated [Internet]. 2024 Jan [cited 2025 Jun 21]. Available from: <https://www.kyocera->

sgstool.com

24. Jose SA, John M, Menezes PL. Cermet systems: synthesis, properties, and applications. *Ceramics*. 2022;5(2):210–36. doi.org/10.3390/ceramics5020018

Сведени об авторах:

Мырзалиев Дархан Сапарбаевич – к.т.н., доцент, факультет механики и нефтегазового дела, НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», Шымкент, 160016, Республика Казахстан.

Бернадин Кафис – магистрант по ОП «Машиностроение», факультет механики и нефтегазового дела, НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», Шымкент, 160016, Республика Казахстан

Рахымтай Нурсая – докторантка по ОП «Машиностроение», факультет механики и нефтегазового дела, НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», Шымкент, 160016, Республика Казахстан.

Сейдуллаева Орынгул Бахытовна – автор для корреспонденции, докторант по ОП «Машиностроение», факультет механики и нефтегазового дела, НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», Шымкент, 160016, Республика Казахстан.

Myrzaliyev Darkhan Saparbaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan

Bernadin Kafis – Master's student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan

Rakhymtay Nursaya – Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan

Seidullayeva Oryngul Bakhytkyzy – corresponding author, Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Влияние времени низкотемпературного ионно-плазменного азотирования на трибомеханические свойства мартенситной нержавеющей стали 30X13

К.Д.Орманбеков^{*1} , З.С.Сатбаева^{1,2} , Д.Р.Орынбеков¹ , В.Н.Коц¹ 

¹НАО «Шәкәрім университет», Семей, Казахстан

²ТОО «Plasma Science», Усть-Каменогорск, Казахстан

E mail: kuanysh.dauletson@gmail.com, satbaeva.z@mail.ru, d.orynbekov@shakarim.kz, kotvladislav1@gmail.com

Аннотация. В работе исследовано влияние продолжительности низкотемпературного ионно-плазменного азотирования на микроструктуру, фазовый состав и функциональные свойства мартенситной нержавеющей стали 30X13. Образцы обрабатывали при 400 °С в течение 3, 4 и 5 ч в атмосфере диссоциированного аммиака. На основе данных рентгенофазового анализа, измерения микротвердости по Виккерсу, а также трибологических и коррозионных испытаний установлены закономерности структурной эволюции и определена их связь с трибологическими характеристиками. С увеличением времени азотирования последовательно формируются расширенный мартенсит α' N, нитриды γ' -Fe₄N и ε -Fe₂-3N, а при 5 ч наблюдаются признаки образования CrN и обеднения поверхности хромом. Режим азотирования в течение 4 ч обеспечивает благоприятное сочетание структурной однородности и функциональных свойств. Поверхностная микротвердость возрастает до 948 HV, коэффициент трения снижается до 0,46, а объем износа уменьшается более чем втрое. Этот режим характеризуется минимальной плотностью коррозионного тока 4,13 мкА/см² и потенциалом коррозии -0,12 В, что может быть связано с отсутствием выраженного образования CrN и формированием однородного поверхностного слоя. Таким образом, азотирование при 400 °С в течение 4 ч является оптимальным для повышения износостойкости и коррозионных характеристик стали 30X13.

Ключевые слова: плазменное азотирование, мартенситная нержавеющая сталь, время азотирования, фазовый состав, трибологические свойства, коррозионная стойкость.

Введение

Нержавеющая сталь AISI 420 отличается высокой прочностью, вязкостью и удовлетворительной коррозионной стойкостью и широко применяется в энергетическом, химическом, пищевом и морском машиностроении, а также в медицинских и бытовых изделиях [1–3]. Типичные примеры применения включают ножи вакуумных куттеров, шиберные затворы и седла клапанов, лопатки турбин, роликовые подшипники, элементы клапанов и плунжеры гомогенизаторов, используемые в оборудовании для переработки молока. Однако сравнительно низкая твердость (200–300 HV) и недостаточная износостойкость значительно ограничивают срок службы таких деталей [4–6].

Для устранения этих ограничений применяются методы поверхностного упрочнения [7–10], обеспечивающие формирование на нержавеющей сталях износостойких диффузионных слоев. Среди них плазменное азотирование считается одним из наиболее эффективных, особенно при использовании импульсного источника питания постоянного тока. Этот термохимический процесс включает катодный нагрев образца, очистку поверхности и активацию с последующей диффузией азота [11–13]. В результате формируется градиентная структура с максимальной твердостью на поверхности, которая постепенно снижается к подложке, что повышает несущую способность материала [14–17]. Первоначально данный процесс широко применялся для аустенитных нержавеющей сталей с целью повышения твердости и трибологических характеристик [18–25].

За последние два десятилетия плазменное азотирование успешно применяется и к мартенситным нержавеющей сталям, обеспечивая значительное повышение их износостойкости. Однако как для аустенитных, так и для мартенситных марок повышение твердости часто сопровождается снижением коррозионной стойкости из-за образования нитридов хрома при температурах выше 400 °C [26,27]. Эффективность плазменного азотирования определяется кинетикой диффузии азота, зависящей как от химического состава сплава, так и от температуры обработки [28,29]. Наличие сильных нитридообразующих легирующих элементов существенно влияет на фазовый состав, морфологию и свойства модифицированного слоя.

Для преодоления данного ограничения активно исследуется низкотемпературное плазменное азотирование [30–36]. Такие условия обеспечивают диффузию азота по междоузлиям при одновременном подавлении диффузии хрома по замещающим позициям, что позволяет сохранить хром в твердом растворе [37].

Таким образом, понимание влияния параметров обработки на фазовые превращения и механизмы диффузии азота при низкотемпературном плазменном азотировании мартенситных нержавеющей сталей имеет ключевое значение для оптимизации режимов. В то время как влияние температуры азотирования на трибологическое и коррозионное поведение аустенитных нержавеющей сталей изучено достаточно подробно, комплексные исследования, включающие фазовый анализ (XRD) и оценку трибологических и электрохимических свойств мартенситной стали 30X13, остаются малочисленными.

В настоящей работе проведено низкотемпературное плазменное азотирование нержавеющей стали 30X13 при 400 °C в течение различных промежутков времени с целью повышения износостойкости при сохранении коррозионной стойкости. Установлено влияние времени азотирования на фазовый состав, микроструктуру и функциональные свойства материала. Показано, что изменение продолжительности обработки приводит к последовательной эволюции структурно-фазового состояния, при этом оптимальные характеристики достигаются при времени азотирования 4 ч.

Методология

Химический состав материала, использованного в данном исследовании, представлен в таблице 1. Исследуемым материалом являлась мартенситная нержавеющая сталь марки 30X13. Образцы были изготовлены в виде дисков диаметром 50 мм и толщиной 5 мм. Перед обработкой поверхности образцов шлифовались на станке LMP-3S при скорости вращения 400-600 об/мин с использованием абразивной бумаги с зернистостью от P120 до P2500, после чего проводилась полировка с применением суспензии оксида алюминия. Затем поверхности очищались в ультразвуковой ванне и высушивались сжатым воздухом.

Таблица 1. Химический состав нержавеющей стали 30X13

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Ti	Cu	W	Fe
Содержание, мас.%	0.26 - 0.35	≤0.08	≤0.08	≤0.03	≤0.025	12 - 14	≤0.3	≤0.6	≤0.2	≤0.3	≤0.2	Бал

После полировки образцы нержавеющей стали 30X13 подвергались низкотемпературному ионно-плазменному азотированию на установке LDMC-20 (Tianman Industrial Furnace, Tianjin, China) с использованием импульсного тлеющего разряда постоянного тока. Схема установки приведена на рисунке 1. Параметры процесса, включая коэффициент заполнения импульсов, давление, напряжение, температуру и время, контролировались компьютерной системой. Образцы размещались на катодном держателе, при этом температура поддерживалась с точностью ± 5 °C с использованием термопары и системы обратной связи. Азотирование проводилось в атмосфере диссоциированного аммиака при температуре 400 °C, давлении 400 Па, напряжении 700 В, плотности катодного тока около 3 мА/см² и времени обработки 4 ч. Учитывая данные Laigo Mariano Ferreira и др. [38] о снижении поверхностной твердости мартенситной стали AISI 420 при температурах выше 450 °C, температура 400 °C была выбрана как оптимальная. После обработки образцы охлаждали в камере до комнатной температуры в проточной атмосфере N₂ + H₂ для минимизации поверхностного окисления. Режимы азотирования приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры плазменного азотирования стали 30X13

Образец	Газ	Температура, °C	Время азотирования ч.	Напряжение, В	Давление в рабочей камере, Па	Импульсный коэффициент заполнения, %	Расход аммиака, мл/мин
№1	NH ₃	400	3	700	400	75	200
№2	NH ₃	400	4	700	400	75	200
№3	NH ₃	400	5	700	400	75	200

Рентгенофазовый анализ (XRD) проводился на дифрактометре PANalytical X'Pert PRO, оснащенном гониометром PW3050/60 (Theta-Theta). В качестве излучения использовалось

$\text{CuK}\alpha$ ($\lambda_1 = 1.5406 \text{ \AA}$; $\lambda_2 = 1.5444 \text{ \AA}$) при рабочем напряжении 40 кВ и токе 30 мА. Измерения выполнялись в геометрии Брэгга-Брентано с фиксированной щелью расходимости $0,87^\circ$. Диапазон сканирования составлял $2\theta = 10\text{--}90^\circ$, шаг – $0,02^\circ$, время считывания – $0,5 \text{ с}$ на шаг.

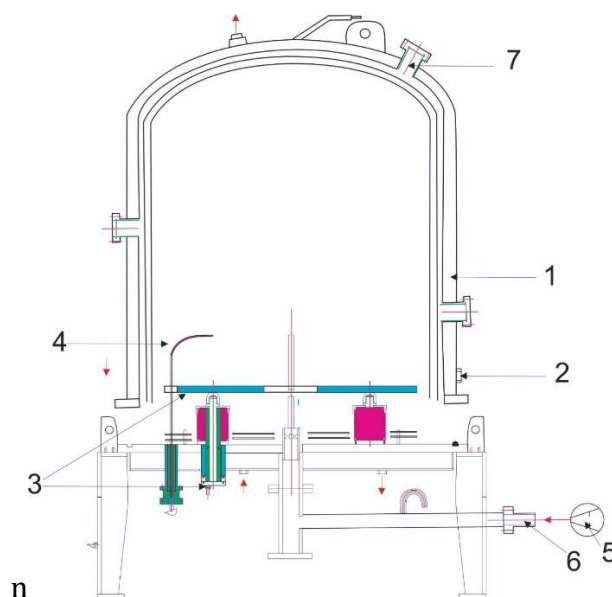


Рисунок 1. Схематическая диаграмма установки плазменного азотирования LDMC-20: 1 – вакуумная камера; 2 – анод; 3 – катод (держатель образца); 4 – датчик температуры вакуумной камеры; 5 – вакуумная откачная система; 6 – клапан сброса давления; 7 – смотровое окно [39]

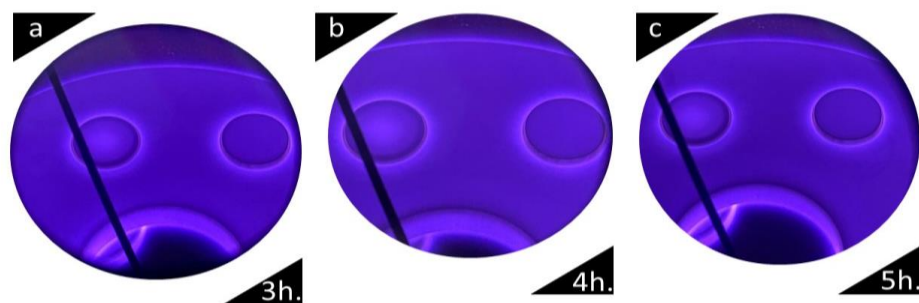


Рисунок 2. Образцы стали 30X13 в процессе плазменного азотирования, вид через смотровое окно камеры: (а) 3 ч; (b) 4 ч; (с) 5 ч.

Измерения микротвердости проводились по методу Виккерса с использованием микротвердомера HV-1 DT (China) в соответствии с ГОСТ 9450-76. Для поверхностных измерений применялась нагрузка $0,2 \text{ Н}$ с выдержкой $10\text{--}15 \text{ с}$. В каждой точке выполнялось не менее десяти вдавлений, после чего рассчитывалось среднее значение.

Трибологические характеристики образцов после ионно-плазменного азотирования оценивались в условиях сухого трения по схеме «шар–диск» на трибометре Anton Paar TRB₃

(Австрия) в соответствии со стандартами ASTM G99, G133 и DIN 50324. В качестве контртела использовался шар из подшипниковой стали ШХ15 диаметром 6 мм. Нагрузка составляла 6 Н, скорость скольжения – 5 см/с, номинальный радиус дорожки износа – 3 мм, а общая длина пути трения – 100 м. Скорость износа рассчитывалась по зависимости $W = V/(F \cdot L)$, где V – объем износа, F – приложенная нагрузка, L – общий путь трения. Объем износа определялся как произведение площади поперечного сечения на периметр дорожки износа ($V = \pi D S$), где D – диаметр круговой дорожки износа, а S – площадь поперечного сечения, измеренная профилометром. Фрикционные характеристики определялись по коэффициенту трения. Ширина дорожек износа и морфология поверхности после испытаний анализировались с помощью растрового электронного микроскопа (SEM3200). Дополнительно исследовалось состояние контртела.

Коррозионная стойкость образцов оценивалась методом потенциодинамической поляризации с использованием потенциостата-гальваностата CS350M (Corrtest Instruments, Wuhan, Китай) в сочетании с плоской коррозионной ячейкой модели CS934. Испытательная установка была выполнена по стандартной трехэлектродной схеме, включающей насыщенный электрод сравнения Ag/AgCl, платиновую сетку в качестве вспомогательного электрода и исследуемый образец, выступающий в роли рабочего электрода. Образец фиксировался с помощью тefлонового кольца, при этом через круглое отверстие в кольце к коррозионной среде контактировала поверхность площадью 1 см². Испытания проводились в 3,5% растворе NaCl при температуре (25±1) °C. Потенциодинамические поляризационные кривые регистрировались в диапазоне потенциалов от -0,1 В до +0,1 В относительно электрода Ag/AgCl со скоростью развертки 0,5 мВ/с. Экспериментальная процедура выполнялась в соответствии со стандартом ASTM G5-13 [40].

Результаты и обсуждения

На рисунке 3 представлены рентгеновские дифрактограммы мартенситной нержавеющей стали 30X13 в исходном состоянии и после низкотемпературного ионно-плазменного азотирования при температуре 400 °C в течение различного времени. Для исходного образца наблюдаются три характерных дифракционных пика, соответствующих мартенситной фазе α' -Fe с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой (ICDD № 06-0696), расположенные при углах $2\theta = 44,81^\circ$, $65,06^\circ$ и $82,33^\circ$, которые соответствуют плоскостям (110), (200) и (211) соответственно. Средний размер кристаллитов, рассчитанный по формуле Шеррера, находится в диапазоне от 12 до 54 нм, что указывает на стабильную структуру мартенсита без внедрения азота.

После ионно-плазменного азотирования наблюдаются значительные изменения формы и положения дифракционных пиков, а также появление новых фазовых компонент. Пик (110) фазы α' -Fe ($2\theta \approx 44,8^\circ$) смещается в сторону меньших углов ($\approx 43,4-43,0^\circ$) и становится более широким, что связано с расширением кристаллической решетки вследствие перенасыщения азотом и образованием межузельного твердого раствора, известного как расширенный мартенсит α' N. Данный пик не соответствует ни одной известной фазе (Fe, Fe₄N или CrN) и отражает наличие азотсодержащей мартенситной модификации. Формирование фазы α' N обусловлено анизотропной диффузией межузельных атомов азота [41] и снижением энергии дефектов упаковки [42], что

вызывает упругие искажения решетки и систематическое смещение пиков в область меньших углов 2θ .

Кроме того, отчетливо наблюдаются новые пики при $2\theta \approx 41,1-41,2^\circ$, $42,8^\circ$, $47,9^\circ$ и $63,2^\circ$, соответствующие фазам $\gamma'-Fe₄N и ϵ -Fe₂₋₃N, что указывает формирование азотонасыщенного соединенного слоя. При увеличении времени обработки, преимущественно после 5 ч, появляются слабые пики в области $2\theta \approx 43-45^\circ$ и 65° , которые могут быть отнесены к нитриду хрома CrN. Их низкая интенсивность свидетельствует о начальной стадии формирования данной фазы. По мере увеличения времени азотирования с 3 до 5 ч интенсивность пиков нитридных фаз $\gamma'-Fe₄N, ϵ -Fe₂₋₃N и CrN возрастает, а уширение пиков α' N становится более выраженным, что указывает на рост концентрации азота в приповерхностной зоне и увеличение плотности дефектов кристаллической решетки. У образца № 1 (3 ч) наблюдается увеличение среднего размера кристаллитов от 8,7 до 246 нм, что может быть связано с формированием фазы α' N и накоплением структурных искажений [43]. После 4 ч азотирования (№ 2) структура становится более неоднородной, появляются крупные кристаллиты (> 200 нм), а интенсивность фаз $\gamma'-Fe₄N и ϵ -Fe₂₋₃N возрастает. Для образца № 3 (5 ч) наблюдается частичное разложение фазы α' N, снижение среднего размера кристаллитов до 30–50 нм и признаки формирования нитридов CrN и Fe₄N.$$$

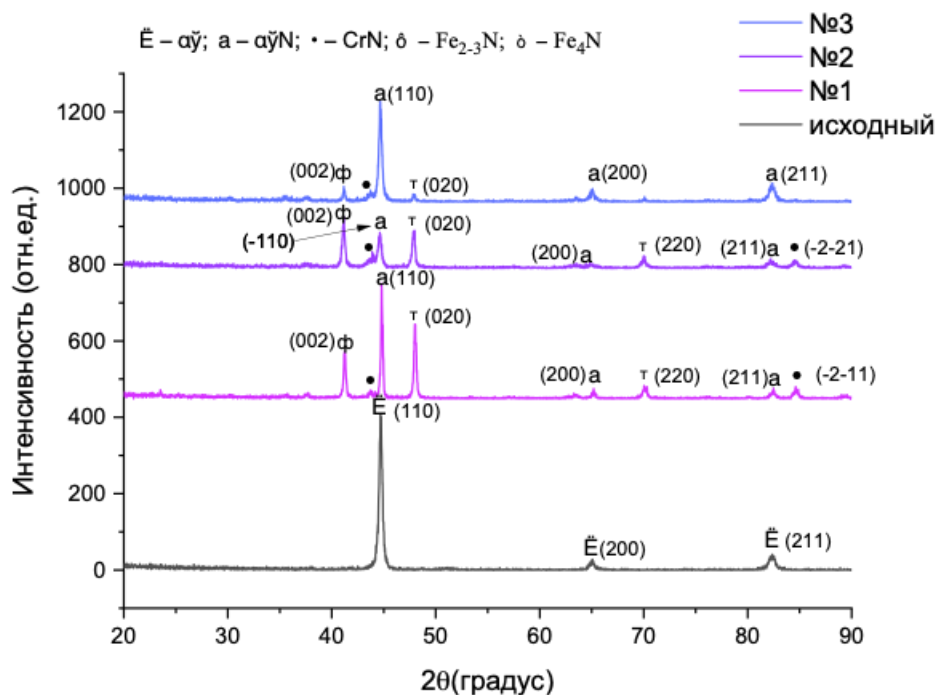


Рисунок 3. Рентгенофазовые дифрактограммы образцов нержавеющей стали 30X13 в исходном состоянии и после низкотемпературного ионно-плазменного азотирования

Таким образом, увеличение времени ионно-плазменного азотирования с 3 до 5 ч при 400°C приводит к постепенной структурной эволюции от азотонасыщенного мартенсита к системе, включающей расширенный мартенсит и нитридные фазы $\gamma'-Fe₄N, ϵ -Fe₂₋₃N, а при более длительной обработке к начальным стадиям формирования CrN. Наблюдаемое смещение пиков в область меньших углов и последовательный рост интенсивности$

нитридных фаз отражают переход от мелкодисперсного твердого раствора к фазовому насыщению приповерхностного слоя. На рисунке 4 представлено распределение поверхностной микротвердости стальных образцов до и после ионно-плазменного азотирования. Согласно результатам измерений по методу Виккерса, после обработки наблюдается значительное повышение твердости по сравнению с исходным состоянием. Для образца № 1 микротвердость составила 737 HV. При увеличении продолжительности обработки до 4 ч (№2) твердость возросла до 948 HV, что является наибольшим значением среди всех образцов. Такое повышение твердости связано с внедрением азота в кристаллическую решетку мартенсита и образованием нитридных фаз в приповерхностной области [37]. Для образца, азотированного в течение 5 ч (№ 3), твердость составила 734 HV, что близко к значению образца № 1. При дальнейшем увеличении времени азотирования существенного роста твердости не наблюдается, что может быть связано с изменением фазового состава, включая возможное перераспределение азота между твердым раствором и нитридными фазами. Это подтверждает, что основной вклад в упрочнение поверхности вносит именно фаза α' N [44–47].

Следует отметить, что полученные значения твердости не являются максимальными для плазменно-азотированных сталей, что может быть связано с относительно коротким временем азотирования и выбранной температурой обработки.

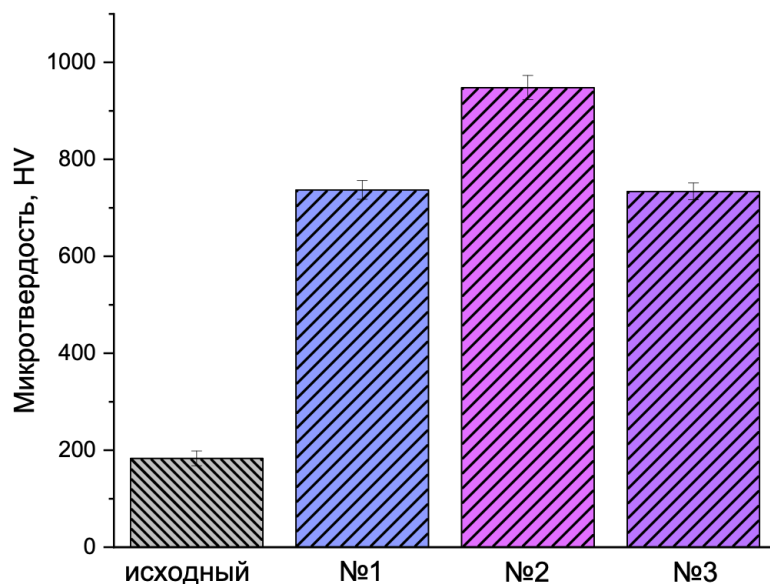


Рисунок 4. Поверхностная микротвердость мартенситной нержавеющей стали 30X13 до и после низкотемпературного ионно-плазменного азотирования при температуре 400 °C при различной продолжительности обработки

На рисунке 5 представлено изменение коэффициента трения для исходных и азотированных образцов при различной продолжительности азотирования, определенное по схеме «шар–диск». Средние значения коэффициента трения для исследуемых образцов

близки между собой, что связано с их схожей тетрагональной структурой, содержащей межузельные атомы углерода или азота [48]. После ионно-плазменного азотирования наблюдается незначительное снижение коэффициента трения по сравнению с исходной сталью 30X13. Для необработанного образца средний коэффициент трения составил 0.521 ± 0.035 , тогда как для образца №1, азотированного в течение 3 ч, он снизился до 0.503 ± 0.073 . Наименьшее значение коэффициента трения 0.464 ± 0.067 зарегистрировано для образца №2, обработанного в течение 4 ч, тогда как дальнейшее увеличение времени азотирования до 5 ч (№3) привело к повторному повышению этого показателя до 0.495 ± 0.042 . Такое поведение может быть связано с изменениями микроструктуры, фазового состава и поверхностной твердости [49], зависящими от продолжительности обработки. При времени азотирования 4 ч формируется равномерный слой с преобладанием фазы расширенного мартенсита $\alpha'N$, обладающий высокой твердостью и пластичностью, что снижает адгезионное взаимодействие и сопротивление трению. При меньшей продолжительности обработки 3 ч азотированный слой, вероятно, сформирован недостаточно, тогда как при увеличении времени до 5 ч возможно частичное образование более хрупких нитридных соединений, что может приводить к увеличению шероховатости поверхности и нестабильности коэффициента трения.

Полученные результаты показывают, что оптимальное сочетание фазового состава и микротвердости, достигаемое после 4 ч ионно-плазменного азотирования, обеспечивает минимальное значение коэффициента трения, что может быть связано со снижением адгезионного взаимодействия в зоне контакта. Предположение о возможном формировании тонких поверхностных пленок следует рассматривать как вероятное и требующее дополнительного экспериментального подтверждения.

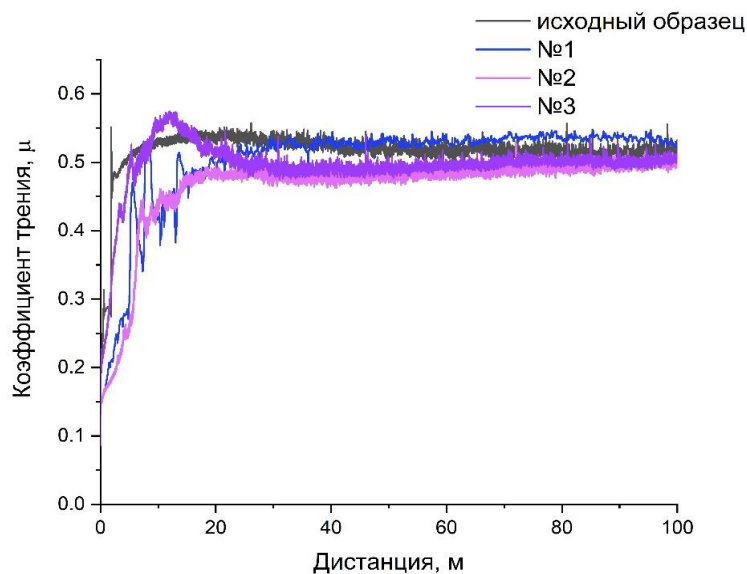


Рисунок 5. Изменение коэффициента трения образцов до и после низкотемпературного ионно-плазменного азотирования

На рисунках 6 и 7 представлены результаты испытаний на износ по схеме «шар-диск» для исходного и азотированных образцов. Согласно данным, приведенным на рисунке 6, объем износа исходного образца составил $18,19 \pm 0,89 \times 10^{-5} \text{ мм}^3$, тогда как после ионного плазменного азотирования это значение существенно снизилось. Для образца №1 объем износа составил $5,13 \pm 0,58 \times 10^{-5} \text{ мм}^3$, для образца №2 было равно $3,89 \pm 0,25 \times 10^{-5} \text{ мм}^3$, а для образца №3 составило $8,10 \pm 0,74 \times 10^{-5} \text{ мм}^3$. Таким образом, ионно-плазменное азотирование приводит к более чем трехкратному снижению объема износа по сравнению с исходной сталью 30X13, при этом наилучшая износостойкость наблюдается у образца №2, упрочненного в течение 4 часов.

Растровые электронные микрофотографии (рис. 8) демонстрируют различия в характере износа между исходным и азотированными образцами. Для необработанной стали (а) наблюдаются глубокие борозды и обширные области пластической деформации, что указывает на преобладание абразивного и адгезионного механизмов износа. На поверхности хорошо различимы следы схватывания, отрыва материала и переноса частиц стали на контртело, что свидетельствует о неустойчивом трении и интенсивном поверхностном разрушении.

После азотирования характер износа существенно изменяется. У образца №1 (b) наблюдаются тонкие борозды и небольшие зоны пластической деформации, что указывает на смешанный механизм износа преимущественно абразивного типа с локальными проявлениями адгезии. У образца №2 (с) поверхность выглядит более однородной; борозды имеют меньшую глубину и более равномерное распределение, а количество продуктов износа снижено, что соответствует уменьшению интенсивности изнашивания. Предполагается, что изменение характера износа может быть связано с модификацией поверхностного слоя после азотирования. Иными словами, интенсивный металлический износ, характерный для необработанной стали, после ионно-плазменного азотирования заменяется мягким абразивным износом [49].

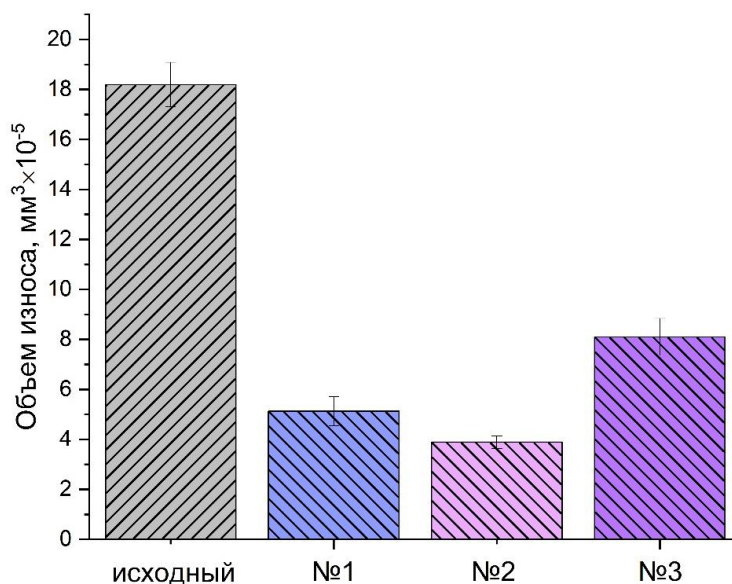


Рисунок 6. Объем износа образцов до и после низкотемпературного ионно-плазменного азотирования

У образца №3 (d) в зоне износа наблюдаются локальные микротрещины и участки расслоения, а также следы переноса материала на контртело, что согласуется с увеличенным объемом износа. Такое поведение может быть связано с изменением фазового состава, включая возможное образование более хрупких нитридных фаз, а также с увеличением шероховатости поверхности при длительном времени азотирования.

Таким образом, трибологическое поведение образцов коррелирует с результатами XRD и SEM анализа. Наименьший износ наблюдается после 4 ч обработки, что связано с формированием более благоприятного структурно фазового состояния поверхностного слоя. Следует отметить, что интерпретация механизмов износа, включая возможное влияние поверхностных пленок или остаточных напряжений, носит косвенный характер и требует дополнительного экспериментального подтверждения [50].

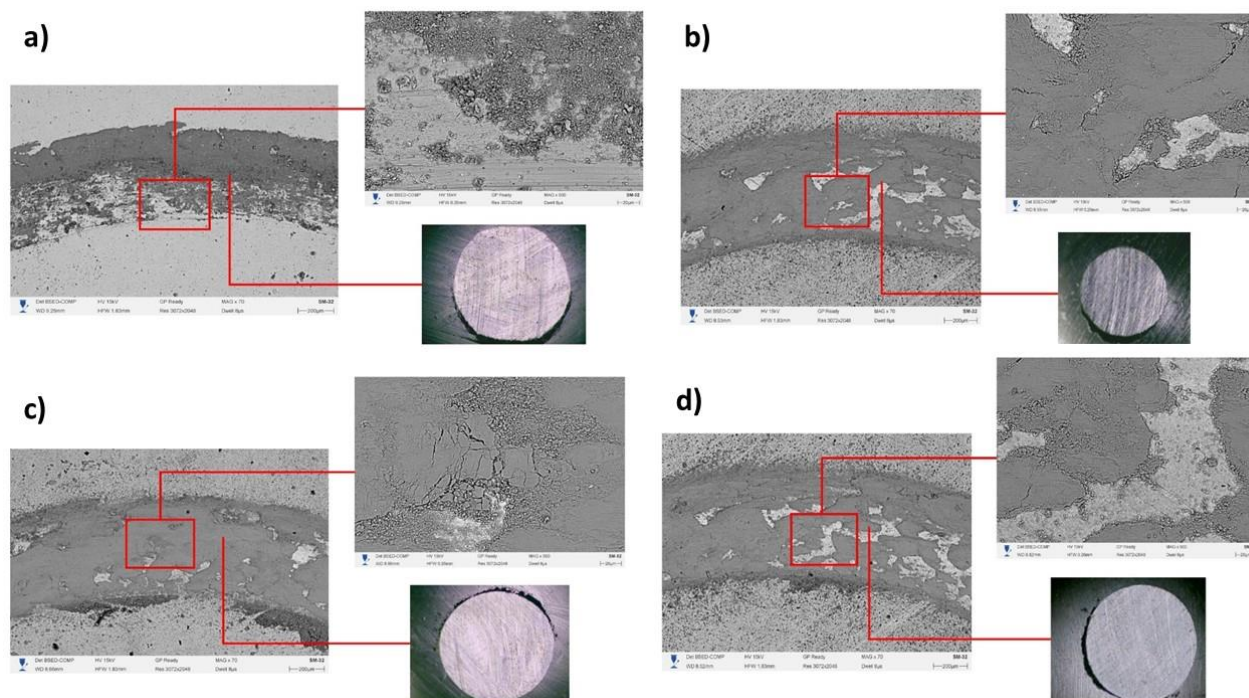


Рисунок 7. Дорожки износа образцов до и после низкотемпературного ионно-плазменного азотирования: а – исходный образец, b - №1, c - №2, d - №3 образец

Результаты коррозионных испытаний для необработанного материала и образцов после ионно-плазменного азотирования при 400 °C в течение 3, 4 и 5 часов представлены на рисунке 8 и в таблице 3. Поверхность необработанной нержавеющей стали 30X13 после испытаний демонстрирует выраженные следы питтинговой коррозии, вызванной разрушением пассивной пленки под воздействием ионов хлора. Несмотря на то, что сталь 30X13 обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью, испытания методом потенциодинамической поляризации в 3,5% растворе NaCl представляют собой достаточно агрессивную среду для данного сплава [50].

Для необработанного материала плотность коррозионного тока составляет 4.61 мкА/см² при коррозионном потенциале около -0.24 В. После азотирования в течение 3 ч (№1) наблюдается увеличение плотности тока до 34.59 мкА/см², а коррозионный

потенциал смещается в более отрицательную область (-0.27 В), что указывает на снижение коррозионной стойкости. При увеличении времени обработки до 4 ч (№2) отмечается противоположная тенденция, коррозионный потенциал смещается в положительную сторону до -0,12 В, а плотность тока снижается до 4,13 мкА/см², что свидетельствует о формировании стабильной пассивной пленки и повышении коррозионной стойкости. В то же время у образца №3, обработанного в течение 5 ч, коррозионный потенциал вновь смещается в отрицательную область (-0.29 В), а плотность тока возрастает до 11.7 мкА/см².

Смещение потенциала и изменение плотности коррозионного тока согласуются с результатами рентгенофазового анализа, представленными на рисунке 3. У образца №2, азотированного в течение 4 часов, формируются фазы ϵ -Fe₂₋₃N и γ' -Fe₄N [51,52], которые могут способствовать улучшению коррозионного поведения. В то же время появление слабых пиков CrN у образца №3 может указывать на изменение фазового состава и локальное обеднение поверхности хромом, что приводит к снижению коррозионной стойкости.

В целом результаты показывают, что при увеличении времени азотирования наблюдаются систематическое смещение коррозионного потенциала и изменение плотности коррозионного тока, отражающие эволюцию фазового состава поверхностного слоя. Наиболее благоприятные параметры достигаются после 4 часов обработки, когда формируется оптимальное сочетание фаз α' N, ϵ -Fe₂₋₃N и γ' -Fe₄N без образования CrN. Такое структурное состояние сопровождается минимальной плотностью коррозионного тока и более положительным значением коррозионного потенциала.

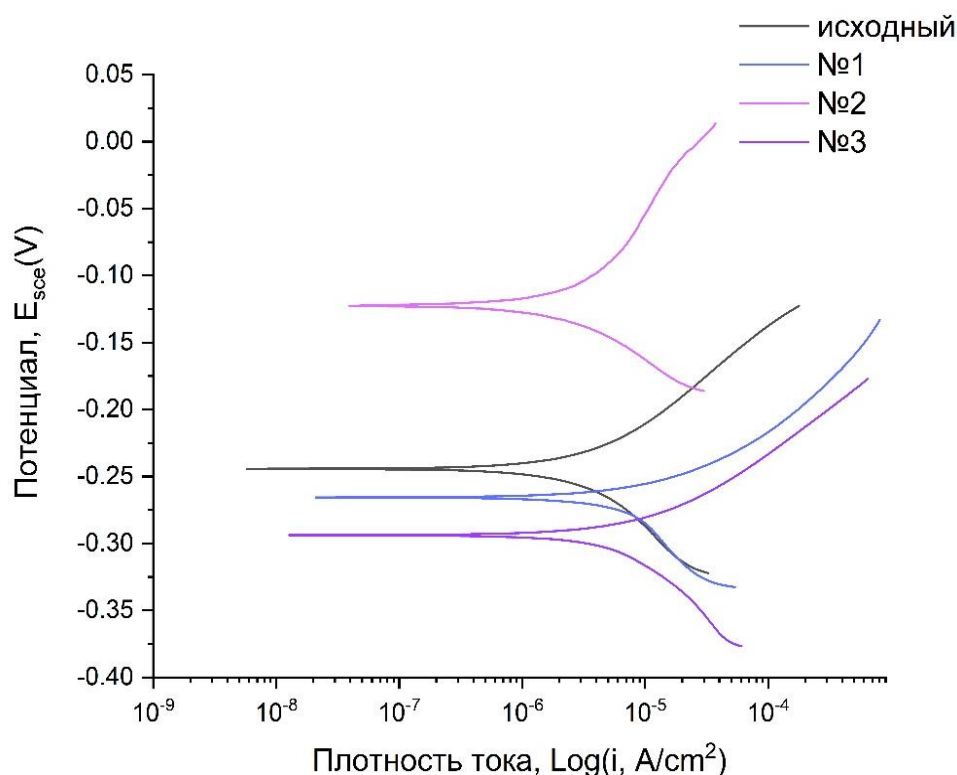


Рисунок 8. Потенциодинамические поляризационные кривые образцов

Таблица 3. Результаты потенциодинамических поляризационных испытаний исходных и азотированных образцов в 3,5 мас.% растворе NaCl

Образец	Плотность ток, i_0 (мкА/см ²)	Потенциал, E_0 (В)	Скорость коррозии (мм/год)
Исходный образец	4.61	-0.244	0.054
№н1	34.59	-0.267	0.406
№2	4.13	-0.122	0.048
№3	11.65	-0.294	0.137

Заключение

Проведенные исследования показали, что низкотемпературное ионное плазменное азотирование при 400 °С улучшает поверхностные свойства мартенситной нержавеющей стали 30X13 за счет изменения фазового состава и структуры приповерхностного слоя. Установлено, что при увеличении времени обработки с 3 до 5 ч происходит структурная эволюция от азотонасыщенного мартенсита α' N к системе с участием фаз γ' Fe₄N и ϵ Fe₂-3N, а при более длительном времени появляются признаки формирования CrN.

Оптимальное сочетание микротвердости, износостойкости и коррозионных характеристик достигается при времени азотирования 4 ч. В этом состоянии наблюдаются повышение твердости до примерно 950 HV, снижение объема износа и плотности коррозионного тока, а также формирование более однородного слоя без выраженного выделения CrN.

Полученные результаты показывают, что ключевую роль в упрочнении играет формирование фазы α' N и дисперсных нитридов, тогда как увеличение времени обработки до 5 ч приводит к изменению фазового состава и ухудшению комплекса свойств, что указывает на необходимость оптимизации параметров процесса.

В дальнейшем целесообразно исследовать влияние температуры, импульсных параметров и условий активного экрана, а также провести испытания на реальных рабочих органах гомогенизаторов седлах клапанов плунжерах и затворах для оценки эффективности технологии в эксплуатационных условиях.

Благодарность, конфликт интересов

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования Комитета науки МНВО РК BR24992870 «Обеспечение устойчивого развития машиностроительной отрасли Казахстана на основе разработки, научного обоснования и реализации промышленных технологий инженерии поверхности».

Авторы заявляют, что у них отсутствует какой-либо конфликт интересов, связанный с публикацией настоящей работы.

Вклад авторов

Орманбеков К.Д. – разработка концепции и методологии исследования; проведение ионно-плазменного азотирования, измерений микротвердости, трибологических испытаний и рентгенофазового анализа; обработка и интерпретация данных; написание и

оформление рукописи.

Сатбаева З.С. – руководитель исследования; участие в разработке режимов азотирования; анализ литературы; обсуждение результатов и критический пересмотр рукописи.

Орынбеков Д.Р. – участие в планировании эксперимента; анализ и интерпретация результатов; критический пересмотр текста статьи.

Коц В.Н. – подготовка и шлифовка образцов; участие в ионно-плазменном азотировании; рентгенофазовый анализ и идентификация фаз.

Список литературы

1. Shen H., Wang L. Mechanism and properties of plasma nitriding AISI 420 stainless steel at low temperature and anodic (ground) potential // Surf. Coat. Technol. Elsevier, 2020. Т. 403. С. 126390.
2. Xi Y. Т. и др. Improvement of mechanical properties of martensitic stainless steel by plasma nitriding at low temperature // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). Elsevier, 2008. Т. 21, № 1. С. 21–29.
3. Li Y. и др. Wear and corrosion properties of AISI 420 martensitic stainless steel treated by active screen plasma nitriding // Surf. Coat. Technol. Elsevier, 2017. Т. 329. С. 184–192.
4. Alphonsa I. и др. A study of martensitic stainless steel AISI 420 modified using plasma nitriding // Surf. Coat. Technol. Elsevier, 2002. Т. 150, № 2–3. С. 263–268.
5. Pinedo C. E., Monteiro W. A. On the kinetics of plasma nitriding a martensitic stainless steel type AISI 420 // Surf. Coat. Technol. Elsevier, 2004. Т. 179, № 2–3. С. 119–123.
6. Xia Y. и др. Friction and wear behavior of plasma nitrided 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel under lubrication condition // Materials Science and Engineering: A. Elsevier, 2005. Т. 402, № 1–2. С. 135–141.
7. ЖУМАЛИЕВА А., КУРБАНБЕКОВ Ш., УСЕМБАЕВА И. БОЛАТТАРДЫҢ ФИЗИКА МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТІНЕ ЭЛЕКТРОЛИТТИ ПЛАЗМАЛЫҚ ӨНДЕУДІҢ ӘСЕРІ // QA Iasaуы atyndaғы Halyqaralyq qazaq-túrik ýniversitetiniń habarlary. 2022. Т. 23, № 4. С. 29–47.
8. Mukash D. 30 ХГСА БОЛАТТАРДЫҢ ЭЛЕКТРОЛИТ-30 ХГСА БОЛАТТАРДЫҢ ЭЛЕКТРОЛИТ-ПЛАЗМАЛЫҚ ДИФФУЗИЯЛЫҚ АЗОТТАУ: 30 ХГСА БОЛАТТАРДЫҢ ЭЛЕКТРОЛИТ-ПЛАЗМАЛЫҚ ДИФФУЗИЯЛЫҚ АЗОТТАУ // QA Iasaуы atyndaғы Halyqaralyq qazaq-túrik ýniversitetiniń habarlary. 2025. Т. 4, № 35.
9. Кусаинов Р. К. и др. Применение электролитно-плазменного упрочнения для улучшения свойств деталей машины из стали 45 // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім Университет», 2024. № 3 (15). С. 62–70.
10. Kussainov R. и др. PHYSICAL FOUNDATIONS OF THE FORMATION OF A STRENGTHENED STRUCTURE OF STRUCTURAL STEELS DURING ELECTROLYTIC-PLASMA HARDENING // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім Университет», 2025. № 3. С. 203–208.
11. Aydin H., Bayram A., Topcu Ş. Effect of different nitriding processes on the friction coefficient of 304 austenitic and 420 martensitic stainless steels // Industrial Lubrication and Tribology. Emerald Group Publishing Limited, 2013. Т. 65, № 1. С. 27–36.
12. Маулит А. и др. 12Х18Н10Т АУСТЕНИТТИ-ТОТ БАСПАЙТЫН БОЛАТТАН

- ЭЛЕКТРОЛИТТИ-ПЛАЗМАЛЫҚ АЗОТТАУДЫ ЗЕРТТЕУ // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім Университет», 2025. № 4. С. 606–615.
13. Rakhadilov B. K. и др. Ion-plasma nitriding of titanium alloys: technologies, advantages, and limitations. // *Recent Contributions to Physics*. 2025. Т. 2025, № 2. С. 33–41.
 14. Bell T., Sun Y. Load bearing capacity of plasma nitrided steel under rolling-sliding contact // *Surface engineering*. Taylor & Francis, 1990. Т. 6, № 2. С. 133–139.
 15. Fewell M. P. и др. The nature of expanded austenite // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2000. Т. 131, № 1–3. С. 300–306.
 16. Czerwicz T. и др. On the occurrence of dual diffusion layers during plasma-assisted nitriding of austenitic stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2006. Т. 200, № 18–19. С. 5289–5295.
 17. De Las Heras E. и др. Microstructure and wear behavior of DC-pulsed plasma nitrided AISI 316L austenitic stainless steel // *Plasma Processes and Polymers*. Wiley Online Library, 2007. Т. 4, № S1. С. S741–S745.
 18. Dearnley P. A. и др. *Surface Engineering: Proceedings of International Conference PSE*. DGE, 1989.
 19. Borgioli F., Galvanetto E., Bacci T. Effects of surface modification by means of low-temperature plasma nitriding on wetting and corrosion behavior of austenitic stainless steel // *Coatings*. MDPI, 2020. Т. 10, № 2. С. 98.
 20. Hannula S.-P., Nenonen P., Hirvonen J.-P. Surface structure and properties of ion-nitrided austenitic stainless steels // *Thin Solid Films*. Elsevier, 1989. Т. 181, № 1–2. С. 343–350.
 21. Godec M. и др. Effect of post-treated low-temperature plasma nitriding on the wear and corrosion resistance of 316L stainless steel manufactured by laser powder-bed fusion // *Addit. Manuf.* Elsevier, 2020. Т. 32. С. 101000.
 22. Pacheco O. и др. *Ion-nitriding of austenitic stainless steels*. ASM International, Materials Park, OH (United States), 1995.
 23. Gil L. и др. Corrosion performance of the plasma nitrided 316L stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2006. Т. 201, № 7. С. 4424–4429.
 24. Fossati A. и др. Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment time // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2006. Т. 200, № 11. С. 3511–3517.
 25. Ou K.-L. и др. Surface modification of austenitic stainless steel with plasma nitriding for biomedical applications // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2011. Т. 206, № 6. С. 1142–1145.
 26. Czerwicz T., Renevier N., Michel H. Low-temperature plasma-assisted nitriding // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2000. Т. 131, № 1–3. С. 267–277.
 27. Liang W. и др. The wear and corrosion properties of stainless steel nitrided by low-pressure plasma-arc source ion nitriding at low temperatures // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2000. Т. 130, № 2–3. С. 304–308.
 28. Brading H. J. и др. *Plasma nitriding with nitrogen, hydrogen, and argon gas mixtures: structure and composition of coatings on titanium* // *Surface engineering*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 1992. Т. 8, № 3. С. 206–212.
 29. Cohen A., Boas M., Rosen A. The influence of ion nitriding parameters on the hardness layer of 15-5 PH stainless steel // *Thin Solid Films*. Elsevier, 1986. Т. 141, № 1. С. 53–58.
 30. Marchev K., Cooper C. V., Giessen B. C. Observation of a compound layer with very low friction coefficient in ion-nitrided martensitic 410 stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 1998. Т. 99, № 3. С. 229–233.

31. Corengia P. и др. Microstructure and corrosion behaviour of DC-pulsed plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2004. T. 187, № 1. C. 63–69.
32. Sun Y., Bell T. Low temperature plasma nitriding characteristics of precipitation hardening stainless steel // *Surface Engineering*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2003. T. 19, № 5. C. 331–336.
33. Çetin A. и др. A comparative study of single and duplex treatment of martensitic AISI 420 stainless steel using plasma nitriding and plasma nitriding-plus-nitrogen ion implantation techniques // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2007. T. 201, № 19–20. C. 8127–8130.
34. Figueroa C. A. и др. Previous heat treatment inducing different plasma nitriding behaviors in martensitic stainless steels // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. AIP Publishing, 2006. T. 24, № 5. C. 1795–1801.
35. De Sousa R. R. M. и др. Ionic nitriding in cathodic cage of AISI 420 martensitic stainless steel // *Surface Engineering*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2008. T. 24, № 1. C. 52–56.
36. Espitia L. A. и др. Cavitation erosion resistance and wear mechanisms of active screen low temperature plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel // *Wear*. Elsevier, 2015. T. 332. C. 1070–1079.
37. Scheuer C. J. и др. Influence of process temperature on phase formation in plasma nitrided AISI 420 steel. Associacao Brasileira de Ceramica (ABCCERAM), Sao Paulo, SP (Brazil), 2016.
38. Mariano L., Francisco S., Perito R. Martensitic Stainless Steels Low-temperature Nitriding: Dependence of Substrate Composition 2. Experimental Procedure // *Mater Res*. 2015. T. 18, № 3. C. 622–627.
39. Rakhadilov B. и др. Effects of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on the Formation of a Nitride Layer in Ti-6Al-4V Alloy // *Materials*. MDPI, 2025. T. 18, № 15. C. 3487.
40. Standard A. Standard test method for conducting cyclic potentiodynamic polarization measurements to determine the corrosion susceptibility of small Implant devices // *ASTM International*: West Conshohocken, PA, USA. 2019.
41. Rivière J. P. и др. Microstructure of expanded austenite in ion-nitrided AISI 316L single crystals // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2007. T. 201, № 19–20. C. 8210–8214.
42. Christiansen T. L., Somers M. A. J. Stress and composition of carbon stabilized expanded austenite on stainless steel // *Metallurgical and Materials Transactions A*. Springer, 2009. T. 40, № 8. C. 1791–1798.
43. Rolinski E., Sharp G. When and Why Ion Nitriding/Nitrocarburizing Makes Good Sense-Ion nitriding can be used in many applications, but some are so unique that they can be called "the best" applications, where the unique // *Industrial Heating*. [Pittsburgh, National Industrial Pub. Co.], 2005. T. 72, № 8. C. 67–74.
44. Cardoso R. P., Scheuer C. J., Brunatto S. F. Low-temperature nitriding kinetics of stainless steel: effect of prior heat treatment // *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*. 1st ed. New York: Taylor & Francis Group. 2015.
45. Sun J. и др. Properties of rapid arc discharge plasma nitriding of AISI 420 martensitic stainless: effect of nitriding temperatures // *Journal of Materials Research and Technology*. Elsevier, 2022. T. 19. C. 4804–4814.
46. Esfandiari M., Dong H. The corrosion and corrosion-wear behaviour of plasma nitrided 17-4PH precipitation hardening stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2007. T. 202, № 3. C. 466–478.

47. Bacci T. и др. Glow-discharge nitriding of sintered stainless steels // Surf. Coat. Technol. Elsevier, 2001. T. 139, № 2–3. С. 251–256.
48. Zhao Y.-H. и др. Effect of axial magnetic field on the microstructure, hardness and wear resistance of TiN films deposited by arc ion plating // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). Springer, 2015. T. 28, № 8. С. 984–993.
49. Xi Y., Liu D., Han D. Improvement of corrosion and wear resistances of AISI 420 martensitic stainless steel using plasma nitriding at low temperature // Surf. Coat. Technol. Elsevier, 2008. T. 202, № 12. С. 2577–2583.
50. Corengia P. и др. Friction and rolling-sliding wear of DC-pulsed plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel // Wear. Elsevier, 2006. T. 260, № 4–5. С. 479–485.
51. Li C. X., Bell T. Corrosion properties of plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel in 3.5% NaCl and 1% HCl aqueous solutions // Corros. Sci. Elsevier, 2006. T. 48, № 8. С. 2036–2049.
52. Chen H. T., Yan M. F., You Yjj. Effect of N distribution on elastic and electronic properties of hexagonal ϵ -Fe₆N_x by first-principles calculations // J. Magn. Magn. Mater. Elsevier, 2014. T. 354. С. 200–204.

K.D.Ormanbekov^{*1}, Z.A.Satbayeva^{1,2}, D.R.Orynbekov¹, V.N.Kots¹

¹NPJSC “Shakarim University”, Semey, Kazakhstan

²LLP “Plasma Science”, Oskemen, Kazakhstan

Effect of low-temperature ion-plasma nitriding time on the tribomechanical properties of 30kh13 martensitic stainless steel

Abstract. This study investigates the effect of low-temperature ion-plasma nitriding duration on the microstructure, phase composition, and functional properties of 30Cr13 martensitic stainless steel. The specimens were treated at 400 °C for 3, 4, and 5 h in a dissociated ammonia atmosphere. X-ray diffraction analysis, Vickers microhardness measurements, tribological tests, and corrosion tests were employed to determine the evolution of the microstructure and its relationship with the tribological properties. As the nitriding duration increased, expanded martensite (α' N), γ' -Fe₄N and ϵ -Fe₂₋₃N nitrides formed sequentially, while signs of CrN precipitation and chromium depletion of the surface were observed after 5 h of treatment. A nitriding duration of 4 h provided the most favorable combination of structural homogeneity and functional properties. Under these conditions, the surface microhardness increased to 948 HV, the coefficient of friction decreased to 0.46, and the wear volume was reduced by more than three times. This treatment also exhibited the lowest corrosion current density (4.13 μ A/cm²) and a corrosion potential of -0.12 V, which may be attributed to the absence of pronounced CrN precipitation and the formation of a more homogeneous surface layer. Therefore, low-temperature ion-plasma nitriding at 400 °C for 4 h is the optimal treatment for improving the wear resistance and corrosion performance of 30Cr13 steel.

Keywords: plasma nitriding, martensitic stainless steel, nitriding time, phase composition, tribological properties, corrosion resistance.

References

1. Shen H., Wang L. Mechanism and properties of plasma nitriding AISI 420 stainless steel at low temperature and anodic (ground) potential // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2020. T. 403. C. 126390.
2. Xi Y. T. и др. Improvement of mechanical properties of martensitic stainless steel by plasma nitriding at low temperature // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. Elsevier, 2008. T. 21, № 1. C. 21–29.
3. Li Y. и др. Wear and corrosion properties of AISI 420 martensitic stainless steel treated by active screen plasma nitriding // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2017. T. 329. C. 184–192.
4. Alphonsa I. и др. A study of martensitic stainless steel AISI 420 modified using plasma nitriding // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2002. T. 150, № 2–3. C. 263–268.
5. Pinedo C. E., Monteiro W. A. On the kinetics of plasma nitriding a martensitic stainless steel type AISI 420 // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2004. T. 179, № 2–3. C. 119–123.
6. Xia Y. и др. Friction and wear behavior of plasma nitrided 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel under lubrication condition // *Materials Science and Engineering: A*. Elsevier, 2005. T. 402, № 1–2. C. 135–141.
7. ЖУМАЛИЕВА А., КУРБАНБЕКОВ Ш., УСЕМБАЕВА И. БОЛАТТАРДЫҢ ФИЗИКА МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТІНЕ ЭЛЕКТРОЛИТТІ ПЛАЗМАЛЫҚ ӨНДЕУДІҢ ӘСЕРІ // *QA Іасауы атындағы Halyqaralyq qazaq-túrik ýnıversitetiniń habarlary*. 2022. T. 23, № 4. C. 29–47.
8. Mukash D. 30 ХГСА БОЛАТТАРДЫҢ ЭЛЕКТРОЛИТ-30 ХГСА БОЛАТТАРДЫҢ ЭЛЕКТРОЛИТ-ПЛАЗМАЛЫҚ ДИФФУЗИЯЛЫҚ АЗОТТАУ: 30 ХГСА БОЛАТТАРДЫҢ ЭЛЕКТРОЛИТ-ПЛАЗМАЛЫҚ ДИФФУЗИЯЛЫҚ АЗОТТАУ // *QA Іасауы атындағы Halyqaralyq qazaq-túrik ýnıversitetiniń habarlary*. 2025. T. 4, № 35.
9. Кусаинов Р. К. и др. Применение электролитно-плазменного упрочнения для улучшения свойств деталей машины из стали 45 // *Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім Университет»*, 2024. № 3 (15). C. 62–70.
10. Kussainov R. и др. PHYSICAL FOUNDATIONS OF THE FORMATION OF A STRENGTHENED STRUCTURE OF STRUCTURAL STEELS DURING ELECTROLYTIC-PLASMA HARDENING // *Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім Университет»*, 2025. № 3. C. 203–208.
11. Aydin H., Bayram A., Topcu Ş. Effect of different nitriding processes on the friction coefficient of 304 austenitic and 420 martensitic stainless steels // *Industrial Lubrication and Tribology*. Emerald Group Publishing Limited, 2013. T. 65, № 1. C. 27–36.
12. Маулит А. и др. 12Х18Н10Т АУСТЕНИТТІ-ТОТ БАСПАЙТЫН БОЛАТТАН ЭЛЕКТРОЛИТТІ-ПЛАЗМАЛЫҚ АЗОТТАУДЫ ЗЕРТТЕУ // *Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім Университет»*, 2025. № 4. C. 606–615.
13. Rakhadilov B. K. и др. Ion-plasma nitriding of titanium alloys: technologies, advantages, and limitations. // *Recent Contributions to Physics*. 2025. T. 2025, № 2. C. 33–41.
14. Bell T., Sun Y. Load bearing capacity of plasma nitrided steel under rolling-sliding contact // *Surface engineering*. Taylor & Francis, 1990. T. 6, № 2. C. 133–139.
15. Fewell M. P. и др. The nature of expanded austenite // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2000. T. 131, № 1–3. C. 300–306.

16. Czerwiec T. и др. On the occurrence of dual diffusion layers during plasma-assisted nitriding of austenitic stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2006. Т. 200, № 18–19. С. 5289–5295.
17. De Las Heras E. и др. Microstructure and wear behavior of DC-pulsed plasma nitrided AISI 316L austenitic stainless steel // *Plasma Processes and Polymers*. Wiley Online Library, 2007. Т. 4, № S1. С. S741–S745.
18. Dearnley P. A. и др. *Surface Engineering: Proceedings of International Conference PSE*. DGE, 1989.
19. Borgioli F., Galvanetto E., Bacci T. Effects of surface modification by means of low-temperature plasma nitriding on wetting and corrosion behavior of austenitic stainless steel // *Coatings*. MDPI, 2020. Т. 10, № 2. С. 98.
20. Hannula S.-P., Nenonen P., Hirvonen J.-P. Surface structure and properties of ion-nitrided austenitic stainless steels // *Thin Solid Films*. Elsevier, 1989. Т. 181, № 1–2. С. 343–350.
21. Godec M. и др. Effect of post-treated low-temperature plasma nitriding on the wear and corrosion resistance of 316L stainless steel manufactured by laser powder-bed fusion // *Addit. Manuf.* Elsevier, 2020. Т. 32. С. 101000.
22. Pacheco O. и др. *Ion-nitriding of austenitic stainless steels*. ASM International, Materials Park, OH (United States), 1995.
23. Gil L. и др. Corrosion performance of the plasma nitrided 316L stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2006. Т. 201, № 7. С. 4424–4429.
24. Fossati A. и др. Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment time // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2006. Т. 200, № 11. С. 3511–3517.
25. Ou K.-L. и др. Surface modification of austenitic stainless steel with plasma nitriding for biomedical applications // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2011. Т. 206, № 6. С. 1142–1145.
26. Czerwiec T., Renevier N., Michel H. Low-temperature plasma-assisted nitriding // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2000. Т. 131, № 1–3. С. 267–277.
27. Liang W. и др. The wear and corrosion properties of stainless steel nitrided by low-pressure plasma-arc source ion nitriding at low temperatures // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2000. Т. 130, № 2–3. С. 304–308.
28. Brading H. J. и др. Plasma nitriding with nitrogen, hydrogen, and argon gas mixtures: structure and composition of coatings on titanium // *Surface engineering*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 1992. Т. 8, № 3. С. 206–212.
29. Cohen A., Boas M., Rosen A. The influence of ion nitriding parameters on the hardness layer of 15-5 PH stainless steel // *Thin Solid Films*. Elsevier, 1986. Т. 141, № 1. С. 53–58.
30. Marchev K., Cooper C. V., Giessen B. C. Observation of a compound layer with very low friction coefficient in ion-nitrided martensitic 410 stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 1998. Т. 99, № 3. С. 229–233.
31. Corengia P. и др. Microstructure and corrosion behaviour of DC-pulsed plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2004. Т. 187, № 1. С. 63–69.
32. Sun Y., Bell T. Low temperature plasma nitriding characteristics of precipitation hardening stainless steel // *Surface Engineering*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2003. Т. 19, № 5. С. 331–336.
33. Çetin A. и др. A comparative study of single and duplex treatment of martensitic AISI 420 stainless steel using plasma nitriding and plasma nitriding-plus-nitrogen ion implantation techniques // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2007. Т. 201, № 19–20. С. 8127–8130.

34. Figueroa C. A. и др. Previous heat treatment inducing different plasma nitriding behaviors in martensitic stainless steels // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. AIP Publishing, 2006. Т. 24, № 5. С. 1795–1801.
35. De Sousa R. R. M. и др. Ionic nitriding in cathodic cage of AISI 420 martensitic stainless steel // *Surface Engineering*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2008. Т. 24, № 1. С. 52–56.
36. Espitia L. A. и др. Cavitation erosion resistance and wear mechanisms of active screen low temperature plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel // *Wear*. Elsevier, 2015. Т. 332. С. 1070–1079.
37. Scheuer C. J. и др. Influence of process temperature on phase formation in plasma nitrided AISI 420 steel. Associacao Brasileira de Ceramica (ABCERAM), Sao Paulo, SP (Brazil), 2016.
38. Mariano L., Francisco S., Perito R. Martensitic Stainless Steels Low-temperature Nitriding: Dependence of Substrate Composition 2. Experimental Procedure // *Mater Res*. 2015. Т. 18, № 3. С. 622–627.
39. Rakhadilov B. и др. Effects of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on the Formation of a Nitride Layer in Ti-6Al-4V Alloy // *Materials*. MDPI, 2025. Т. 18, № 15. С. 3487.
40. Standard A. Standard test method for conducting cyclic potentiodynamic polarization measurements to determine the corrosion susceptibility of small Implant devices // *ASTM International*: West Conshohocken, PA, USA. 2019.
41. Rivière J. P. и др. Microstructure of expanded austenite in ion-nitrided AISI 316L single crystals // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2007. Т. 201, № 19–20. С. 8210–8214.
42. Christiansen T. L., Somers M. A. J. Stress and composition of carbon stabilized expanded austenite on stainless steel // *Metallurgical and Materials Transactions A*. Springer, 2009. Т. 40, № 8. С. 1791–1798.
43. Rolinski E., Sharp G. When and Why Ion Nitriding/Nitrocarburizing Makes Good Sense-Ion nitriding can be used in many applications, but some are so unique that they can be called "the best" applications, where the unique // *Industrial Heating*. [Pittsburgh, National Industrial Pub. Co.], 2005. Т. 72, № 8. С. 67–74.
44. Cardoso R. P., Scheuer C. J., Brunatto S. F. Low-temperature nitriding kinetics of stainless steel: effect of prior heat treatment // *Encyclopaedia of Iron, Steel, and Their Alloys*. 1st ed. New York: Taylor & Francis Group. 2015.
45. Sun J. и др. Properties of rapid arc discharge plasma nitriding of AISI 420 martensitic stainless: effect of nitriding temperatures // *Journal of Materials Research and Technology*. Elsevier, 2022. Т. 19. С. 4804–4814.
46. Esfandiari M., Dong H. The corrosion and corrosion-wear behaviour of plasma nitrided 17-4PH precipitation hardening stainless steel // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2007. Т. 202, № 3. С. 466–478.
47. Bacci T. и др. Glow-discharge nitriding of sintered stainless steels // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2001. Т. 139, № 2–3. С. 251–256.
48. Zhao Y.-H. и др. Effect of axial magnetic field on the microstructure, hardness and wear resistance of TiN films deposited by arc ion plating // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. Springer, 2015. Т. 28, № 8. С. 984–993.
49. Xi Y., Liu D., Han D. Improvement of corrosion and wear resistances of AISI 420 martensitic stainless steel using plasma nitriding at low temperature // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier, 2008. Т. 202, № 12. С. 2577–2583.

50. Corengia P. и др. Friction and rolling-sliding wear of DC-pulsed plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel // Wear. Elsevier, 2006. Т. 260, № 4–5. С. 479–485.
51. Li C. X., Bell T. Corrosion properties of plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel in 3.5% NaCl and 1% HCl aqueous solutions // Corros. Sci. Elsevier, 2006. Т. 48, № 8. С. 2036–2049.
52. Chen H. T., Yan M. F., You Yjj. Effect of N distribution on elastic and electronic properties of hexagonal ϵ -Fe₆N_x by first-principles calculations // J. Magn. Magn. Mater. Elsevier, 2014. Т. 354. С. 200–204.

Сведения об авторах:

Орманбеков К.Д. – автор для корреспонденции, докторант по специальности 8D07101 «Технологические машины и оборудование», научный сотрудник Инжинирингового центра НАО «Шәкәрім университет», ул. Физкультурная, 4В, 071412, г. Семей, Казахстан
Сатбаева З.А. – PhD, руководитель проекта, старший научный сотрудник Инжинирингового центра НАО «Шәкәрім университет», ул. Физкультурная, 4В, 071412, г. Семей, Казахстан

Орынбеков Д.Р. – к.т.н., ассоциированный профессор, Председатель правления – ректор НАО «Шәкәрім университет», ул. Глинки, 20А, 071410, г. Семей, Казахстан

Коц В.Н. – магистрант по специальности 7М07104 «Машиностроение», младший научный сотрудник Инжинирингового центра НАО «Шәкәрім университет», ул. Физкультурная, 4В, 071412, г. Семей, Казахстан

K.D. Ormanbekov – Corresponding author, PhD student in the specialty 8D07101 “Technological machines and equipment,” researcher at the Engineering Center, NJSC “Shakarim University,” 4B Fizkulturnaya St., 071412, Semey, Kazakhstan

Z.A. Satbayeva – PhD, Project supervisor, senior researcher at the Engineering Center, NJSC “Shakarim University,” 4B Fizkulturnaya St., 071412, Semey, Kazakhstan

D.R. Orynbekov – Candidate of technical sciences, Associate professor, Chairman of the Board – Rector of NJSC “Shakarim University,” 20A Glinka St., 071410, Semey, Kazakhstan

V.N. Kots – Master’s student in the specialty 7M07104 “Mechanical engineering,” junior researcher at the Engineering Center, NJSC “Shakarim University,” 4B Fizkulturnaya St., 071412, Semey, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Review

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-293-303>

Technological Aspect of Digital Terrestrial Television Implementation: Network Architecture, Signal Processing and the Development Prospects

Luca Battanta 

University of Milan Bicocca, Milan, Italy

E mail: l.battanta@campus.unimib.it

Abstract. This article examines the recent transformation of digital terrestrial television (DTT) in Italy through the analytical lens of costs, benefits and strategic implications for broadcasters. Unlike earlier studies focused mainly on analogue switch-off, the paper updates the discussion to the 2015–2026 period, when the Italian broadcasting system was reshaped by 700 MHz spectrum refarming, DVB-T2/HEVC migration, MPEG-4 transition, hybrid broadcast-broadband services and growing competition from satellite, IPTV and over-the-top platforms. The aim is to explain how regulatory change and technological modernization redistributed economic burdens and strategic opportunities among national public-service broadcasters, commercial groups, local television operators and pay-TV competitors. The methodology combines literature review, qualitative web content analysis and a comparative case-study approach based on regulatory documents, industry reports, corporate communications and recent policy materials. The findings show that DTT modernization generated important public and technical benefits, including spectrum efficiency, platform continuity, improved quality potential and universal access. However, the same process created asymmetric costs related to infrastructure renewal, receiver compatibility, content expansion, advertising fragmentation and regulatory adaptation. The article argues that the success of DTT modernization depends not only on transmission standards but also on interoperability, platform governance, sustainable local broadcasting and integration with broadband-based media ecosystems.

Keywords: digital terrestrial television, Italy, DVB-T2, spectrum refarming, media economics, hybrid television, broadcasters.

Introduction

The transition from analogue terrestrial television to digital terrestrial television (DTT) represented one of the most significant transformations in European media policy. In Italy, this process was particularly important because terrestrial television has historically occupied a central position in national media consumption, advertising markets and public communication. While the earlier phases of the switch-off established the foundations of the digital platform, the period from 2015 to 2026 has become equally significant, representing a second phase of modernization characterised by spectrum refarming, receiver migration, codec renewal and increasing platform convergence.

This article, therefore, reinterprets the Italian DTT experience through the lens of recent broadcasting modernization rather than viewing it solely as a historical analogue-to-digital switch-off. Since 2015, the Italian television environment has been shaped by several overlapping developments, including the European decision to allocate the 700 MHz band to wireless broadband services, the migration of DTT broadcasting to the sub-700 MHz UHF spectrum, the gradual transition from MPEG-2 to MPEG-4 and subsequently towards DVB-T2/HEVC standards, the expansion of connected television and the growing relevance of RaiPlay, Mediaset Infinity, satellite distribution, IPTV and over-the-top (OTT) platforms [1].

The central research problem addressed in this article is the following: how has the recent phase of DTT modernization affected the costs, benefits and strategic positioning of broadcasters in Italy? Three research questions guide the analysis. First, which categories of cost became most significant for broadcasters during the 2015–2026 period? Second, what benefits and emerging opportunities did the evolving DTT environment create for national, local and pay-TV operators? Third, why were some actors more successful than others in adapting to DTT modernization?

The article contributes to the existing literature by integrating media economics, spectrum policy and platform strategy within a unified analytical framework. It argues that digital broadcasting modernization constitutes more than a technical upgrade; rather, it represents a socio-technical restructuring process that redistributes costs and opportunities among broadcasters, audiences, governments, device manufacturers and network operators. The Italian case is analytically valuable because it combines a strong terrestrial broadcasting tradition, a major public-service broadcaster, influential commercial media groups, local television pluralism and intense competition from satellite and broadband-based platforms.

Literature review

The academic discussion surrounding digital terrestrial television (DTT) has generally evolved around four principal themes: spectrum management, public policy, market competition and social access. Foundational studies emphasised that digital switchover should be understood as a coordinated policy process rather than a single technological event. More recent scholarship has shifted attention towards platform convergence, connected television, regulatory prominence and the long-term role of DTT within an increasingly broadband-oriented media environment.

The first relevant strand of literature concerns spectrum policy. The European UHF framework and the reallocation of the 700 MHz band demonstrate that broadcasting policy has become increasingly intertwined with the development of mobile broadband services. European policy documents relating to the sub-700 MHz spectrum indicate that the 470–694 MHz band remains essential for DTT and programme-making services at least until 2030, while the 700 MHz band has been reassigned to mobile communications and 5G deployment [2]. This development creates a structural tension whereby broadcasters must maintain universal free-to-air services within

reduced spectrum capacity, while mobile operators continue to demand additional low-frequency resources.

Table 1. Updated research focus and contribution of recent sources (2015–2026)

Research area	Recent relevance for the Italian case	Contribution to this article
Spectrum policy and 700 MHz refarming	EU and Italian policy shifted DTT into a reduced UHF environment while supporting 5G deployment.	Explains why DTT modernization created new infrastructure and coordination costs.
DVB-T2/HEVC and receiver migration	More efficient standards improve capacity and quality but require compatible devices and public communication.	Shows that technological efficiency can create short-term social and economic burdens.
Hybrid TV, HbbTV and DVB-I	Broadcast and broadband services increasingly operate in a common user environment.	Links DTT strategy to connected television and platform governance.
Local broadcasting sustainability	Local broadcasters face weaker advertising markets, SFN constraints and higher relative transition costs.	Highlights the asymmetry between national and local operators.
Platform prominence and access	AGCOM's 2024 measures on DTT access icons reflect the importance of visibility on smart devices.	Extends the analysis from transmission coverage to interface-level accessibility.

The second strand addresses the economics of television platforms. Digital compression expands transmission capacity and enables the launch of additional channels, thematic services and high-definition broadcasting. At the same time, however, it contributes to audience fragmentation and the dispersal of advertising revenues. For large broadcasting groups, such fragmentation may be managed through portfolio-based strategies; for local operators, by contrast, the same process can weaken traditional advertising models while simultaneously increasing technical and operational costs. The third strand of literature focuses on public-service broadcasting and questions of access. Rai's responsibilities extend beyond the mere transmission of content and encompass broader principles of universality, visibility, accessibility and technological neutrality. Within a hybrid media environment, these obligations increasingly reach beyond terrestrial coverage to include satellite complements, electronic programme guides, connected television interfaces and issues of platform prominence. Recent AGCOM regulations concerning access to DTT channels further demonstrate that visibility within device interfaces has become not only a matter of market design but also a significant regulatory concern [3].

Finally, the literature on hybrid broadcast-broadband television suggests that the future of

DTT is likely to be characterised by integration rather than isolation. Standards such as HbbTV, DVB-I and connected television technologies point towards a transition from channel-based distribution to service-based discovery across terrestrial, satellite and broadband networks. For broadcasters, this implies that DTT continues to play an important role in ensuring reach and system resilience, while broadband platforms increasingly provide personalization, interactivity, audience measurement and on-demand viewing capabilities.

The methodology

This study applies a qualitative case-study design supported by a literature review and web content analysis. The empirical focus is Italy during the period 2015–2026, with historical references to the earlier analogue switch-off where necessary. This updated timeframe was selected because it captures the second phase of digital terrestrial modernization, including 700 MHz spectrum refarming, MPEG-4 migration, DVB-T2/HEVC planning, the development of connected television and the growing convergence of terrestrial, satellite and broadband platforms.

Table 2. Methodological design of the study

Element	Description
Research design	Qualitative case study with literature review and web content analysis.
Time frame	2015–2026, with historical context from the initial Italian DTT switch-off.
Units of analysis	Regulatory documents, industry reports, corporate communications and scholarly publications.
Core variables	Costs, benefits, strategic positioning, market consequences and policy milestones.
Analytical logic	Comparison of national broadcasters, local broadcasters, pay-TV operators and hybrid/OTT platforms.
Limitations	The study does not provide a full econometric cost-benefit estimate because detailed firm-level costs are not publicly available.

The empirical material includes academic publications, European policy documents, AGCOM reports and resolutions, industry materials produced by broadcasting and standards organizations, and corporate communications issued by major Italian broadcasters. The analysis is qualitative rather than econometric, as detailed cost attribution for individual broadcasters is not always available within public sources. Nevertheless, public reports and regulatory documents make it possible to identify recurring cost categories, strategic decisions and broader market consequences [4].

The analytical framework is structured around five coding categories. The first category, policy and timeline, captures regulatory milestones, spectrum decisions and stages of implementation. The second category, costs, includes infrastructure investment, simulcasting, receiver

compatibility, content expansion, workforce skills and regulatory compliance. The third category, benefits, encompasses spectrum efficiency, channel multiplication, improvements in transmission quality, platform continuity and digital dividend outcomes. The fourth category, strategic positioning, examines the responses of Rai, Mediaset, local broadcasters, Sky, IPTV providers and OTT platforms. The fifth category, market consequences, captures advertising fragmentation, platform rivalry, audience behaviour and the growing role of hybrid services.

The analysis proceeded in three stages. First, the source material was organized chronologically in order to reconstruct the sequence of broadcasting modernization. Second, the material was coded thematically according to the five analytical categories described above [5]. Third, the findings were compared across different groups of actors to identify structural asymmetries. This comparative logic is particularly important because the same technological transformation may produce different outcomes depending on the scale of the actor, capital resources, content portfolio and regulatory obligations.

Findings/Discussion

1. DTT modernization after 2015: from switch-off to platform restructuring. The Italian DTT story did not conclude with the completion of analogue switch-off. After 2015, the central challenge shifted towards maintaining a strong terrestrial broadcasting platform while simultaneously releasing valuable spectrum for mobile broadband services and adapting television delivery to increasingly connected devices [6]. The 700 MHz refarming process altered the strategic environment, as broadcasters were required to operate within a narrower portion of the UHF spectrum while preserving coverage, service continuity and audience expectations regarding transmission quality.

This phase transformed DTT from a conventional transmission platform into a component of a broader audiovisual ecosystem. Broadcasters could no longer focus solely on terrestrial coverage; instead, they were required to manage the evolving relationship between DTT, satellite complementarity, IPTV, smart television applications, OTT services and regulatory requirements relating to platform visibility and accessibility [7]. This explains why the strategic value of DTT after 2015 differs from its role during the initial switch-off period. Increasingly, its significance lies in ensuring universal reach, system resilience, free-to-air accessibility and complementarity with broadband-based services.

2. Main cost categories for broadcasters. The first major cost category concerns infrastructure renewal. Broadcasters and network operators were required to reorganize frequency allocations, adjust transmitters, filters and multiplexing equipment, and ensure compatibility with evolving technical standards [8]. These expenditures are substantial in absolute terms for national operators and proportionally burdensome for smaller local broadcasters.

The second category relates to receiver and consumer migration. More efficient standards such as DVB-T2 and HEVC offer improvements in capacity and transmission quality; however, they also require compatible television sets or decoding devices. If migration occurs too rapidly, part of the audience may lose access to television services; if it proceeds too slowly, gains in spectrum efficiency are delayed. This creates both a regulatory and commercial dilemma, as broadcasters depend upon audience reach while regulators pursue more efficient spectrum utilization.

The third category involves content and portfolio management. Expanded transmission capacity can support additional channels, high-definition services and thematic segmentation, yet these opportunities require investment in programming, content rights, scheduling and marketing.

DTT capacity becomes economically valuable only when it is linked to content capable of attracting audiences and generating advertising or subscription revenues.

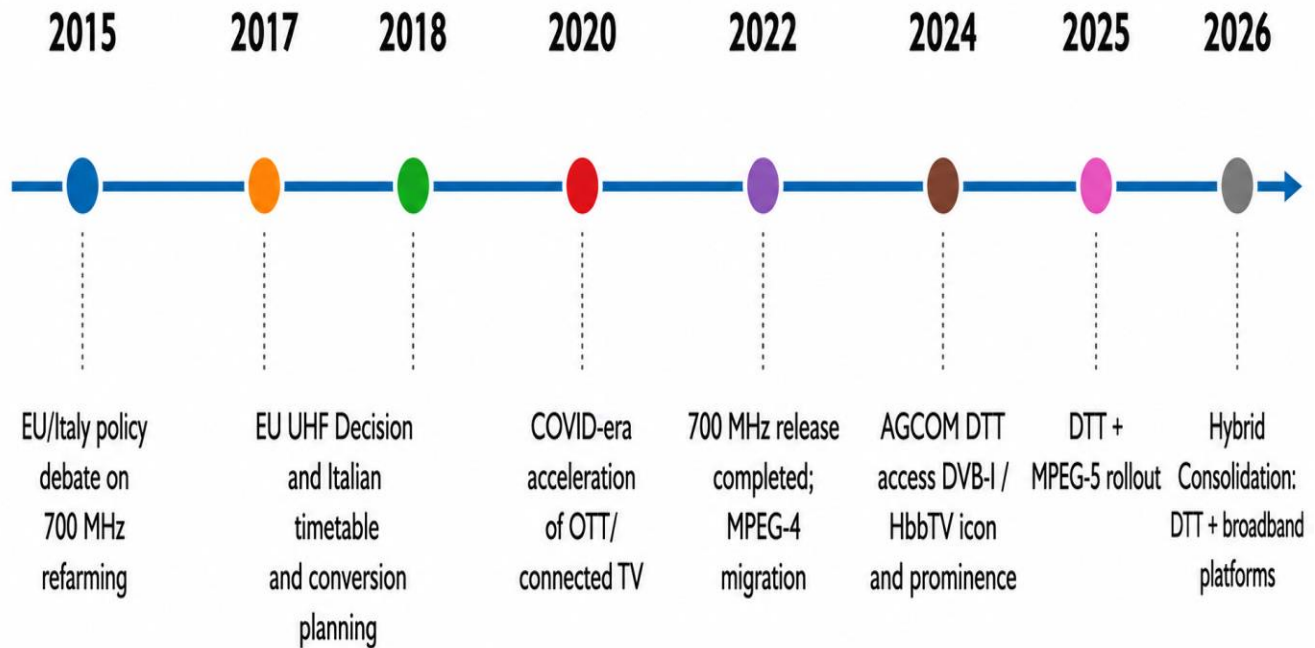


Figure 1 - Recent evolution of Italy's DTT ecosystem, 2015-2026

Source: compiled by the author based on regulatory and industry materials, 2015–2026.

The fourth category concerns organizational capability. Contemporary digital broadcasting increasingly requires expertise in encoding technologies, data analytics, connected television applications, rights management, user-interface design and multi-platform marketing. Broadcasters historically structured around linear generalist channels must now manage increasingly complex digital portfolios operating across both terrestrial and broadband environments [9].

3. Uneven impact on national and local broadcasters. The effects of DTT modernization are inherently asymmetric. Large national broadcasters are generally better positioned because they are able to combine technical capacity with established brands, extensive content libraries, sophisticated advertising systems and integrated online services [10]. Rai can align DTT with its public-service mission and RaiPlay, while Mediaset is able to integrate free-to-air television, advertising, Mediaset Infinity and broader commercial portfolio management. Local broadcasters, by contrast, face a more fragile environment. Their revenue bases are smaller, advertising markets are geographically more limited and their capacity to finance technological transition is comparatively weaker. During the analogue era, some local broadcasters were able to differentiate advertising across provinces or sub-regional markets. Although digital single-frequency network (SFN) planning improves spectrum efficiency, it may simultaneously reduce this operational flexibility. The result is a classic policy trade-off: the technical system becomes more efficient, while the business model of certain local operators becomes increasingly vulnerable

This asymmetry is central to the Italian case. DTT modernization may represent a strategic

opportunity for broadcasters possessing scale, capital and content resources, yet it may become a financial burden for operators lacking sufficient investment capacity, premium content or multi-platform capabilities. Consequently, policy success should be evaluated not solely in terms of cleared frequencies or technical compliance, but also with regard to the long-term sustainability of the broadcasting ecosystem.

Table 3. Costs and benefits of DTT modernization for broadcasters

Cost categories	Benefit categories
Infrastructure renewal: transmitters, filters, multiplexing, monitoring and frequency coordination.	Spectrum efficiency: more services within less spectrum and better long-term use of the UHF band.
Receiver migration: compatibility problems related to MPEG-4, DVB-T2 and HEVC.	Quality improvement: potential for HD, Full HD, 4K and more efficient compression.
Content expansion: additional slots require programming, rights and brand development.	Portfolio strategy: thematic channels, public-service channels and targeted audience segmentation.
Regulatory adaptation: compliance with spectrum, prominence, access and consumer-information rules.	Platform continuity: DTT remains a mass free-to-air platform even in the broadband era.
Local broadcaster burden: weaker capital base and reduced flexibility in advertising geography.	Hybrid integration: terrestrial reach combined with broadband interactivity and on-demand services.

4. Hybrid television and the new meaning of access. During the initial phase of DTT development, access was primarily determined by signal coverage and decoder availability. In the contemporary environment, however, access increasingly depends upon platform prominence, smart television interfaces, applications, electronic programme guides and the integration of broadcast and broadband services. The 2024 AGCOM regulation concerning a DTT access icon illustrates this changing landscape: viewers must be able to locate terrestrial services easily on connected devices; otherwise, the visibility of free-to-air broadcasting may decline even where transmission coverage remains available [11].

Hybrid television is also reshaping the economics of DTT. Broadcast distribution remains highly efficient for simultaneous mass audiences, emergency communication and universal access. Broadband distribution, by contrast, is more effective in providing personalization, interactivity, data-driven services and on-demand catalogues. Consequently, the strategic direction for Italian broadcasters is not to replace DTT with broadband distribution, but rather to integrate DTT within a coherent and complementary multi-platform environment.

5. Strategic outcomes of selected actors. The strategic consequences of the Italian DTT transition differed substantially across market actors. While digital broadcasting created new opportunities for audience expansion, platform diversification and revenue generation, it also exposed broadcasters and media operators to uneven technological, regulatory and commercial

constraints [12]. Table 4 summarizes the main opportunities, limitations and strategic implications experienced by selected actors within the Italian DTT ecosystem.

6. Synthesis: who benefits and who pays? The distribution of benefits and costs depends largely on the relevant time horizon. In the short term, broadcasters and viewers bear the costs of transition through infrastructure renewal, receiver replacement, information campaigns and service reorganization [13]. In the medium term, national broadcasters and network operators benefit from more efficient spectrum utilization and improved portfolio management. In the long term, society benefits from the digital dividend and from a more integrated media infrastructure, provided that accessibility and media pluralism are effectively preserved [14].

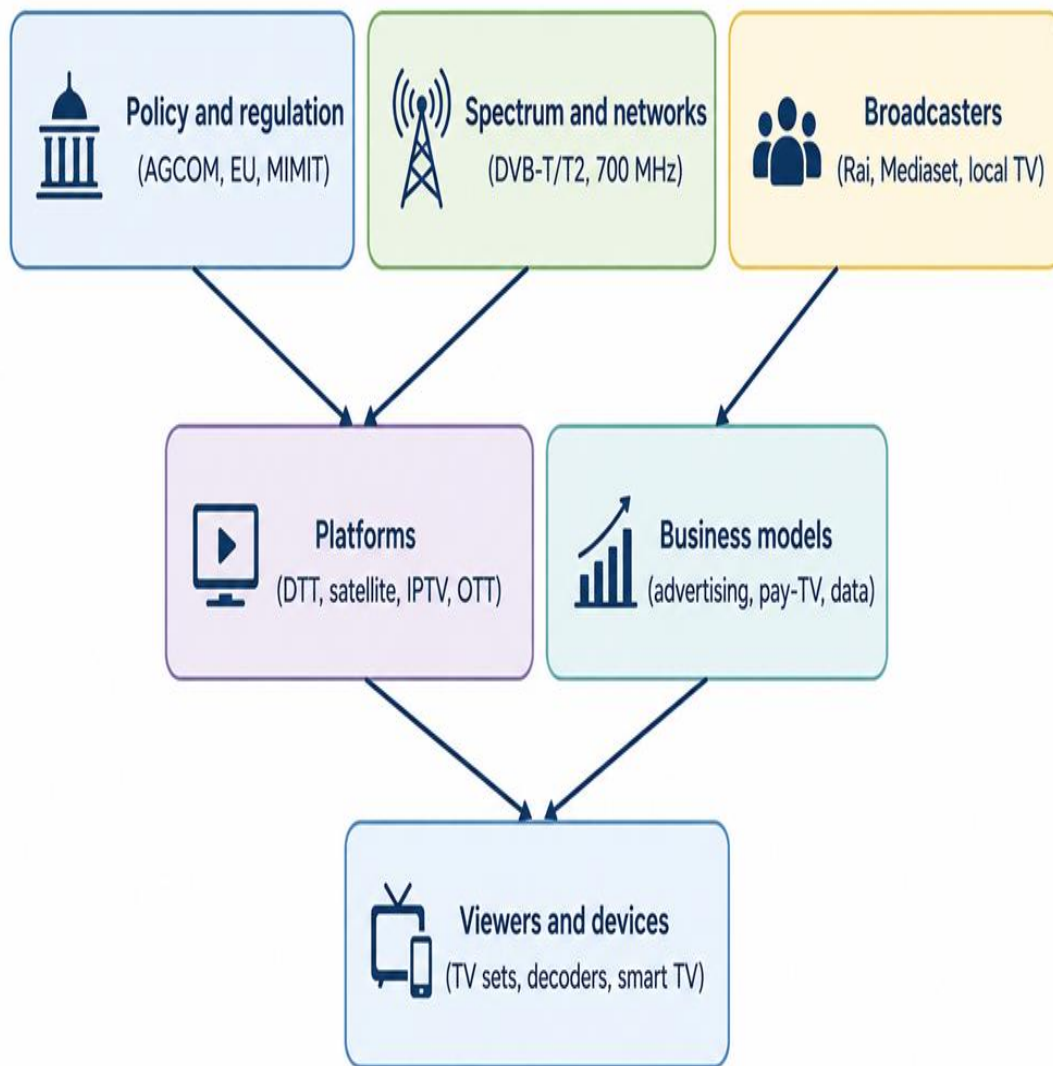


Figure 2. Analytical model of DTT transformation as a socio-technical ecosystem

Source: compiled by the author.

The Italian case demonstrates that technological efficiency does not automatically translate into economic efficiency for all actors involved. More efficient codecs and transmission standards

may increase capacity, yet they can also generate additional costs for both households and broadcasters. A greater number of channels may expand consumer choice, but it may simultaneously fragment audiences and weaken advertising value. Similarly, enhanced platform integration can improve the user experience while also raising important questions concerning prominence, technological neutrality and control over platform interfaces [15].

Table 4. Strategic outcomes of selected actors in the Italian DTT transition

Actor	Main opportunity	Main constraint	Strategic implication
Rai	Universal public-service reach through DTT, Tivùsat and RaiPlay.	Platform neutrality, rights management and accessibility obligations.	DTT remains essential for public-service universality but must be integrated with connected services.
Mediaset / MFE	Commercial portfolio strategy across free TV, advertising and Mediaset Infinity.	Competition from OTT platforms and high cost of premium rights.	DTT supports mass reach, while online platforms support additional monetization.
Local broadcasters	Regional visibility and local identity.	High relative transition costs, weaker advertising and SFN constraints.	Require targeted support and flexible regulation to preserve local pluralism.
Sky and satellite platforms	Premium bundles, HD/UHD capacity and national coverage.	Higher subscription model and regulatory limits in terrestrial markets.	Satellite remains a benchmark for quality and premium content.
IPTV/OTT operators	Personalization, on-demand catalogues and data-driven marketing.	Dependence on broadband quality and subscription fatigue.	They intensify competition and push broadcasters toward hybrid strategies.

Conclusion

The Italian experience with digital terrestrial television demonstrates that broadcasting modernization constitutes a socio-technical transformation rather than a purely engineering undertaking. The period from 2015 to 2026 confirms that the central challenges of contemporary broadcasting extend far beyond the original analogue switch-off. They increasingly involve spectrum refarming, DVB-T2/HEVC migration, receiver compatibility, hybrid television development, platform visibility and intensifying competition from OTT and broadband-based services.

The findings of this study indicate that DTT continues to provide significant public and strategic value. It supports spectrum efficiency, universal free-to-air reach, public-service accessibility, network resilience and the potential for enhanced transmission quality. At the same

time, modernization imposes considerable burdens on broadcasters, including infrastructure investment, regulatory compliance, content expansion, organizational adaptation and the growing risks associated with audience fragmentation. These costs and opportunities are distributed unevenly. National broadcasters and vertically integrated media groups are generally better positioned to convert DTT modernization into a strategic advantage, whereas local television operators remain comparatively more vulnerable to technological and economic pressures.

The study further demonstrates that technological efficiency does not automatically translate into economic sustainability for all actors within the broadcasting ecosystem. Digital capacity acquires strategic value only when supported by compelling content, platform interoperability, stable audience relationships and sustainable business models. Consequently, the long-term success of digital broadcasting cannot be assessed solely through technical indicators or spectrum efficiency outcomes.

The principal policy implication is that future broadcasting reforms should pursue a balanced approach that combines technological modernization with media pluralism, local broadcasting sustainability and the practical accessibility of public-interest content. For Italy, and for other countries undergoing similar transitions, the future of DTT is unlikely to consist of isolated terrestrial broadcasting alone. Rather, it is increasingly likely to evolve towards a hybrid and integrated media environment in which the efficiency and reliability of broadcast networks are combined with the flexibility, interactivity and personalization offered by broadband-based services.

References

1. Brown, R.G. Picard (eds.), *Digital Terrestrial Television in Europe*, Lawrence Erlbaum
2. Associates, Mahwah, NJ, USA, 2005.
3. P. Iosifidis, "Digital switchover in Europe", *Westminster Papers in Communication and Culture*, 8(1), 2011, pp. 5–23.
4. J. Adda, M. Ottaviani, *The Economics of Digital Terrestrial Television: A Public Policy Problem*, CEPR Discussion Paper No. 5183, London, UK, 2005.
5. K. Krippendorff, *Content Analysis: An Introduction to Its Methodology*, 2nd ed., Sage Publications, Thousand Oaks, CA, USA, 2004.
6. R.K. Yin, *Case Study Research and Applications*, 6th ed., Sage, Thousand Oaks, CA, USA, 2018.
7. European Parliament and Council, "Directive 2007/65/EC amending Council Directive 89/552/EEC on audiovisual media services", *Official Journal of the European Union*, 2007.
8. European Commission, "State aid C 52/2005 (ex NN 88/2005) – Italy: Subsidies for digital terrestrial decoders", *Official Journal of the European Union*, L147/1, 2007.
9. Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni (AGCOM), *Annual Reports and Communications Market Analyses on Television and Digital Terrestrial Broadcasting*, Rome, Italy, various years.
10. AGCOM, Resolution No. 366/10/CONS, Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni, Rome, Italy, 2010.
11. AGCOM, *Annual Report on the State of Services and Activity*, Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni, Rome, Italy, 2011.
12. International Telecommunication Union (ITU-R), *Final Acts of the Regional*

- Radiocommunication Conference for Planning of the Digital Terrestrial Broadcasting Service (RRC-06), Geneva, Switzerland, 2006.
13. International Telecommunication Union (ITU), Guidelines and Reports on the Transition from Analogue to Digital Broadcasting and the Digital Dividend, Geneva, Switzerland, various years.
 14. European Broadcasting Union (EBU), Technical Report TR 011: The Implementation of Single Frequency Networks (SFN) in the DVB-T System, Geneva, Switzerland, 2010.
 15. European Broadcasting Union (EBU), Technical Reports on Digital Terrestrial Television, Spectrum Efficiency and Digital Dividend, Geneva, Switzerland, various years.
 16. Fondazione Ugo Bordoni, Technical Reports on Frequency Coordination for the Switch-off in Italy, Rome, Italy, 2009.
 17. Auditel, Annual Reports on Italian Television Consumption, Milan, Italy, 2003–2012.
 18. Rai S.p.A., Annual Reports and Financial Statements, Rome, Italy, 2003–2012.
 19. Mediaset S.p.A. / MediaForEurope, Annual Reports and Financial Statements, Milan, Italy, 2003–2012.
 20. Ministero dello Sviluppo Economico / Ministero delle Imprese e del Made in Italy, Decrees and Communications Concerning the 700 MHz Refarming Process and Compensation Mechanisms, Rome, Italy, various years.
 21. C.S. Nissen, Making a Difference: Public Service Broadcasting in the European Media Landscape, Indiana University Press, Bloomington, USA, 2006.
 22. P. Iosifidis, Public Television in the Digital Era: Technological Challenges and New Strategies for Public Service Broadcasters in Europe, Palgrave Macmillan, London, UK, 2007.
 23. M. Cave, “The transition to digital television”, Information Economics and Policy, 17(2), 2005, pp. 193–207.
 24. G. Richeri, “The Italian television system between European rules and national peculiarities”, in: Media Policy for the 21st Century, 2004.
 25. Lear, The Impact of State Aid on Competition: The Case of Digital Decoders in Italy, Report for the Directorate-General for Competition, Brussels, Belgium, 2006.
 26. Italian Law No. 112/2004 (Gasparri Law), Principles for the Organization of the Broadcasting System and the RAI-Radiotelevisione Italiana S.p.A., Rome, Italy, 2004.

Information about the author:

Luca Battanta – PhD, University of Milan Bicocca, Milan, Italy



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-304-317>

Протоколдық SRE-валидация контуры бар актуарлық ML-платформа

К.Г. Мадияров* , **О.Я. Швец** 

Новосібір мемлекеттік экономика және басқару университеті, Новосібір, Ресей

E mail: kuan.mad@mail.ru, o.y.shvec@edu.nsuem.ru

Аңдатпа. Сақтандыру секторында машиналық оқытуға негізделген модельдер сыйлықақыны есептеу, клиенттің кетуін болжау, өтініштерді мәтіндік талдау және сервистік шешімдерді қолдау сияқты қолданбалы міндеттерде кеңінен пайдаланылады. Алайда практикада мұндай модельдер көбіне өзара байланыспаған модульдер ретінде енгізіледі, сондықтан деректер сапасын тексеру, жылыстау тәуекелін бақылау, метрикаларды тіркеу және сервистік күйді бағалау бірыңғай тәртіппен жүргізілмейді. Мақалада аталған мәселені шешуге бағытталған келесі тәсіл қарастырылады — протоколдық SRE-валидация контуры бар актуарлық ML-платформа ұсынылады. Платформа микросервистік архитектураға негізделген және деректерді жинау мен даярлау сервистерін, модельдерді оқыту және бағалау модульдерін, нәтижелерді ұсыну интерфейсін біріктіреді. Протокол шеңберінде әрбір кезеңде құрылымдық тексеру, қателерді жіктеу, дрейфті бақылау, метрикаларды салыстыру және артефакттардың өндірістік ортаға жарамдылығын растау рәсімдері орындалады. Мұндай тәсіл модельді қайта оқыту мен жаңартуды басқарылатын режимде жүргізуге, алдыңғы нұсқамен салыстырмалы тұрақтылықты сақтауға және сервистің үздіксіз жұмысын қамтамасыз етуге ықпалын тигізеді. Сонымен бірге ол модель нәтижелерін тек сапа көрсеткіштерімен емес, эксплуатациялық контекстпен бірге бағалауға жол ашады. Ұсынылған шешім сақтандыру ұйымдарында тәуекелдерді модельдеудің сенімділігін арттыруға және ML-жүйелердің өзгерістерге төзімділігін күшейтуге бағытталған.

Түйін сөздер: актуарлық платформа; ML-конвейер; протоколдық валидация; жылыстауды бақылау; бақыланым; SRE

Кіріспе

Сақтандыру деректері әлдеқашан тарифті есептеудің ғана көзі болудан қалды. Бүгінде бір ақпараттық контурда клиентті ұстап қалу, полис құнын болжау, өтініштерді маршрутизациялау, сервистік тәуекелдерді бағалау және клиентпен өзара әрекеттесуді қолдау сияқты міндеттер қатар шешіледі. Сондықтан модельдің практикалық құндылығы тек дәлдігімен емес, кіріс деректерінің шығу тегі қаншалықты айқын екенімен, оларды пайдалану шектеулері қалай тіркелетінімен және алынған нәтижені нақты сервиске қайта өндіруге бола ма деген мәселемен де айқындалады.

Сақтандыру аналитикасына арналған зерттеулерде тәуекел-классификация, жоғары кардиналды белгілермен жұмыс істеу және үлкен деректерді пайдалану мәселелері егжей-тегжейлі қарастырылады [1-4]. Еңбектердің жеке бір тобы мәтіндік өтініштер мен клиент хабарламаларын көпсыныпты маршрутизациялауға арналған [5-7]. MLOps пен ML-жүйелерді эксплуатациялау жөніндегі әдебиетте деректер нұсқаларын басқару, метрикалар, мониторинг және жеткізу рәсімдері назарға алынады [8-10]. Алайда осы бағыттардың түйісінде елеулі олқылық сақталып отыр: сақтандыру ML-контурлары көбіне не модельдер жиынтығы, не инженерлік пайплайн ретінде сипатталады, ал деректер сапасы, модельдік артефакт және сервистің эксплуатациялық жай-күйі арасындағы байланыс жеткілікті дәрежеде формалданбайды.

Қарастырылған зерттеудің мәселесі мынада: сақтандыру ML-конвейері үшін кету, сыйлықақы, мәтін, travel және loyalty бағыттары бойынша жекелеген модельдерді оқыту жеткіліксіз. Деректерді анықтауды, құрылымдық тексеруді, жылыстау тәуекелдерін диагностикалауды, оқытуды, метрикаларды сақтауды, сервистік инференсті және эксплуатациялық көрсеткіштерді дәйекті түрде тіркейтін бірыңғай протоколдық контур қажет. Мұндай контурдың болмауы не метрикалардың жасанды түрде жоғарылауына, не өмірлік циклдің әртүрлі міндеттері мен кезеңдері бойынша нәтижелердің салыстырылмауына әкеледі.

Мақаланың мақсаты — қайта өндіруге болатын жергілікті сервис негізінде протоколдық бақылауы бар сақтандыру ML-конвейерін ұсыну және тәжірибелік тұрғыдан тексеру. Қойылған мақсатқа сәйкес зерттеу барысында мынадай міндеттер белгіленді: 1) деректер мен протокол құрылымын беру; 2) валидация рәсімін және диагностикалық сигналдарды көрсету; 3) бірнеше сақтандыру контурлары бойынша нәтижелерді салыстыру; 4) протоколдың модельдік метрикаларды интерфейспен, артефакттар тізілімімен және SRE-бақыланымымен қалай байланыстыратынын көрсету.

Мәселенің күрделілігі автосақтандыру, тұрғын үйді сақтандыру, мәтіндік өтініштер, travel-сценарийлер мен loyalty үшін жеке модельдерді оқытудың өзінде емес, оларды бірыңғай контурға келісілген түрде енгізуде жатыр. Егер құрылымдық валидация, жылыстауды бақылау, метрикаларды тіркеу және сервистік телеметрия бөлек орындалса, онда тіпті жақсы Ассигасу немесе R^2 мәндерінің өзі деректер контексті мен орналастыру шарттарынан тыс дұрыс түсіндірілмейді. Осыған байланысты датасетті анықтаудан бастап артефактты сақтауға және эксплуатациялық тексеруге дейінгі бүкіл жолы бірыңғай протоколмен берілетін платформаны сипаттау міндеті туындайды. Мақалада протоколдық SRE-валидация контурлары бар актуарлық ML-платформа қарастырылады.

Жұмыстың мақсаты — бірыңғай протоколдың қайта өндіруге болатын жергілікті сервис аясында деректерді, модельдерді, артефакттарды және сервистік телеметрияны қалай байланыстыратынын көрсету. Осы мақсатта қолданылған деректер құрамы, протокол құрылымы, метрикалар мен диагностикалық ережелер жиыны дәйекті түрде сипатталып, бұдан кейін бірнеше сақтандыру контуры бойынша алынған нәтижелер және олардың сервистік мәні талқыланады.

Әдіснама

Платформа прототипі FastAPI негізіндегі жергілікті сервис түрінде, браузерлік интерфейспен және модельдер мен есептік артефакттарға арналған жеке каталогтармен жүзеге асырылды. Мұндай шешім оқыту мен эксплуатацияны бір процестің өзара байланыстыруға ынғайлы болып табылады: әрбір іске қосудан кейін құрылымдық тексеру нәтижелері, модель метрикалары, артефакттар тізілімі және протоколдың жиынтық көрсеткіштері тіркеледі. Эксперименттік база ретінде churn, home premium, мәтіндік классификация, travel және loyalty міндеттеріне арналған ашық сақтандыру деректер жиынтықтары пайдаланылды. Экспериментке алты ашық жиынтық енгізілді: autoinsurance churn [11], home insurance train және home insurance test [12], bitext insurance [13], travel insurance [14] және loyalty [15]. Жалпы көлемі 3 031 858 жазбаны құрайды.

Кесте 1. Деректер контурлары және құрылымдық валидация нәтижелері

Контур	Жол саны	Баған саны	Бос мән	Дубли кат	ID-қауіп	Күн өрісі	Сапа
auto	1 680 909	22	2 111 311	жоқ	2	3	0,9229
text	39 000	5	жоқ	жоқ	0	анықталмаған	0,9724
home_train	1 000 000	28	жоқ	жоқ	2	анықталмаған	0,9800
home_test	300 000	28	жоқ	жоқ	2	анықталмаған	0,9800
travel	10 000	7	жоқ	205	0	анықталмаған	0,9713
loyalty	1 949	8	335	жоқ	1	анықталмаған	0,9685

Кестелік контурлар үшін сандық және категориялық белгілері аралас деректерге төзімді алгоритмдер қолданылды; олар бос мәндерді алдын ала өңдеумен, категорияларды кодтаумен және идентификаторлық өрістерді бақылаумен толықтырылды. Мәтіндік модульде өтініштер TF-IDF әдісімен векторланады, одан кейін классификация логистикалық регрессия арқылы орындалады; мұндай үйлесім сирек мәтіндік ұсынылымдармен тиімді жұмыс істейді әрі есептеу тұрғысынан интерпретациялауға қолайлы болып қалады [16, 17]. Барлық сценарийлерде оқыту модельді, параметрлердің қысқаша тізілімін және жарияланымдық артефакттарды reports каталогында сақтаумен аяқталады. Прототиптік режимде тұрғын үй бойынша сыйлықақы болжамы 150 000 оқыту

(train) және 50 000 тексеру (test) көлеміндегі бақыланатын іріктемеде оқытылды, бұл артефактты дайындау уақыты қолайлы деңгейде сақталған жағдайда қайта өндірілуін қамтамасыз етті. Барлық модельдер нысаналы айнымалы, файл көлемі және оқыту ұзақтығы көрсетіліп, тізілімге енгізіледі.

1-кесте көрсеткендей, бастапқы деректер сапасы әртүрлі сақтандыру контурларында бірдей емес. Ең сезімтал болып auto-контур шықты, мұнда бос мәндердің едәуір көлемі, күн өрістері және идентификаторлық қауіп белгілері бір мезгілде кездеседі. Ал home, text, travel және loyalty сценарийлерінде деректер құрылымы анағұрлым орнықты көрінеді, дегенмен бұл жағдайларда да протокол жалпы толықтықты ғана емес, кейінгі оқыту мен модельді интерпретациялауға әсер етуі мүмкін белгілер қасиеттерін тіркейді.

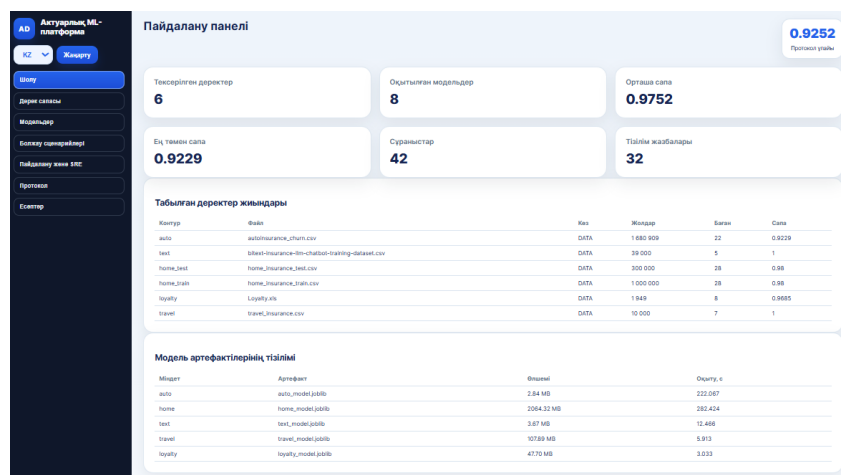
Құрылымдық валидация ең проблемалы контурдың autoinsurance екенін көрсетті: 1 680 909 жол болғанда онда 2 111 311 бос мән, үш күн өрісі және идентификаторлық қауіптің екі белгісі бар. Керісінше, home_train және home_test контурларында бос мәндер жоқ, бірақ екі identifier-risk өрісі (uuid және quote_id) қамтылған, сондықтан оларды белгілер кеңістігінен айқын түрде алып тастау қажет. Loyalty контурында жергілікті бос мәндер табылды, ал travel контурында 205 дубликат анықталды. Демек, сызбалар мен деректерді бірыңғай тексеру оқытуға дейінгі кезеңде сандық score қана емес, интерпретациялауға болатын тәуекел сигналдарын да береді.

Протоколдық контур бірізді байланысқан сегіз кезеңді қамтиды: деректер жиынтықтарын анықтау, құрылымдық тексеру, жылыстауды бақылау, мамандандырылған модельдерді оқыту, метрикаларды сақтау, сервистік инференс, SRE-бақыланымы және жеткізу контуры. Мұндай бөліну өз алдына мақсат емес; оның мәні — платформа ішіндегі деректер мен артефакттардың қозғалыс траекториясын бір сипаттамада тұтас ұстап тұру.

Кәдімгі практикада жүктеу, оқыту және тексеру қадамдары көбіне бөлек тіркеледі. Қарастырылып отырған платформада модель кіріс деректерінің күйі, диагностикалық сигналдар, артефакт көлемі, оқыту уақыты, метрикалар журналдары және эксплуатациялық телеметрия ескерілетін неғұрлым кең объектінің бөлігі ретінде ғана қабылданады. Соның арқасында қорытынды баға тек нысаналы метриканың мәніне емес, сол метриканың қандай контексте алынғанына да тәуелді болады.

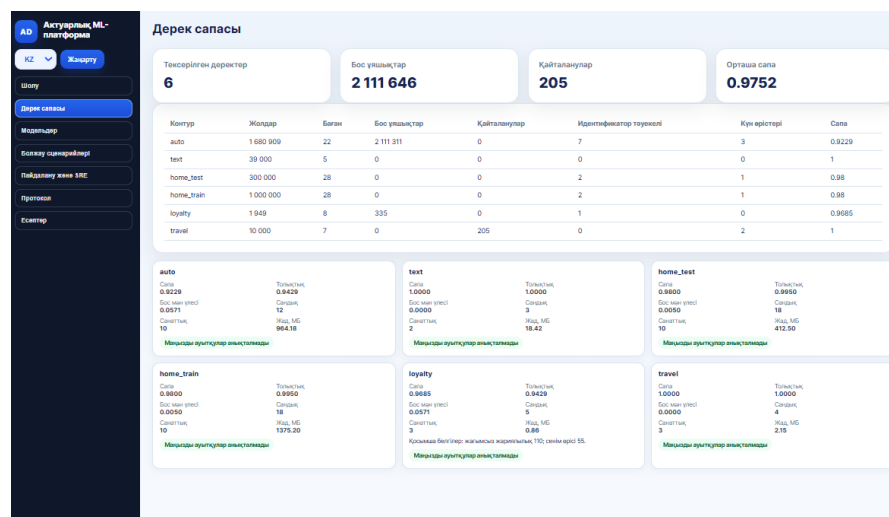
Мәтіндік контурда құжаттар алдымен TF-IDF кеңістігіне түрлендіріледі, мұнда белгі мәні терминнің құжаттағы жиілігі мен оның корпустың таралуын түзету арқылы анықталады [16]. Осындай ұсынылым үстінде логистикалық регрессия [17] пайдаланылады; ол сирек белгілер матрицаларымен орнықты жұмыс істейді және есептеу контурын шамадан тыс күрделендірмей сенімді базалық классификатор жасауға мүмкіндік береді. Классификациялық міндеттер үшін Assurasy, macro-F1 және AUC метрикалары қолданылады. Assurasy дұрыс классификацияланған бақылаулардың үлесін көрсетеді [18]. Macro-F1 сыныптар бойынша F1 өлшемінің салмақталмаған орташа мәні ретінде есептеледі, сондықтан ең жиі кездесетін сыныптың басымдығына тәуелсіз түрде модель сапасын бағалауға мүмкіндік береді [19]. AUC объектілерді болжамды бағалары бойынша ранжирлеу сапасын сипаттайды және шешім қабылдаудың бекітілген шегіне тәуелді емес [20]. Регрессиялық контурларда MAE, RMSE және R^2 қолданылады. MAE болжамның орташа абсолют қателігін көрсетеді [21]. RMSE қатенің квадратына және кейін квадрат түбірін

алуға негізделетіндіктен, ірі ауытқуларды күштірек айқындайды [22]. R^2 коэффициенті тұрақты базалық болжаммен салыстырғанда нысаналы айнымалы вариациясының қандай үлесін модель түсіндіретінін көрсетеді; бұл ретте модель базалық бағдардан на шар жұмыс істесе, оның мәні теріс те болуы мүмкін [23]. Бұдан басқа, артефакттар тізілімі модель файлының көлемін және оқыту ұзақтығын сақтайды, ал протокол қосымша интерпретацияны қажет ететін жағдайлар үшін арнайы белгілерді бөліп көрсетеді: күдік тудыратындай жоғары метрикалар, идентификаторлық қауіп белгілерінің болуы, дубликаттар және оқыту мен бақылау деректерінің қиылыстары. Осындай көрсеткіштер жиынтығы модель сапасын оқшау түрде емес, деректер сипаттамаларымен және оны кейін пайдалану шарттарымен өзара байланыста ашып көрсетуге жол ашады.



Сурет 1. Контурлар картасы мен модель артефакттары тізілімін қамтитын сервистің шолу панелі

1-суретте бір кеңістікте деректер контурлары, модельдер тізілімі және негізгі эксплуатациялық көрсеткіштер тоғысқан сервистің шолу панелі берілген.



Сурет 2. Бос мәндер, дубликаттар және идентификаторлық қауіптер бойынша жинақталған көрсеткіштері бар деректер сапасы экраны

Мұндай экран тек навигациялық құрылғысы ғана ретінде қарастырылмайды: ол платформаның жекелеген модельмен оқшау жұмыс істеуге емес, сценарийлер мен артефакттарды салыстыруға бағдарланғанын көрсетеді.

2-суретте берілген деректер сапасы экраны кейінгі нәтижелерді түсіндірудің бастапқы нүктесі қызметін атқарады. Дәл осы жерде бос мәндер, дубликаттар, идентификаторлық белгілердің қауіптері және кейін модельдік метрикаларды талқылауда ескерілетін деректер жиынтықтарының өзге де қасиеттері тіркеледі.

Нәтижелер және талқылау

Алынған нәтижелер сақтандыру контурларының күрделілігі әртүрлі екенін растайды. Home-болжам үшін ықшам 5,27 MB артефакт және 11,638 с оқыту уақыты жағдайында $R^2 = 0,9848$ жоғары детерминация коэффициентіне қол жеткізілді. Loyalty контуры шағын деректер көлемінде практикалық тұрғыдан пайдалы деп бағалауға болатын $R^2 = 0,8564$ нәтижесін көрсетті. Travel контуры айтарлықтай күрделірек болып шықты: оқыту жылдам өткеніне қарамастан, регрессиялық сапа $R^2 = 0,4677$ мәнімен шектелді, ал артефакт көлемі 107,89 MB-қа жетті. Text-модулі үшін Accurasy мен macro-F1 көрсеткіштері шамамен 0,986 деңгейінде тұрақты болды, алайда category ассурасу қосымша түрде күдік тудыратындай жоғары деп белгіленді.

Ең айқын мысал — auto-контур. Оның сандық нәтижелері шекке жуық мінсіз көрінеді, бірақ протокол мұндай мәндерді шартсыз қабылдамайды. Керісінше, ол leakage-aware ескертулерін автоматты түрде қалыптастырып, оларды деректер сипаттамаларымен — individual_id, address_id өрістерінің болуымен, бірнеше күн белгілерімен және бос мәндердің жоғары үлесімен — байланыстырады. Бұл протоколды сәндік қабаттан ғылыми және инженерлік тұрғыдан негізделген өзін-өзі тексеру тетігіне айналдырады.

Кесте 2. Модельдердің негізгі метрикалары және артефакт параметрлері

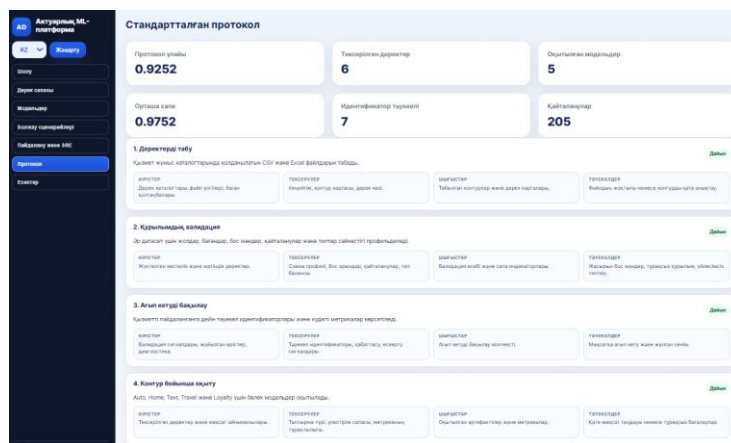
Контур	Метрикалар	Артефакт	Көлемі	Оқыту, с	Белгі
auto	Accuracy=0,9996; F1=0,9990; AUC=0,9988	auto_model.joblib	2,84 MB	213,619	күдік тудырады
home	MAE=41,11; RMSE=51,41; $R^2=0,9848$	home_model.joblib	5,27 MB	11,638	-
text	Acc=0,9859; F1=0,9860; cat-Accuracy =0,9906	text_model.joblib	3,67 MB	12,338	күдік бар cat-Acc
travel	MAE=251,56; RMSE=552,98; $R^2=0,4677$	travel_model.joblib	107,89MB	5,850	-
loyalty	MAE=0,3222; RMSE=0,4157; $R^2=0,8564$	loyalty_model.joblib	47,70 MB	2,949	-

Негізгі сандық нәтижелер мен сақталған модельдердің сипаттамалары 2-кестеде

жинақталған. Сандық метрикаларды ғана салыстыратын кәдімгі тәсілден айырмашылығы, мұнда болжау сапасы, артефакт көлемі, оқыту ұзақтығы және диагностикалық белгілер бірге берілген. Мұндай біріктіру модельді абстрактілі алгоритм ретінде емес, қайта өндірілуі, интерпретациялануы және сервистік контурға енгізілуі тиіс эксплуатациялық объектіге жатқызуға болатыны мүмкін.

2-кестеден көрінгендей, тұрғын үй контуры артефакттың ықшам көлемі мен оқытудың орташа уақыты жағдайында анағұрлым орнықты регрессиялық сапаны қамтамасыз етеді. Loyalty контуры едәуір аз бақылаулар жиынтығында практикалық тұрғыдан пайдалы дәлдік деңгейін көрсетіп, протоколдық схеманың тек ірі деректерге ғана емес, шағын жиынтықтарға да қолданылатынын дәлелдейді. Travel-сценарийінде сапа неғұрлым ұстамды болды, бұл бастапқы белгілер құрылымының қарапайымдылығы және деректер көлемінің аздығымен үйлеседі. Мәтіндік модуль жоғары Accuracy және macro-F1 мәндерін көрсетеді, алайда бұл көрсеткіштер сенімділіктің өздігінен жеткілікті дәлелі ретінде емес, протоколдық белгілермен бірге түсіндіріледі. Ең айқын мысал — автосақтандыру контуры: мұнда сандық метрикалар шекті мәндерге жақын, бірақ протокол бір мезгілде деректердің біртектес еместігін және ықтимал жылыстауға қосымша тексеріс қажет ететін белгілердің бар екенін көрсетеді.

Нәтижелердің қайта тексерілуін қамтамасыз ету үшін осы контурларда пайдаланылған бастапқы деректер ашық көздерден алынды: autoinsurance churn жиынтығы Kaggle платформасынан, home insurance train мен home insurance test жиынтықтары Hugging Face-terі BilalAhxmd/Insurance-data қорынан, bitext insurance жиынтығы bitext/Bitext-insurance-llm-chatbot-training-dataset репозиторийінен, travel insurance жиынтығы supersam7/travel_insurance қорынан, ал loyalty жиынтығы Kaggle-дері Customer Loyalty score dataset бетінен алынды [11-15].



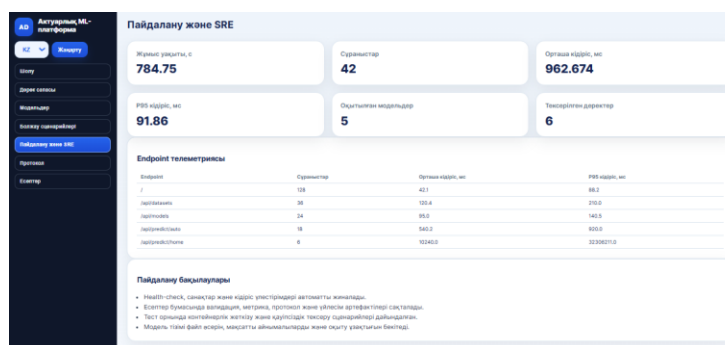
Сурет 3. Қадамдық мәртебелер, кірістер, тексерулер, шығыстар және тәуекелдер көрсетілген стандартталған протокол экраны

Платформа бірыңғай сервистік контур ретінде іске асырылған: онда пайдаланушылық сценарийлер, валидация нәтижелері, модельдік көрсеткіштер мен эксплуатациялық индикаторлар үйлестірілген веб-интерфейс арқылы қолжетімді. Интерфейс функционалдық бөлімдер бойынша ұйымдастырылып, жүйенің жиынтық күйінен деректер сапасына, модель сипаттамаларына, қолданбалы болжау сценарийлеріне,

протоколдық қадамдарға және эксплуатациялық көрсеткіштерге бірізді көшуге үміт арттырады. Жоғарыда қарастырылған бірыңғай құрылым ML-конвейерді тек есептеу нысаны емес, ішкі қызметтік файлдарға жүгінбей-ақ күйін интерпретациялауға болатын бақыланатын объект етеді.

Платформаның пайдаланушылық қабаты бірнеше пәндік сценарийді қолдайды: автосақтандырудағы кету қаупін бағалау, сақтандыру сыйлықақысын болжау, мәтіндік өтініштерді өңдеу, сондай-ақ travel және loyalty контурлары. Әр сценарий үшін интерфейс кіріс параметрлерінің келісілген пішінін ұсынады және нәтижені қолданбалы түрде қайтарады; бұл жүйені тек модельдерді баптау құралы ретінде емес, эксплуатацияға жақын жағдайда сервистің жұмысқа қабілеттілігін көрсететін орта ретінде де қарастырылады. Платформаның маңызды қасиеті — көптілділік: бөлімдер мен сценарийлер бір тілдік режимнің ішінде терминдерді араластырмай, үш тілде қолжетімді – ол орысша мен қазақша тілдерінде және ағылшын тілінде.

3-суретте сервистің сегіз қадамы жай формальды тізім ретінде емес, кірістері, тексерулері, шығыстары және тәуекелдері бар жұмыс реттілігі ретінде көрсетілген протокол экраны берілген. Мұндай ұсыну тәсілі мақала үшін маңызды, өйткені ол есептеу процесін оның интерпретациясымен көрнекі түрде байланыстырып, диагностикалық ескертпелердің қай кезеңде туындайтынын айқын көрсетеді.



Сурет 4. Сервистің эксплуатациялық контуры және SRE-телеметриясы экраны

4-суретте платформаның SRE-телеметриясы бар эксплуатациялық контуры көрсетілген. Мұнда сервистің қолжетімділігі, сұранымдар қарқындылығы және өңдеу кідірістері тіркеледі, сондықтан модель күйі оны пайдаланатын сервистің жай-күйімен бірге қарастырылады. Сақтандыру аналитикасы үшін бұл принципті маңызды: егер сервистік контур ашық емес немесе орнықсыз болса, модель сапасының жоғары болуының өзі практикалық құндылығын жоғалтады. Алынған нәтижелер протоколдық контурдың тек есептеулерді техникалық ұйымдастыру құралы ғана емес, қолданбалы сақтандыру ортасында модельдік нәтижелерді интерпретациялау тәсілі ретінде де пайдалы екенін көрсетеді. 2-кесте мен 3-4-суреттер қорытынды көрсетілген сапалық метрикаларының мәндерінің бастапқы деректер сапасымен, артефакттың көлемі мен түрімен, оқыту ұзақтығымен және сервистік контурдың ағымдағы жай-күйімен бірге ғана мәнді болатынын көрсетеді. Сондықтан нәтижелерді талқылау жекелеген сандар төңірегінде

емес, деректер, модель және эксплуатация шарттары арасындағы байланыс төңірегінде құрылады.

Мұндай ұсыну тәсілі жекелеген модельдерді көрсетуден әр контур бірдей қадамдар тізбегінен өтетін басқарылатын платформаны сипаттауға көшуге негіз болады: деректерді айқындау, құрылымдық тексеру, тәуекелдерді бақылау, оқыту, артефакттарды сақтау, сценарийлік пайдалану және эксплуатациялық қадағалау. Нәтижесінде қорытындылар бір-бірімен байланыспаған метрикалардың қосындысы ретінде емес, модельдік шешімдерді салыстырмалы, бақыланатын және сақтандырудың ақпараттық-талдамалық жүйесі құрамында одан әрі кеңейтуге жарамды ететін қайта өндірілуі мүмкін процестің сипаттамасы ретінде қалыптасады.

Қорытынды

Жұмыстың мақсатына қол жеткізілді: деректерді валидациялауды, модельдерді оқытуды, сервистік инференсті және эксплуатациялық бақыланымды бір қайта өндірілуі мүмкін платформада біріктіретін протоколдық бақылауы бар сақтандыру ML-конвейері құрылып, тәжірибелік тұрғыдан тексерілді. Қарастырылған платформа сақтандыру ML-контур үшін модель метрикаларының қорытынды мәндері ғана емес, оларды алу тәсілі, деректер құрылымы және сервистің эксплуатациялық жай-күйі де маңызды екенін көрсетеді. Протоколдық ұйымдастыру осы элементтердің барлығын бірыңғай сипаттамаға біріктіріп, нәтижелерді неғұрлым интерпретацияланатын етеді. Ұсынылған платформа деректер, модельдер, артефакттар және SRE-көрсеткіштер бір сервис контурының бөліктері ретінде қарастырылатын қайта өндірілуі мүмкін протоколды қалыптастырады. Құрылымдық валидация сақтандыру деректер жиынтықтарының толықтығы, дубликаттардың болуы және идентификаторлық белгілер тәуекелдері бойынша едәуір айырмашылық жасайтынын көрсетті, сондықтан оқыту алдындағы бірыңғай бақылау сызбасы формальды рәсім емес, қолдануға ыңғайлы негізгі талаптардың бірі. Бірнеше контур аясында алынған нәтижелер протоколдық тәсілдің тиімділігін растады: жоғары метрикалар тек диагностикалық белгілермен, артефакттар тізілімімен және модель оқытылған жағдайларды тексерумен бірге ғана мазмұнды интерпретация алады. Платформаның практикалық құндылығы — мониторингке, ішкі есептілікке және сақтандырудың ақпараттық-талдамалық жүйесін одан әрі дамытуға жарамды модельдік, протоколдық және эксплуатациялық артефакттардың бірыңғай жиынтығын қалыптастыруында.

Авторлардың қосқан үлесі.

К.Г. Мадияров зерттеудің негізгі идеясын ұсынды, платформаның тұжырымдамасы мен архитектурасын әзірлеуге, деректер контурларын жинақтауға, валидация және leakage-бақылау логикасын сипаттауға, модельдерді оқыту мен эксперименттерді жүргізуге жетекші үлес қосты. Сондай-ақ нәтижелерді жүйелеу, кестелер мен суреттерді дайындау

және мақаланың бастапқы нұсқасын жазу осы автордың қатысуымен орындалды.

О.Я. Швец зерттеудің ғылыми-әдіснамалық негізін нақтылауға, нәтижелерді интерпретациялауға, мақаланың құрылымы мен дәлелдеу логикасын жетілдіруге, сондай-ақ мәтінді ғылыми редакциялауға елеулі үлес қосты. Автор платформаның инженерлік шешімдерін, SRE-бақыланым мен протоколдық валидацияның мазмұнын талқылауға және мақаланың қорытындыларын тұжырымдауға қатысты.

Әдебиеттер тізімі

1. Eling M., Gemmo I., Guxha D., Schmeiser H. Big data, risk classification, and privacy in insurance markets // The Geneva Risk and Insurance Review. - 2024. - Vol. 49. - P. 75-126. DOI: 10.1057/s10713-024-00098-5.
2. Poufinas T., Gogas P., Papadimitriou T., Zaganidis E. Machine learning in forecasting motor insurance claims // Risks. - 2023. - Vol. 11(9). - Art. 164. DOI: 10.3390/risks11090164.
3. Shi P., Shi K. Non-life insurance risk classification using categorical embedding // North American Actuarial Journal. - 2023. - Vol. 27(3). - P. 579-601. DOI: 10.1080/10920277.2022.2123361.
4. Avanzi B., Taylor G., Wang M., Wong B. Machine learning with high-cardinality categorical features in actuarial applications // ASTIN Bulletin. - 2024. - Vol. 54(2). - P. 213-238. DOI: 10.1017/asb.2024.7.
5. Vinayak V., Chandrasekharan J. Consumer complaints classification using deep learning and word embedding models // Proceedings of the 2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Delhi, India, July 6-8, 2023. - P. 1-5. DOI: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10307286.
6. Vairetti C., Aranguiz I., Maldonado S., Karmy J.P., Leal A. Analytics-driven complaint prioritisation via deep learning and multicriteria decision-making // European Journal of Operational Research. - 2024. - Vol. 312(3). - P. 1108-1118. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.08.027.
7. Helmy Y., Ashraf M., Abdelhamid L. Assessing the effectiveness of various text classification algorithms in customer complaint classification // International Journal of Computer Applications. - 2024. - Vol. 186(2). - P. 8-16. DOI: 10.5120/ijca2024923346.
8. Kreuzberger D., Kuhl N., Hirschl S. Machine learning operations (MLOps): Overview, definition, and architecture // IEEE Access. - 2023. - Vol. 11. - P. 31866-31879. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3262138.
9. Liu R., Park K., Psallidas F. et al. Optimizing data pipelines for machine learning in feature stores // Proceedings of the VLDB Endowment. - 2023. - Vol. 16(13). - P. 4230-4239. DOI: 10.14778/3625054.3625060.
10. Zarour M., Alzabut H., Al-Sarayreh K.T. MLOps best practices, challenges and maturity models: A systematic literature review // Information and Software Technology. - 2025. - Vol. 183. - Art. 107733. DOI: 10.1016/j.infsof.2025.107733.
11. Kaggle. Auto Insurance churn analysis dataset [Электрондық ресурс]. - URL:

- <https://www.kaggle.com/datasets/merishnasuwal/auto-insurance-churn-analysis-dataset> (қаралған күні: 10.04.2026).
12. Hugging Face. BilalAhxmd/Insurance-data [Электрондық ресурс]. - URL: <https://huggingface.co/datasets/BilalAhxmd/Insurance-data/tree/main> (қаралған күні: 10.04.2026).
 13. Hugging Face. bitext/Bitext-insurance-llm-chatbot-training-dataset [Электрондық ресурс]. - URL: <https://huggingface.co/datasets/bitext/Bitext-insurance-llm-chatbot-training-dataset> (қаралған күні: 10.04.2026).
 14. Hugging Face. supersam7/travel_insurance [Электрондық ресурс]. - URL: https://huggingface.co/datasets/supersam7/travel_insurance/tree/main (қаралған күні: 10.04.2026).
 15. Kaggle. Customer Loyalty score dataset [Электрондық ресурс]. - URL: <https://www.kaggle.com/datasets/nasirhussainshah/multiple-linear-regression-dataset-loyalty-score> (қаралған күні: 10.04.2026).
 16. scikit-learn developers. TfidfVectorizer. scikit-learn 1.8.0 documentation [Электрондық ресурс]. - URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_extraction.text.TfidfVectorizer.html (қаралған күні: 04.01.2025).
 17. scikit-learn developers. LogisticRegression. scikit-learn 1.8.0 documentation [Электрондық ресурс]. - URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LogisticRegression.html (қаралған күні: 04.01.2025).
 18. scikit-learn developers. accuracy_score. scikit-learn 1.8.0 documentation [Электрондық ресурс]. - URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.accuracy_score.html (қаралған күні: 12.01.2026).
 19. scikit-learn developers. f1_score. scikit-learn 1.8.0 documentation [Электрондық ресурс]. - URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.f1_score.html (қаралған күні: 15.01.2026).
 20. scikit-learn developers. roc_auc_score. scikit-learn 1.8.0 documentation [Электрондық ресурс]. - URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.roc_auc_score.html (қаралған күні: 21.01.2026).
 21. scikit-learn developers. mean_absolute_error. scikit-learn 1.8.0 documentation [Электрондық ресурс]. - URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.mean_absolute_error.html (қаралған күні: 05.02.2026).
 22. scikit-learn developers. mean_squared_error. scikit-learn 1.8.0 documentation [Электрондық ресурс]. - URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.mean_squared_error.html

23. scikit-learn developers. r2_score. scikit-learn 1.8.0 documentation [Электрондық ресурс].
 - URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.r2_score.html
 (қаралған күні: 16.02.2026).

K.G. Madiyarov* , O.Ya. Shvets

Novosibirsk State University of Economics and Management, Novosibirsk, Russia

Actuarial ML Platform with a Protocol-Based SRE Validation Layer

Abstract. Insurance companies increasingly rely on machine learning methods to determine payouts and premiums, forecast customer churn, process complaint narratives and support a variety of service functions. In practice, however, such models often evolve as isolated modules, which makes data quality checks, leakage control, metric registration, and service-state assessment inconsistent across the analytical pipeline. This paper proposes an actuarial ML platform with a protocol-based SRE validation layer designed to integrate these procedures into a single operational framework. The platform follows a microservice architecture and combines data collection and preparation services, model training components, an evaluation block, and a results delivery interface. Within the protocol, each stage includes structural data checks, error classification, drift monitoring, metric comparison, and confirmation that model artifacts are suitable for production use. This approach enables controlled retraining and model updates, preserves comparability with previous versions, and supports service continuity. The proposed solution is aimed at improving the reliability of risk modeling in insurance organizations and strengthening the resilience of ML systems to changes in data and operating conditions.

Keywords: actuarial platform; ML pipeline; protocol validation; leakage control; observability; SRE

References

1. Eling M., Gemmo I., Guxha D., Schmeiser H. Big data, risk classification, and privacy in insurance markets // The Geneva Risk and Insurance Review. - 2024. - Vol. 49. - P. 75-126. DOI: 10.1057/s10713-024-00098-5.
2. Poufinas T., Gogas P., Papadimitriou T., Zaganidis E. Machine learning in forecasting motor insurance claims // Risks. - 2023. - Vol. 11(9). - Art. 164. DOI: 10.3390/risks11090164.
3. Shi P., Shi K. Non-life insurance risk classification using categorical embedding // North American Actuarial Journal. - 2023. - Vol. 27(3). - P. 579-601. DOI: 10.1080/10920277.2022.2123361.
4. Avanzi B., Taylor G., Wang M., Wong B. Machine learning with high-cardinality categorical features in actuarial applications // ASTIN Bulletin. - 2024. - Vol. 54(2). - P. 213-238. DOI: 10.1017/asb.2024.7.
5. Vinayak V., Chandrasekharan J. Consumer complaints classification using deep learning and word embedding models // Proceedings of the 2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Delhi, India, July 6-8, 2023. - P. 1-5. DOI: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10307286.

6. Vairetti C., Aranguiz I., Maldonado S., Karmy J.P., Leal A. Analytics-driven complaint prioritisation via deep learning and multicriteria decision-making // *European Journal of Operational Research*. - 2024. - Vol. 312(3). - P. 1108-1118. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.08.027.
7. Helmy Y., Ashraf M., Abdelhamid L. Assessing the effectiveness of various text classification algorithms in customer complaint classification // *International Journal of Computer Applications*. - 2024. - Vol. 186(2). - P. 8-16. DOI: 10.5120/ijca2024923346.
8. Kreuzberger D., Kuhl N., Hirschl S. Machine learning operations (MLOps): Overview, definition, and architecture // *IEEE Access*. - 2023. - Vol. 11. - P. 31866-31879. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3262138.
9. Liu R., Park K., Psallidas F. et al. Optimizing data pipelines for machine learning in feature stores // *Proceedings of the VLDB Endowment*. - 2023. - Vol. 16(13). - P. 4230-4239. DOI: 10.14778/3625054.3625060.
10. Zarour M., Alzabut H., Al-Sarayreh K.T. MLOps best practices, challenges and maturity models: A systematic literature review // *Information and Software Technology*. - 2025. - Vol. 183. - Art. 107733. DOI: 10.1016/j.infsof.2025.107733.
11. Kaggle. Auto Insurance churn analysis dataset [Electronic resource]. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/merishnasuwal/auto-insurance-churn-analysis-dataset> (accessed 10.04.2026).
12. Hugging Face. BilalAhxmd/Insurance-data [Electronic resource]. Available at: <https://huggingface.co/datasets/BilalAhxmd/Insurance-data/tree/main> (accessed 10.04.2026).
13. Hugging Face. bitext/Bitext-insurance-llm-chatbot-training-dataset [Electronic resource]. Available at: <https://huggingface.co/datasets/bitext/Bitext-insurance-llm-chatbot-training-dataset> (accessed 10.04.2026).
14. Hugging Face. supersam7/travel_insurance [Electronic resource]. Available at: https://huggingface.co/datasets/supersam7/travel_insurance/tree/main (accessed 10.04.2026).
15. Kaggle. Customer Loyalty score dataset [Electronic resource]. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/nasirhussainshah/multiple-linear-regression-dataset-loyalty-score> (accessed 10.04.2026).
16. scikit-learn developers. TfidfVectorizer, scikit-learn 1.8.0 documentation [Electronic resource]. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_extraction.text.TfidfVectorizer.html (accessed 04.01.2025).
17. scikit-learn developers. LogisticRegression, scikit-learn 1.8.0 documentation [Electronic resource]. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LogisticRegression.html
18. scikit-learn developers. accuracy_score, scikit-learn 1.8.0 documentation [Electronic resource]. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.accuracy_score.html

- learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.accuracy_score.html (accessed 12.01.2026).
19. scikit-learn developers. f1_score, scikit-learn 1.8.0 documentation [Electronic resource]. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.f1_score.html (accessed 15.01.2026).
20. scikit-learn developers. roc_auc_score, scikit-learn 1.8.0 documentation [Electronic resource]. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.roc_auc_score.html (accessed 21.01.2026).
21. scikit-learn developers. mean_absolute_error, scikit-learn 1.8.0 documentation [Electronic resource]. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.mean_absolute_error.html (accessed 05.02.2026).
22. scikit-learn developers. mean_squared_error, scikit-learn 1.8.0 documentation [Electronic resource]. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.mean_squared_error.html (accessed 09.02.2026).
23. scikit-learn developers. r2_score, scikit-learn 1.8.0 documentation [Electronic resource]. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.r2_score.html (accessed 16.02.2026).

Авторлар туралы мәлімет

Мадияров Куан Галымович — хат-хабар авторы, аспирант, Новосібір мемлекеттік экономика және басқару университеті, қызметтік мекенжайы: 630099, Новосібір қ., Каменская көшесі, 56, Ресей Федерациясы

Швец Ольга Яковлевна — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, қолданбалы информатика кафедрасы, Новосібір мемлекеттік экономика және басқару университеті, қызметтік мекенжайы: 630099, Новосібір қ., Каменская көшесі, 56, Ресей Федерациясы

Kuan Galymovich Madiyarov — corresponding author, postgraduate student, Department of Applied Informatics, Novosibirsk State University of Economics and Management, 56 Kamenskaya Street, Novosibirsk 630099, Russian Federation.

Olga Yakovlevna Shvets — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Informatics, Novosibirsk State University of Economics and Management, service address: 56 Kamenskaya Street, Novosibirsk 630099, Russian Federation.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Review

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-318-329>

Methodological Approaches of Machine Learning and Adaptive Personalization in Educational Gaming Platforms

M. Mansurova , **A. Kulatay*** , **D. Zhaisanova** 

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

*E mail: madina.mansurova@kaznu.kz, *aibolat.kulatay@gmail.com,
Zhaisanova.Dinara@kaznu.kz*

Abstract. This article presents a systematic review of methodological approaches in machine learning (ML), educational data mining (EDM), and adaptive gamification within digital learning environments. Based on a synthesis of 36 peer-reviewed studies published between 2020 and 2025, indexed in Scopus and Web of Science, this research identifies prevalent ML architectures, personalized instruction paradigms, and game mechanics that enhance student motivation. The literature search followed PRISMA guidelines across major academic databases, including IEEE Xplore, SpringerLink, MDPI, and ScienceDirect, applying rigorous inclusion criteria focused on the functional implementation of EdTech solutions. The analysis reveals a significant shift toward the integration of graph neural networks (GNNs), reinforcement learning (RL), and gradient boosting for behavioral modeling and real-time content adaptation. Findings indicate that adaptive gamification, when coupled with predictive learning analytics, substantially improves long-term student engagement compared to static models. Furthermore, this study formalizes a conceptual interaction framework between the learner, the gamified environment, and an RL-based personalization agent. The results provide a methodological foundation for developing scalable, intelligent tutoring systems capable of autonomous pedagogical decision-making.

Keywords: machine learning, educational data mining, learning analytics, adaptive gamification, personalized learning, reinforcement learning, graph neural networks.

Received 02.11.2025. Revised 03.03.2026. Accepted 06.04.2026. Available online 30.06.2026

* the corresponding author

Introduction

In recent years, digital education platforms have increasingly integrated Artificial Intelligence (AI) paradigms, including Machine Learning (ML), Educational Data Mining (EDM), and Learning Analytics (LA), to foster personalized learning environments. These technologies facilitate the dynamic adaptation of instructional content, pedagogical feedback, and task difficulty based on individual learner profiles and real-time behavioral patterns. A substantial body of research has demonstrated the efficacy of ML-based solutions in predicting academic performance and optimizing personalization through classification algorithms, neural networks, and Reinforcement Learning (RL) to generate individualized pathways. Furthermore, gamification has emerged as a critical motivational strategy, though empirical evidence suggests that static gamification often suffers from novelty wear-off. In contrast, adaptive gamification, which utilizes ML to personalize game elements, shows significant potential in sustaining long-term engagement. Advanced computational techniques, such as Graph Neural Networks (GNNs) and deep behavioral modeling, now enable the tracking of granular user data, including clickstream analysis and churn risk, to trigger predictive interventions.

Table 1. Synthesis of Influential Studies and Methodological Contributions

Article Focus	Authors	AI/ML Methods	Key Advantages	Methodological Gaps
Scalable Adaptation	Vassoyan et al. (2023)	GNN, Reinforcement Learning	High adaptability; robust to sparse datasets	Tested on simulated data; lacks real-world validation
Learning Analytics	Tretow-Fish et al. (2022)	Systematic Review Methodology	Identifies research gaps in adaptive systems	Limited empirical validation of AI-based methods
Higher Education	Merino-Campos (2025)	Analytical Review of AI	Maps AI roles in engagement and flexibility	Ethical, privacy, and scalability issues remain
Real-time Prediction	Lamb et al. (2022)	fNIRS + ML Classification	High precision in real-time hemodynamics	Requires complex hardware; limited reproducibility
Adaptive Gamification	Manoharan et al. (2024)	RL-based Recommendations	Individualized reward logic; improved motivation	Lack of detailed algorithmic specification
EDM Taxonomies	Zhang et al. (2024)	Taxonomies (ER, CD, KT, LA)	Structured overview of knowledge tracing	Primarily descriptive; lacks predictive modeling

The taxonomic classification of these educational environments is illustrated in Figure 1, which distinguishes three primary functional categories based on their pedagogical objectives. Structured learning platforms, such as MOOCs (e.g., Coursera, Khan Academy), focus on academic knowledge acquisition, while game-based learning and assessment tools (e.g., Kahoot, Duolingo)

prioritize interactivity and testing. Additionally, cognitive development systems (e.g., Lumosity, Elevate) are designed to enhance executive functions like memory and attention. This classification systematizes the diversity of current EdTech solutions, demonstrating that gamified environments serve as both supplementary aids and independent tools. However, the existing literature reveals a fragmented landscape regarding evaluation metrics and deployment scalability, as most implementations remain restricted to isolated pilot studies.

Literature Review

Following PRISMA guidelines, this study identifies key methodological contributions in the field. Table 1 synthesizes the most influential research, highlighting the shift toward autonomous, data-driven systems.

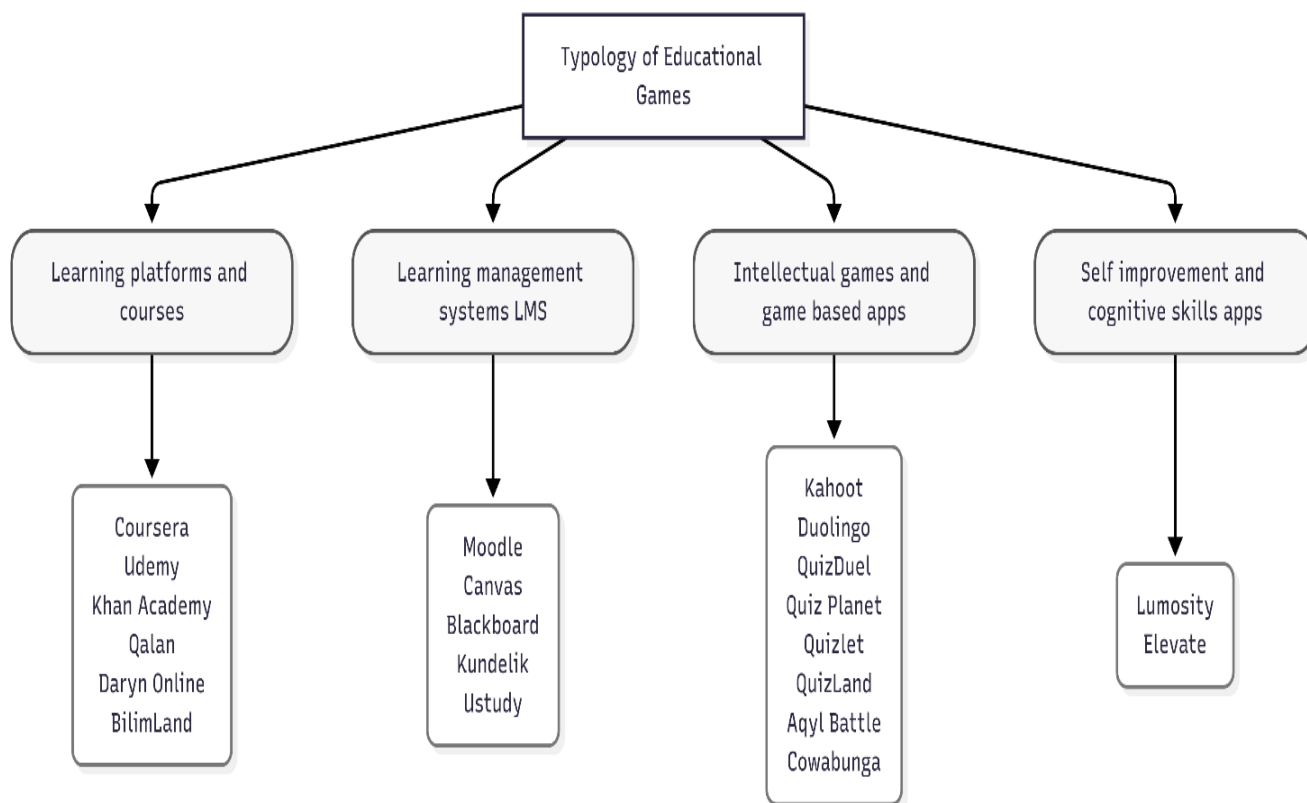


Figure 1. Typology of educational games and applications [authors' diagram]

The methodology

To ensure scientific rigor and transparency, this study was conducted in accordance with the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) guidelines. The primary objective was to gain a comprehensive understanding of AI-driven personalization by identifying current technologies, evaluating their effectiveness, and outlining implementation limitations.

Search Strategy and Data Selection

The literature search targeted peer-reviewed publications from the 2020–2025 period. To maintain high academic standards and address previous methodological inconsistencies, the

primary search was restricted to the Web of Science (WoS) and Scopus databases, supplemented by technical repositories including IEEE Xplore, SpringerLink, MDPI, and ScienceDirect. The search was executed in August 2024 using a Boolean query: («machine learning» OR «AI») AND («personalized learning» OR «adaptive learning») AND («gamification» OR «educational games»). Further specialized expressions were applied, such as TITLE-ABS-KEY («educational data mining» AND «gamification»), to ensure a comprehensive corpus.

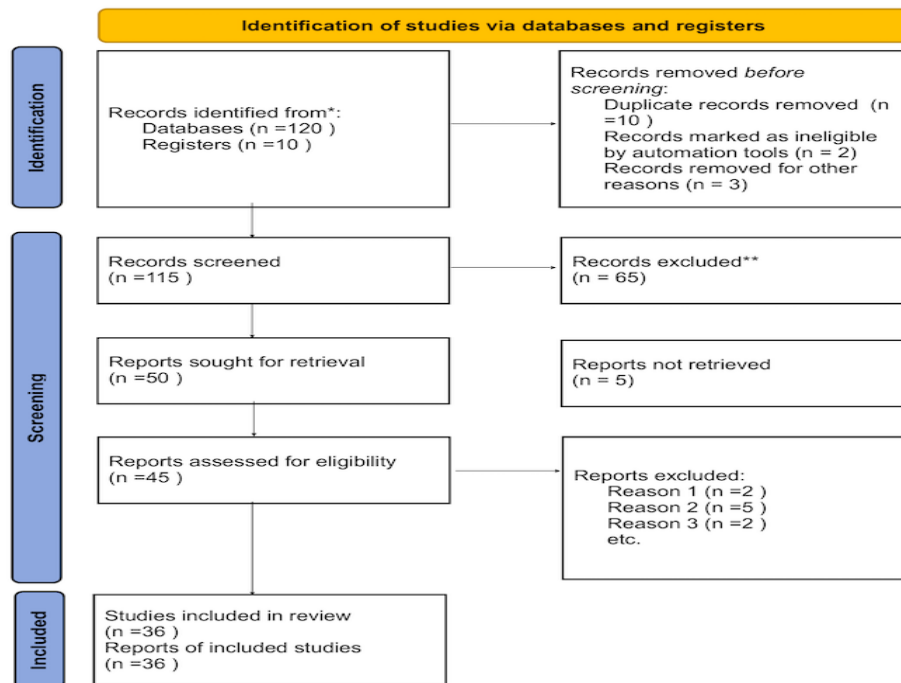


Figure 2. PRISMA flow diagram of the study identification and selection process

The identification and selection process is documented in the PRISMA flow diagram presented in Figure 2. From an initial pool of 450 records, duplicates were removed, leaving 280 items for title and abstract screening. Subsequently, 85 full-text articles were assessed against strict operational criteria. Inclusion required studies to be peer-reviewed journal articles or conference proceedings published in English, focusing on the functional implementation of AI/ML algorithms in education. Non-academic sources, preprints from non-indexed repositories, and studies unrelated to digital learning were excluded, resulting in a final selection of 36 high-quality studies.

Data Synthesis and Bibliometric Analysis

The selected studies were subjected to thematic synthesis and classified into categories: machine learning in EdTech (focusing on GNN, SVM, and Neural Networks), personalized learning systems, adaptive gamification, and educational data mining. A comparative analysis was performed for each category to identify methodological advantages and limitations. To illustrate broader research trends, a bibliometric visualization was conducted using the VOSviewer software package (version 1.6.20), as shown in Figure 3.

This visualization highlights the keyword co-occurrence network, where learning analytics emerges as the central hub linking various subfields. The analysis reveals distinct thematic

clusters: a red cluster focused on data-driven approaches and adaptive systems; a blue cluster encompassing advanced machine learning paradigms like self-supervised and federated learning; and a green cluster representing learner-centered AI applications and gamification. Additionally, purple and yellow clusters point to immersive technologies and predictive analytics. This structural mapping provides the necessary context for the interaction model proposed in the following sections, which bridges the gap between raw interaction data and adaptive pedagogical interventions.

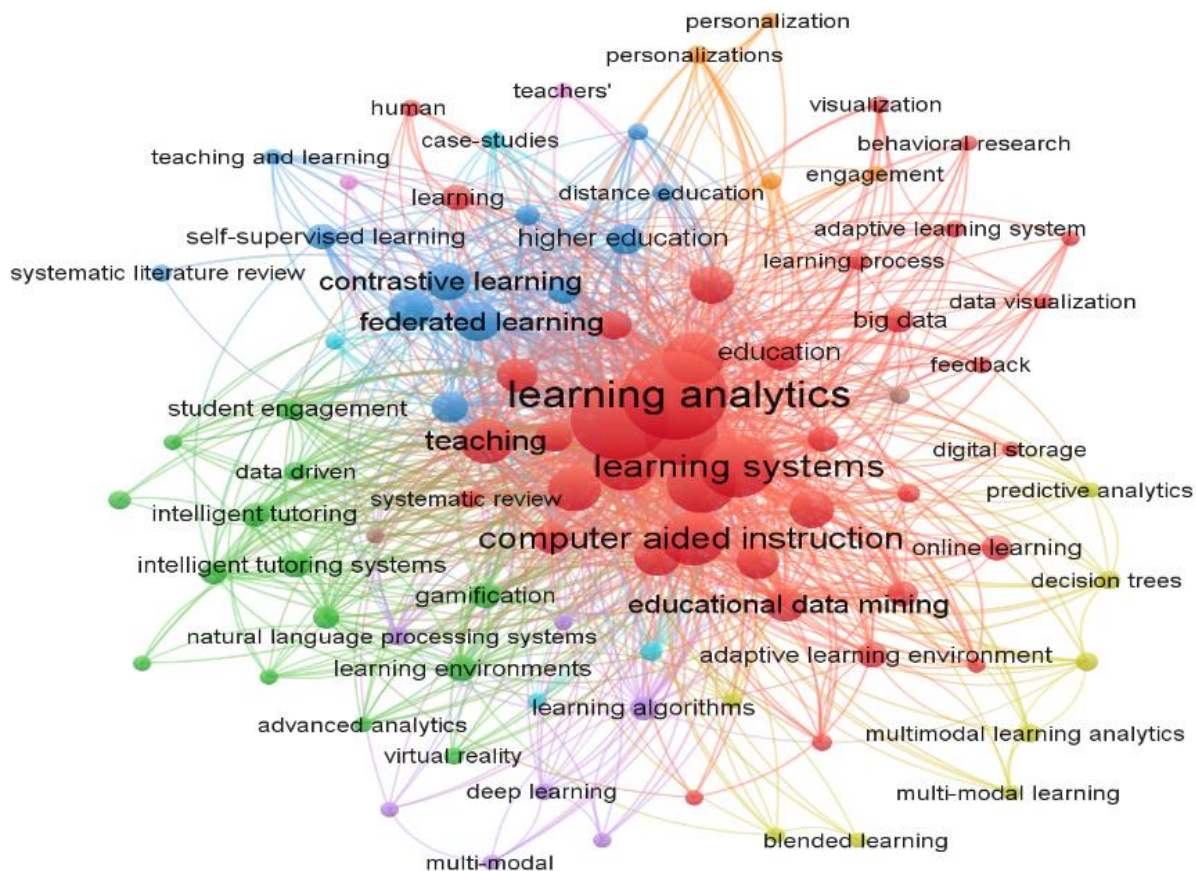


Figure 3. Visualization of scientific research in Educational Data Mining and gamification (VOSviewer)

Findings/Discussion

The comparative analysis of machine learning models identifies specific technical trade-offs critical for educational environments. Table 2 summarizes these architectures, highlighting their operational utility and inherent limitations.

The data presented in Table 2 suggests that hybrid approaches, particularly those combining Graph Neural Networks (GNN) and Reinforcement Learning (RL), are most effective for modeling complex learning paths. However, neuroanalytical techniques using fNIRS provide unparalleled precision in assessing cognitive load, though they demand significant hardware investment [29, 35]. While XGBoost is valued for its transparency in performance forecasting, deep learning

architectures like LSTM and Attention networks are essential for processing high-frequency interaction sequences, albeit at a higher computational cost [9, 36].

Table 2. Comparative analysis of computational models in EdTech

Model	Primary Application	Technical Advantages	Operational Constraints
GNN + RL	Knowledge trajectories and content adaptation	High scalability and architectural flexibility	Dependency on predefined graph structures
fNIRS + ML	Neuroanalytics and cognitive state monitoring	High biometric precision and real-time adaptation	Hardware complexity and equipment costs
XGBoost	Performance analysis and predictive modeling	Statistical reliability and high interpretability	Sensitivity to dataset imbalance
LSTM/CNN/Attention	Behavioral sequences and visual content analysis	Deep temporal analysis and interaction mapping	Resource-intensive; susceptibility to overfitting

Personalized Learning Systems and Adaptive Mechanics

Personalized Learning Systems (PLSs) have evolved into fundamental EdTech components by tailoring instruction to unique learner profiles. Contemporary platforms integrate recommender algorithms and dynamic content delivery to adjust the pace and structure of curricula. Gligorea et al. (2023) demonstrated that intelligent recommender systems utilizing behavioral data significantly enhance student motivation [8]. Further research by Zhang et al. (2023) in the context of MOOCs classifies these approaches into collaborative filtering and neural models, emphasizing that adaptation grounded in cognitive parameters is the most effective method for trajectory construction [18].

This dynamic adaptation ensures that the cognitive load remains aligned with the learner's Zone of Proximal Development (ZPD). As highlighted by Merino-Campos (2025), AI allows for the real-time restructuring of materials based on language, context, and prior preparedness [34]. Moreover, the use of GNNs enables the modeling of latent connections between topics, while adaptive dashboards allow both students and instructors to monitor progress indicators, fostering active participation in the learning process [16, 35].

Adaptive Gamification and Engagement Dynamics

Gamification has transitioned from static reward structures (points and badges) to adaptive

mechanics tailored to individual behavioral analytics. Strousopoulos and Troussas (2022) found that students in gamified environments demonstrate statistically significant improvements in satisfaction compared to traditional cohorts [27]. Modern algorithms now personalize game stimuli; for instance, less motivated users may receive immediate rewards for simple tasks, whereas advanced learners are challenged with complex missions and delayed gratification [5].

Table 3. Categorization of Research Directions by Technological Focus

№	Research Cluster Focus	GNN	ML	Gamification	Personalized Learning	Learning Analytics	AI/ Adaptive Learning
1	AI-Driven Personalization	-	[6, 33]	[33]	[11, 16, 25]	[16, 25, 33]	[6, 8, 10, 11, 20]
2	Learning Analytics & Success	-	[36]	[27]	[7, 17, 24, 27]	[7, 12, 17, 18, 19, 36]	[12, 18, 19, 23]
3	Gamification & Engagement	-	[4, 21]	[4, 5, 21]	[5, 21, 26, 32]	[4]	[5, 26, 32]
4	Machine Learning & Analytics	[35]	[1, 9, 22, 28]	-	[1, 9]	[22, 28]	[1, 9, 35]
5	Conceptual & Review Studies	-	[2, 30]	-	[2, 3, 13, 30]	[2]	[3, 13]
6	Advanced Computational Models	-	-	-	[34]	[14, 34]	[14, 15, 34]

The identification of distinct engagement styles - such as «achievement hunters», «explorers» and «social participants» - underscores the necessity of this personalization [14]. Meta-analytical data confirms that gamification is most effective when combined with real-time feedback, potentially increasing engagement by up to 30% for average-performing students [19].

Educational Data Mining and Behavioral Modeling

Educational Data Mining (EDM) serves as the analytical foundation for uncovering hidden patterns in student interaction. By analyzing LMS log files, query frequencies, and social activity, researchers can construct predictive models that forecast academic outcomes. Xu et al. (2023) identified «fatigue spots» and learner typologies (surface vs. strategic learners) using clustering techniques such as k-means and DBSCAN, alongside trajectory analysis via Markov chains [9].

These digital traces allow for the automatic segmentation of learners. Rashad Sayed et al. (2022) utilized community detection and frequency-based techniques (Apriori) to correlate study pace with assessment results, facilitating the generation of data-driven pedagogical hypotheses [28]. Furthermore, participation patterns in collaborative environments are analyzed through indicators of «active participation» such as response time and interaction frequency [31]. Typologies involving «enthusiast-explorers» or «passive participants» are often embedded into

adaptive platforms using fuzzy logic, allowing for the early detection of dropout risks or disorientation.

The categorization of the reviewed studies by technological focus (Table 3) indicates that the majority of current research is concentrated in AI-driven personalization and learning analytics.

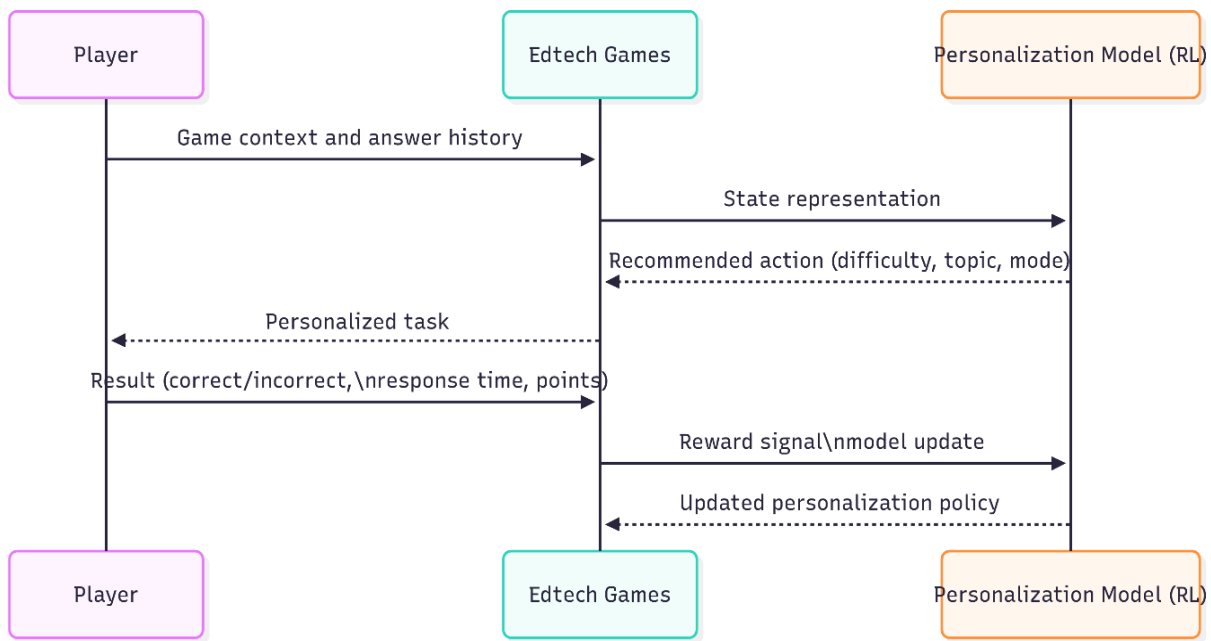


Figure 4. Interaction model of the player, EdTech game, and personalization model (RL)

Figure 4 illustrates an interactive reinforcement learning loop functioning as a dynamic, closed-loop feedback mechanism. In this model, the learning process is represented as a continuous exchange of data, where learner actions, current knowledge levels, and behavioral responses are analyzed by an intelligent personalization agent.

Based on this analysis, the algorithm automatically selects the most effective pedagogical intervention - such as adjusting difficulty levels or modifying game mechanics - which is then implemented within the educational game environment. As a result of this interaction, the system receives feedback in the form of user performance and engagement, allowing it to continuously refine the instructional strategy and create a self-optimizing learning path tailored to the individual's cognitive characteristics.

Conclusion

The findings of this systematic review confirm that the convergence of machine learning (ML), educational data mining (EDM), and adaptive gamification represents the most significant driver of innovation in modern digital education. By synthesizing data from 36 high-impact studies published between 2020 and 2025, this research establishes that AI-driven personalization not only improves academic performance but also fundamentally reshapes student engagement

through dynamic, real-time adaptation.

However, the transition from theoretical models to large-scale implementation is currently hindered by several critical barriers. High technological costs associated with biometric hardware, such as fNIRS, and the substantial computational resources required for deep learning architectures create economic obstacles for widespread adoption in public educational sectors. Furthermore, a persistent methodological gap exists: despite promising pilot results, there remains a significant lack of long-term empirical evidence regarding the cross-cultural efficacy of adaptive gamification. This is compounded by the «black-box» nature of complex neural networks, which raises substantial ethical concerns regarding algorithmic transparency, bias, and the protection of student privacy.

Looking ahead, the evolution of EdTech is clearly moving toward the integration of Explainable AI (XAI), which seeks to make personalization logic transparent and accountable to both educators and learners.

Moreover, the emergence of Large Language Models (LLMs) offers a transformative path for developing more nuanced, conversational adaptive interfaces that bridge the gap between human intuition and machine efficiency. Ultimately, the shift from descriptive learning analytics to prescriptive, agent-based models - grounded in the RL framework proposed in this study- will define the strategic trajectory of intelligent tutoring systems in the coming decade.

Acknowledgment

The article is published within the framework of the grant funding project of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, № AP19679514 «Study of the conceptual apparatus of the «Blockchain» domain using text mining and analysis of formal concepts: focus on teaching methodology».

The contribution of the authors

D. Zhaisanova and M. Mansurova - conceptualization, supervision

A. Kulatay; investigation, resources, writing - original draft preparation,

References

1. Nurhasanah F., Nugraheni A.S.C., Kusharjanta B., Ardiansyah R., Widono S., Saddhono K. A Design of Virtual Classrooms Through AI, ML and DL to Improve the Level of Learning. Proceedings of the 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE), 2024, pp. 940–945.
2. Xiong Z., Li H., Liu Z., Chen Z., Zhou H., Rong W., Ouyang Y. A Review of Data Mining in Personalized Education: Current Trends and Future Prospects. Frontiers of Digital Education, 2024, Vol. 1, pp. 26–50. DOI: 10.1007/s44366-024-0019-6.
3. Shemshack A., Spector J.M. A systematic literature review of personalized learning terms. Smart Learning Environments, 2020, Vol. 7, Art. 33. DOI: 10.1186/s40561-020-00140-9.
4. Daghestani L.F., Ibrahim L.F., AlTowirgi R.S., Salman H.A. Adapting gamified learning systems using educational data mining techniques. Computer Applications in Engineering Education, 2020, Vol. 28, No. 3, pp. 568–589. DOI: 10.1002/cae.22227.
5. Manoharan A., Nagulapally S. Adaptive Gamification Algorithms for Personalized Learning Experiences in Educational Platforms. International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science, 2024, Vol. 6, No. 3.
6. Rincón-Flores E.G., Mena J., López-Camacho E., Olmos O. Adaptive learning based on AI with

- predictive algorithms. Proceedings of TEEM'19: 7th International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality, 2019, pp. 607–612. DOI: 10.1145/3362789.3362869.
7. Fernández-Morante C., Cebreiro-López B., Rodríguez-Malmierca M.J., Casal-Otero L. Adaptive learning supported by learning analytics for student teachers' personalized training during in-school practices. Sustainability, 2022, Vol. 14, No. 1, Art. 124. DOI: 10.3390/su14010124.
 8. Gligorea I., Cioca M., Oancea R., Gorski A.T., Gorski H., Tudorache P. Adaptive learning using artificial intelligence in e-learning: A literature review. Education Sciences, 2023, Vol. 13, No. 12, Art. 1216. DOI: 10.3390/educsci13121216.
 9. Xu X. AI optimization algorithms enhance higher education management and personalized teaching through empirical analysis. Scientific Reports, 2025, Vol. 15, Art. 10157. DOI: 10.1038/s41598-025-94481-5.
 10. Šumak B., López-De-Ipiña D., Dziabenko O., Correia S.D., De Carvalho L.M.S., Lopes S., Şimşek I., Can T., Kline D.I., Pušnik M. AI-Based Education Tools for Enabling Inclusive Education: Challenges and Benefits. Proceedings of MIPRO 2024: 47th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology, 2024, pp. 472–477. DOI: 10.1109/MIPRO60963.2024.10569714.
 11. Gokhe S., Ulhe P., Bhasme M. AI-Powered Personalized Learning for Advancing Educational Equity. Proceedings of the 2024 2nd DMIHER Int. Conf. on Artificial Intelligence and Embedded Interfaces (IDICAIEI), 2024. DOI: 10.1109/IDICAIEI61867.2024.10842826.
 12. Raj N.S., Renumol V.G. An improved adaptive learning path recommendation model driven by real-time learning analytics. Journal of Computers in Education, 2024, Vol. 11, pp. 121–148. DOI: 10.1007/s40692-022-00250-y.
 13. Abnoulgid F., Aouhassi S., Mansouri K., Akef F. An Overview of Approaches and Typologies of Personalized Learning. Advances in Intelligent Systems and Digital Applications (Proc. of ISDA 2025), Lecture Notes in Networks and Systems, Springer: Cham, 2025, pp. 92–103. DOI: 10.1007/978-3-031-95330-9_10.
 14. Manz J., Abke J., Hagel G. Automated Tracking of User Interactions in Web-Based Adaptive Learning for Software Engineering. Proceedings of the 2025 European Conference on Software Engineering Education (ECSEE '25), ACM: New York, USA, 2025, pp. 180–184. DOI: 10.1145/3723010.3723020.
 15. Shankar S.K., Pothancheri G., Sasi D., Mishra S. Bringing Teachers in the Loop: Exploring Perspectives on Integrating Generative AI in Technology-Enhanced Learning. International Journal of Artificial Intelligence in Education, 2025, Vol. 35, pp. 155–180. DOI: 10.1007/s40593-024-00428-8.
 16. Seidel N., Meyer V., Radović S. Co-Design of an Adaptive Personalized Learner Dashboard. Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), 2024, pp. 26–28. DOI: 10.1109/ICALT61570.2024.00014.
 17. Velmurugan P.R., Swadhi R., Varshney K.R. Creating Engaging and Personalized Learning Experiences in Distance Education: AI and Learning Analytics. AI and Learning Analytics in Distance Learning, IGI Global, 2025, pp. 103–126. DOI: 10.4018/979-8-3693-7195-4.ch005.
 18. Zhang Y. Developing an Adaptive Learning Recommendation Algorithm and System for MOOCs. Journal of Machine and Computing, 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 962–970. DOI: 10.53759/7669/jmc202404089.

19. Tretow-Fish T.A.B., Khalid M.S. Evaluating Learning Analytics of Adaptive Learning Systems: A Work in Progress Systematic Review. Design, Learning, and Innovation (LNICST, Vol. 435), Springer: Cham, 2022, pp. 37–52. DOI: 10.1007/978-3-031-06675-7_3.
20. Kyambade M., Namatovu A., Male Ssentumbwe A. Exploring the evolution of artificial intelligence in education: From AI-guided learning to learner-personalized paradigms. Cogent Education, 2025, Vol. 12, No. 1. DOI: 10.1080/2331186X.2025.2505297.
21. Saranya K., Sankaradass V. Hyperpersonalization of Educational Content Through Multimodal Deep Learning and Gamification. Proceedings of the 2023 International Conference on Data Science, Agents & Artificial Intelligence (ICDSAAI), 2023, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICDSAAI59313.2023.10452428.
22. Patil S., Patwal P.S., Wadane V.S. Machine Learning Approach for Educational Data Mining on Real Life Applications. IET Conference Proceedings, 2025. (accessed on 11 August 2025). DOI: 10.1049/icp.2025.0892.
23. Bhatt V., Gupta D.B., Chandra G. Optimizing Classroom Teaching with AI-Based Adaptive Learning Tools. 2024 Int. Conf. on Advances in Computing Research on Science Engineering and Technology (ACROSET), 2024. (accessed on 11 August 2025). DOI: 10.1109/ACROSET62108.2024.10743688.
24. Li K.C., Wong B.T. Personalising Learning with Learning Analytics: A Review of the Literature. (accessed on 11 August 2025).
25. Ning J., Wang Q. Personalized Learning Supported by Learning Analytics: A Systematic Review of Functions, Pathways, and Educational Outcomes. National Institute of Education Repository, 2025. (accessed on 11 August 2025).
26. Dumbuya E. Personalized Learning through Artificial Intelligence: Revolutionizing Education. SSRN, 2023. (accessed on 11 August 2025).
27. Strousopoulos P., Troussas C. Personalized Learning via Gamified Virtual Environments: Exploring Insights and Impact. 2024 19th Int. Workshop on Semantic and Social Media Adaptation & Personalization (SMAP), 2024. DOI: 10.1109/SMAP63474.2024.00029.
28. Sayed A.R., Khafagy M.H., Ali M., Mohamed M.H. Predict Student Learning Styles and Suitable Assessment Methods Using Click Stream. Egyptian Informatics Journal, 2024, Art. 100469. DOI: 10.1016/j.eij.2024.100469.
29. Lamb R.L., Neumann K., Linder K.A. Real-time Prediction of Science Student Learning Outcomes Using Machine Learning Classification of Hemodynamics During Virtual Reality and Online Learning Sessions. Discover Education, 2022. (accessed on 11 August 2025).
30. Hasan I., All Ahhad A. Revolutionizing Education with Machine Learning: Personalized Learning, Tutoring Systems, and Analytics Unveiled. 2025 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), 2025. DOI: 10.1109/ECCE64574.2025.11013048.
31. Sharma K., Nguyen A., Hong Y. Self-regulation and Shared Regulation in Collaborative Learning in Adaptive Digital Learning Environments: A Systematic Review of Empirical Studies. British Journal of Educational Technology, 2024. DOI: 10.1111/bjet.13459.
32. Gharahighehi A., Van Schoors R., Topali P., Ooge J. Supporting Personalized Lifelong Learning with Human-Centered Artificial Intelligence Systems. CEUR Workshop Proceedings, 2024, Vol. 3836, pp. 1–14. Available online: <https://research-portal.uu.nl/en/publications/supporting-personalized-lifelong-learning-with-human-centered-art> (accessed on 11 August 2025).
33. Bošnjaković N., Đurđević-Babić I. Systematic Review on Educational Data Mining in

- Educational Gamification. Technology, Knowledge and Learning, 2025, Vol. 30, pp. 29–46. DOI: 10.1007/s10758-023-09686-2.
34. Merino-Campos J. The Impact of Artificial Intelligence on Personalized Learning in Higher Education: A Systematic Review. Lecture Notes in Computer Science (ICL 2024), Springer: Cham, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-85649-5_30.
35. Vassoyan J., Vie J.J., Lemberger P. Towards Scalable Adaptive Learning with Graph Neural Networks and Reinforcement Learning. arXiv:2305.06398 [cs.LG], 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.06398.
36. Cosar M. Utilizing the eXtreme Gradient Boosting Algorithm for Artificial Intelligence-supported Learning Analytics Application. Eurasia Proceedings of Educational & Social Sciences (EPSTEM), 2025. Available online: <http://www.epstem.net/en/pub/issue/86246/1521844> (accessed on 11 August 2025).
37. van Eck N.J., Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, 2010, Vol. 84, No. 2, pp. 523–538. DOI: 10.1007/s11192-009-0146-3.

Information about the authors:

Mansurova M. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi ave., 050040, Almaty, Kazakhstan; e-mail: madina.mansurova@kaznu.kz

Kulatay A. – corresponding author, PhD student, Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi ave., 050040, Almaty, Kazakhstan

Zhaisanova D. – PhD, Associate Professor, Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi ave., 050040, Almaty, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-330-342>

Разработка платформы киберполигона для начинающих специалистов по кибербезопасности

Т. Толеутай^{1*} , А. Ахметов² , А. Жетписбаева¹ , А. Куттыбек¹ ,
А. Садвакасова¹ 

¹ *Astana IT University, Астана, Казахстан*

² *Satbayev University, Алматы, Казахстан*

*E mail: a.s.abdiraman@gmail.com, assemgul.sadvakasova@astanait.edu.kz,
azhar.kuttybek@astanait.edu.kz, Aliya.Zhetpisbayeva@astanait.edu.kz,
A.Zhenisbekkyzy@astanait.edu.kz*

Аннотация. Стремительный рост киберпреступности, глобальный ущерб от которой к концу 2024 года достиг 9,5 трлн долларов США, а также активное использование злоумышленниками технологий искусственного интеллекта для кибершпионажа и проведения сложнообнаруживаемых атак обуславливают необходимость совершенствования подготовки специалистов по кибербезопасности. Несмотря на увеличение среднего значения глобального индекса кибербезопасности до 65,7 балла, уровень и сложность угроз продолжают расти, что требует внедрения практико-ориентированных и технологически гибких образовательных решений. В статье представлен систематический анализ существующих киберплатформ и выявлены их ключевые ограничения, включая отсутствие встроенных инструментов мониторинга, аналитики и персонализированной оценки прогресса обучающихся. В качестве решения разработана и реализована платформа киберполигона HackerPlace на базе Python Django, React.js, REST API и SQLite. Архитектура платформы построена по модульному принципу и включает клиентскую, серверную и аутентификационную подсистемы. Платформа поддерживает задания по веб-безопасности, OSINT, стеганографии, криптографии и реверс-инженерии, а также оснащена механизмами отслеживания времени и успешности выполнения задач. Апробация среди двух групп студентов показала повышение скорости решения задач на 32–58% и значительный рост общей результативности обучения.

Ключевые слова: Кибербезопасность, угрозы, платформа, киберполигон, CTF, Python, обучение на основе симуляции

Received 19.05.2025. Revised 20.05.2023. Accepted 24.11.2025. Available online 30.06.2026.

* the correspondence author

Введение

Сегодняшние реалии показывают, что ущерб от киберпреступности к концу 2024 года по всему миру составил 9,5 триллион долларов США. Масштабы атак увеличиваются с каждым годом, а хакеры все виртуознее используют инструменты по обходу системы защиты инфраструктуры и файрволов. С развитием искусственного интеллекта злоумышленники начали использовать данный инструмент для проведения кибершпионажа и создания более сложных в обнаружении атак [1]. Согласно результатам проведенной статистики глобального индекса кибербезопасности в 2024 году средний показатель по всему миру составляет 65,7 балла, что на 27 процентов больше по сравнению с 2023 годом. Следовательно, возрастание киберугроз требует комплексного подхода при подготовке специалистов по защите и борьбе с киберпреступностью. Стоит отметить, что в данной области исследования набирают обороты и статистика с международной базы научных исследований Scopus показывает экспоненциальный рост исследований за последние пять лет. Результаты систематического литературного исследования представлены на рисунке 1.

В ходе исследования выявлен ряд платформ, которые предоставляют симуляционную среду в целях повышения квалификации специалистов по кибербезопасности. В работе [1] описываются основные ключевые моменты по платформе Cyberpolygon Site, который предназначен для подготовки специалистов по кибербезопасности. Аналогичные исследования проводились в работе [2], где также подготовлены задачи по симуляционным полигонам для защиты корпоративной сети. В работе [3] подробно описываются процесс разработки веб-приложения, который сочетает в себе как теорию, так и практические задания. Данного рода платформа помогает получить вводные теоретические знания в той или иной области симуляции атак.

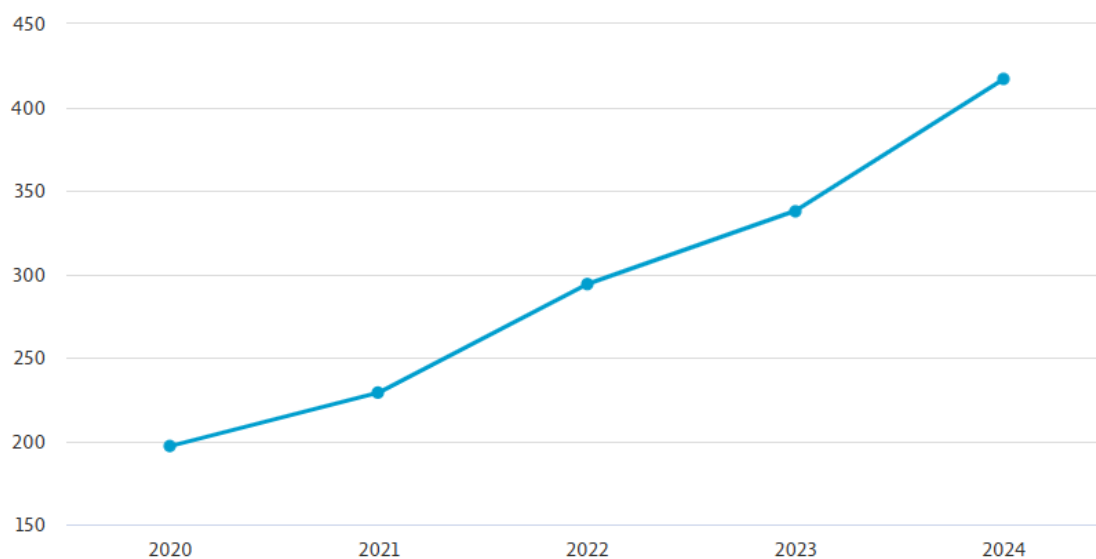


Рисунок 1. Статистика исследования в области разработки киберполигонов за последние пять лет

Согласно исследованию в работе [4] рекомендуется применять метод геймификации в киберполигонах для образовательных учреждений. Статистика показала, что геймифицированные платформы значительно повышают вовлеченность и результатив-

ность студентов бакалавриата в области кибербезопасности.

Немаловажным аспектом является применение машинного обучения при автоматизации процессов в ходе защиты сложной инфраструктуры компании/предприятия. Следовательно, в работе [5] авторы подчеркивают, что машинное обучение является необходимым для подготовки кадров в части защиты от киберугроз. В работе [6] авторы проводят расширенный анализ первопроходцев по киберстартапам, что обуславливается положительными результатами с использованием инноваций в области кибербезопасности. Также исследования в [7-8] показали, что кибербезопасность также охватывает биологические системы защиты и технологию цифровых двойников по защите утечек данных и персональных данных пользователей. Кроме того, современные киберполигоны должны симулировать реальные угрозы на различные информационные системы. Более того, применение киберполигона с интеграцией геймификации подтверждает увлеченность обучающихся, о чем говорят результаты статистических анализов, отраженные в работе [9-11].

Однако в ходе проведения литературного обзора выявлено, что все киберполигоны не предусматривают панель управления результатами обучающихся.

Методология

В процессе исследования применялись методы системного анализа, сравнительного анализа существующих платформ киберполигона, а также практической реализации и тестирования прототипа. На первом этапе проведён анализ зарубежных и отечественных решений, предназначенных для обучения специалистов по кибербезопасности (TryHackMe, RootMe, CyberPolygon и др.). На втором этапе осуществлёны дизайн и разработка платформы HackerPlace с использованием фреймворков Python Django и React.js, а также базы данных SQLite. На третьем этапе проведена апробация платформы среди студентов образовательной программы «Кибербезопасность» Astana IT University. Для оценки эффективности применялись методы экспериментального сравнения двух фокус-групп (А и В) с разным уровнем предварительной подготовки.

Полученные данные анализировались с использованием количественных показателей — среднего времени выполнения заданий, доли успешных решений, а также статистического сравнения результатов.

Выбор языка программирования для разработки платформы киберполигона. В ходе выбора языка программирования для разработки платформы киберполигона основное значение уделялось внятной интерфейсной части. Более того, серверная часть архитектуры киберполигона должна отражать логику системы.

Выбранные инструменты для разработки представлены в Таблице 1. В целях реализации авторизации обучающихся в систему киберполигона был применен фреймворк Django REST. То есть при авторизации веб-сайт отправляет запрос API для токенов в бэкенд. В свою очередь, бэкенд отправляет запрос в REST через просмотр. Сам токен генерируется в фреймворке REST. Данные пользователей собраны в базе данных через выделенные токены. Архитектура разработанной системы построена по модульному принципу и включает три основные подсистемы: клиентский интерфейс (Frontend), серверную часть (Backend) и компонент аутентификации, реализованные на основе REST-фреймворка. Взаимодействие между компонентами осуществляется посредством стандартизированных API-запросов [13]. Пользователь инициирует процессы регистрации или авторизации через клиентский интерфейс, который отправляет соответствующие запросы на Backend.

Серверная часть обрабатывает полученные данные, взаимодействует с хранилищем для сохранения или проверки учётной информации и далее направляет запрос к REST-фреймворку для генерации токена доступа. Сформированный токен передаётся обратно на клиентскую сторону, обеспечивая доступ к защищённым ресурсам. Система поддерживает механизм обновления токена: при его истечении Frontend инициирует запрос на продление, который проходит через Backend и обрабатывается соответствующим компонентом API. Такая схема позволяет обеспечить защищённое управление сессиями и контроль доступа к серверным ресурсам. Для наглядного представления взаимодействия компонентов в статью включена блок-схема общей архитектуры, иллюстрирующая полный цикл обработки запросов: от действий пользователя на клиентской стороне до генерации и обновления токена серверными подсистемами. На рисунке 2 представлена схема прохождения потока данных на платформе киберполигоне при регистрации пользователя.

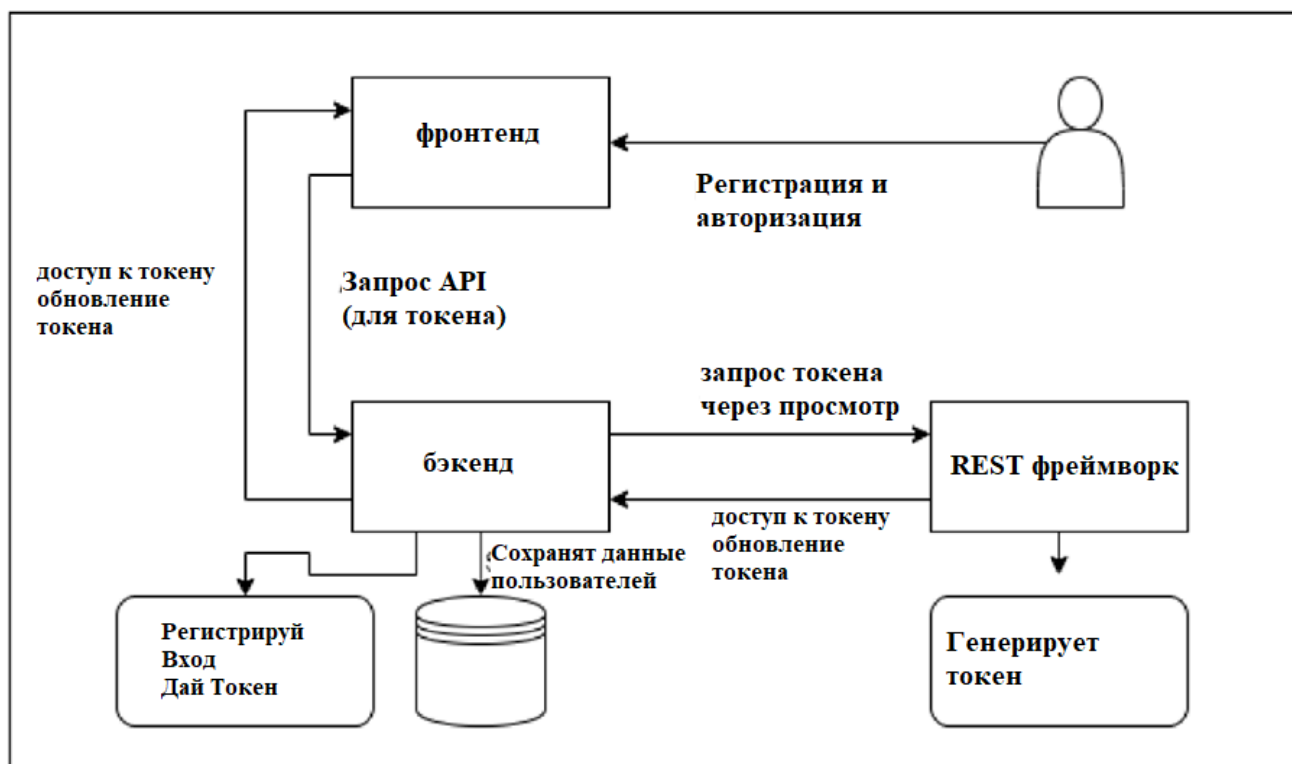


Рисунок 2. Схема регистрации и авторизации пользователя

Таймер расчета времени, потраченного на выполнение задания, в киберполигоне начинается, когда пользователь нажимает кнопку старта задания и кнопку стопа, когда завершает выполнение задания. На рисунке 3 представлена схема передачи данных внутри платформы. При разработке платформы HackerPlace были загружены различные сценарии задач, целью которых было получение опыта посредством тренировки в данной платформе. Данные задачи предусматривают получение практических навыков по темам: веб-безопасность, стеганография, OSINT, криптография, реверс-инженерия, SQL-инъекция. Каждая из данных тем разработана таким образом, чтобы предоставлять

сбалансированные теоретические и практические знания начинающим специалистам и выпускникам в области кибербезопасности [14].

Таблица 1. Выбранные инструменты для разработки платформы

Инструмент	Применение	Обоснование
Python	Бэкэнд	Простой и надёжный, с обширной библиотекой фреймворков для веб-разработки.
Django	Бэкэнд	Применяется данный фреймворк для веб-разработки на Python. Используется для управления результатами студентов.
React.js	Фронтэнд	Это библиотека в джаваскрипт для построения интерфейса пользователей.
REST	Веб API	Good for serialization and connecting backend with frontend
SQLite	База данных	Lightweight, serverless and embedded SQL database engine. In combination with django gives high performance quality

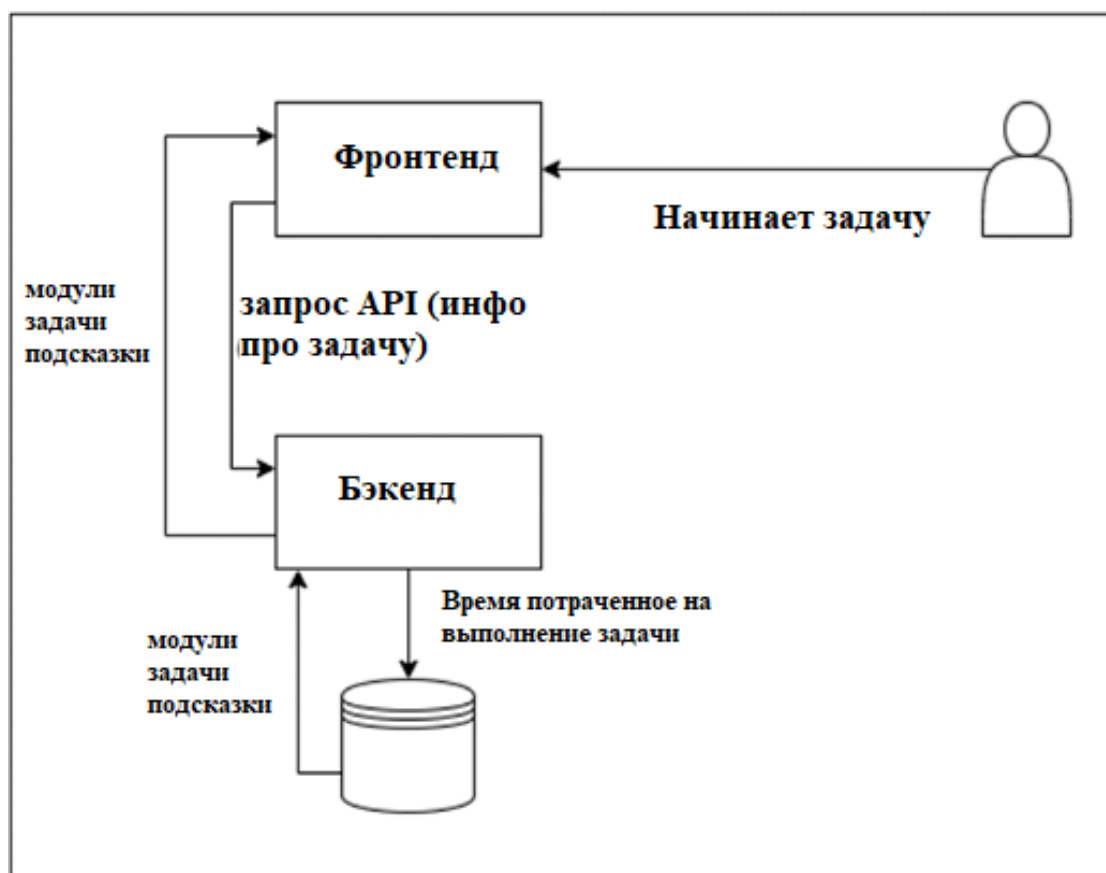


Рисунок 3. Схема выполнения задач

Админ-панель платформы HackerPlace

В данной секции статьи мы раскроем основные особенности и функционал кастомного решения по киберполигону отечественной разработки, который предназначен для улучшения контента при обучении специалистов кибербезопасности.

Данная платформа имеет интерактивный админ-панель, как представлено на рисунке 4.

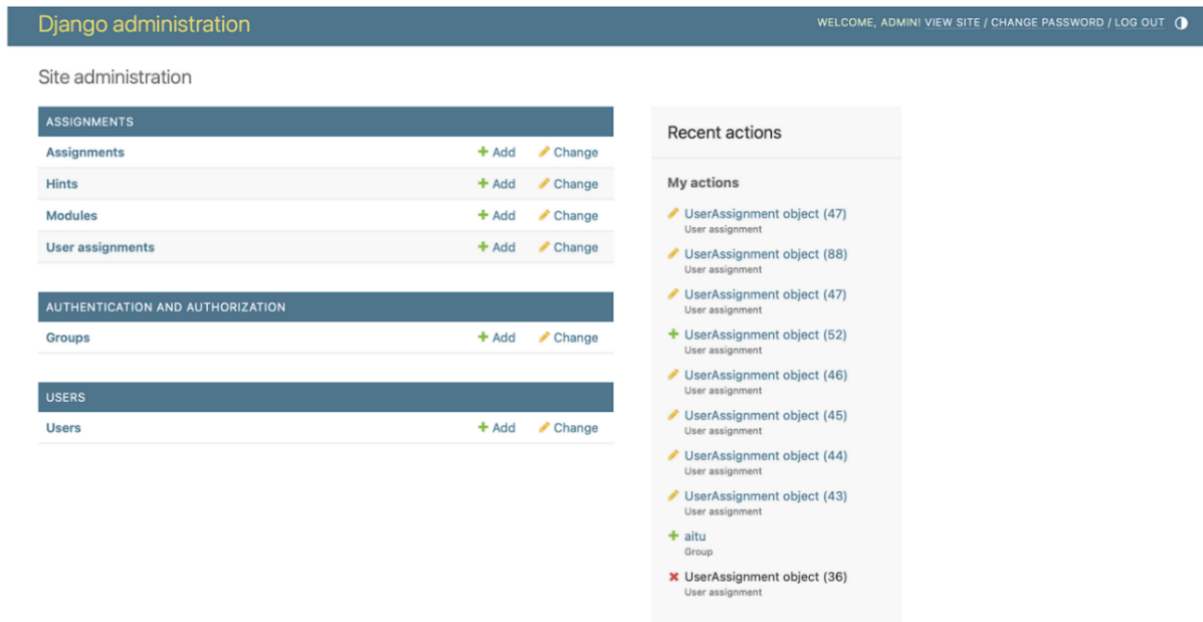


Рисунок 4. Админ-панель в Django

В части управления заданиями инструкторы могут создавать, редактировать, обновлять, добавлять дополнительные подсказки или же удалять устаревшие задачи. Также инструкторы могут добавлять теоретическое описание к заданиям и определять уровень сложности задания, как представлено на рисунке 5.

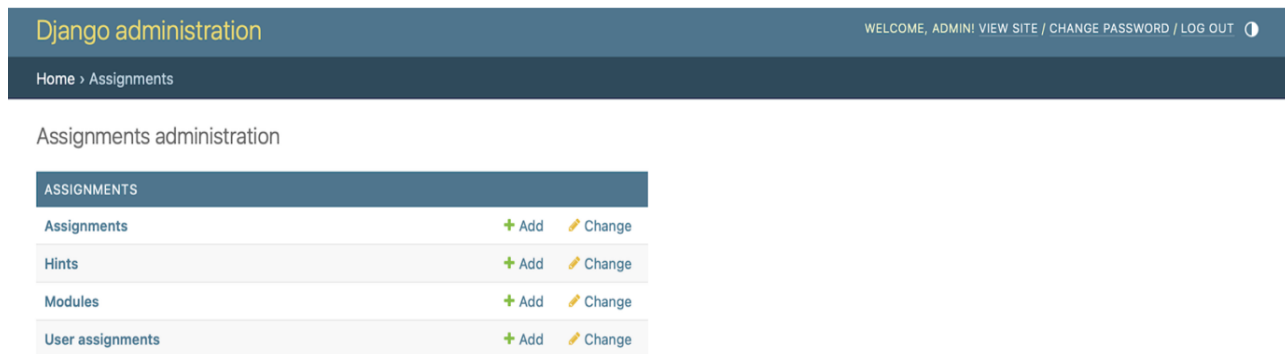


Рисунок 5. Панель управления задачами для обучающихся

На рисунке 6 представлен список задач, уже подготовленный для студентов, который включает в себя описание, подсказки и заголовки.

Стоит отметить, что пользователи с привилегиями администратора могут вносить изменения либо дополнять платформу, что очень удобно. В свою очередь, панель для обучающихся представлена на рисунке 7 и имеет очень удобный понятный интерфейс. Здесь по уровням можно увидеть различные модули, а под ними спрятаны задания и

подсказки по модулю.

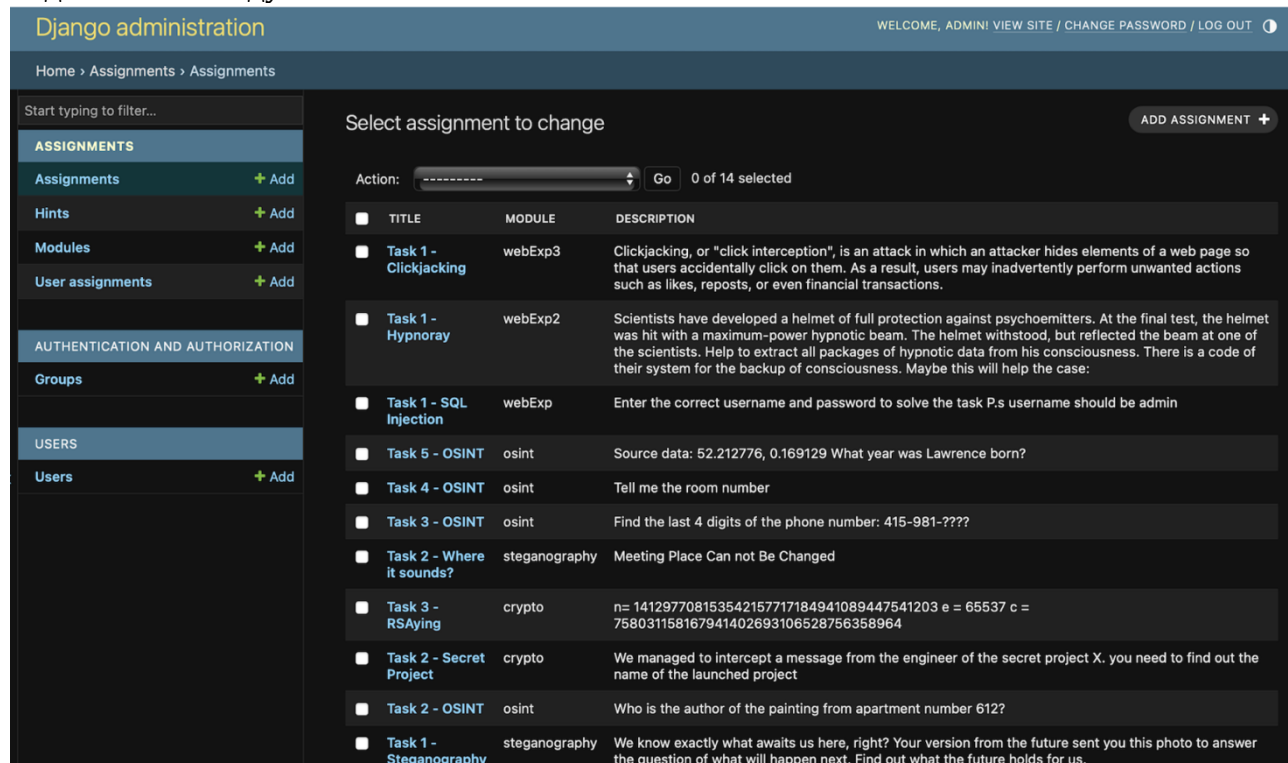


Рисунок 6 . Панель управления задачами

После нажатия на кнопку «старт» начинается отсчет времени по выполнению задания по выбранному направлению.

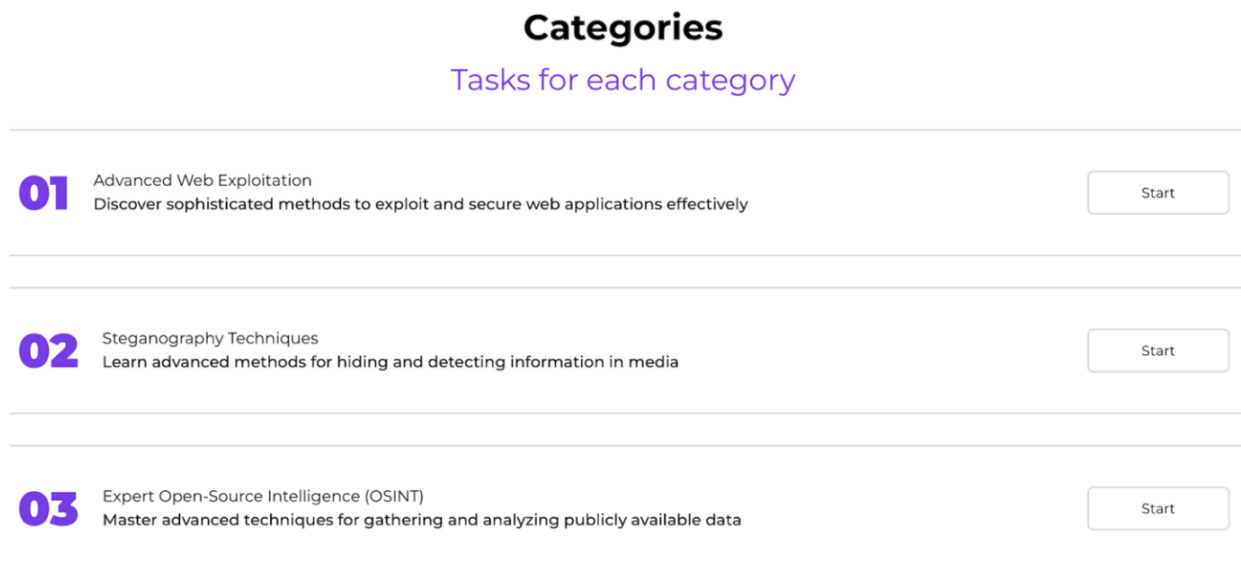


Рисунок 7. Категории заданий

На рисунке 8 представлен пример задания по категории OSINT. По данному направлению здесь загружено 5 задач, отсортированных по уровню сложности, есть окно добавления

ОТВЕТА.

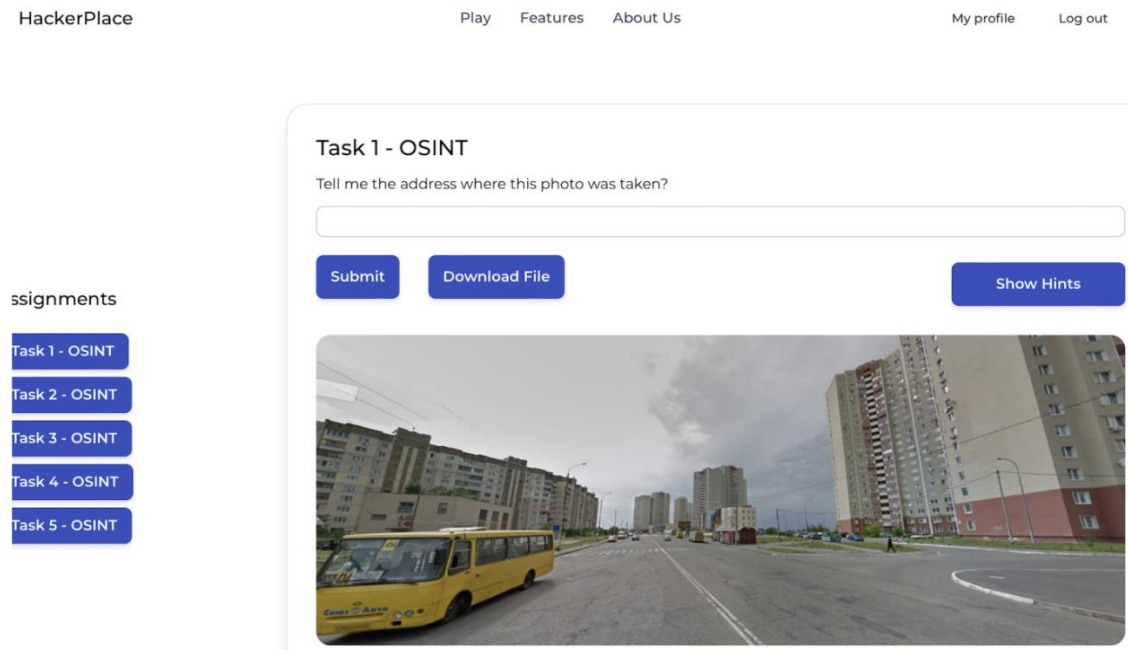


Рисунок 8. Страница задач OSINT

Также на данной платформе предусмотрена страница профиля пользователя, как и во многих платформах: TryHackMe, HackTheBox, RootMe.

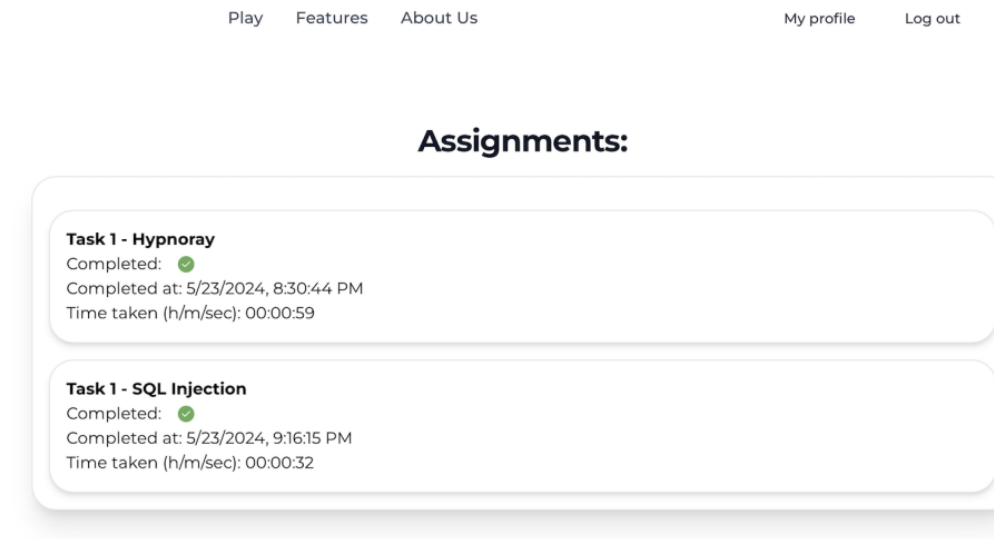


Рисунок 9. Механизм отслеживания времени выполнения заданий пользователями

На данной странице пользователь может видеть свой прогресс и выполненные задания. При правильном выполнении задания загорается зеленый цвет, что обозначает успешное прохождение задачи. Данная особенность позволяет оценивать успех и затруднения обучающего и фокусироваться на слабых сторонах [15]. На Рисунке 9 представлено время выполнения задания и сколько времени занимает в среднем это у пользователей платформы. Стоит отметить, что данная функциональная особенность платформы была

добавлена для проведения верификации посредством сравнения результатов студентов из университета А и университета В.

Апробация платформы

Киберполигон Hacker Place был разработан и протестирован между двумя группами студентов для оценки эффективности использования такого подхода при обучении/повышении квалификации специалистов в области кибербезопасности. Студенты группы А регулярно использовали в обучении онлайн-платформы TryHackMe, RootMe, студенты группы В не использовали. Двум группам были даны задачи из данной платформы. В ходе исследования выявлено, что студенты группы А быстро решали задачи, нежели студенты группы В. В таблице 2 представлены результаты исследования.

Таблица 2. Среднее время выполнения задач по категориям

Категория задания	Группа А (минуты)	Группа В (минуты)	Различие в процентах
Веб-безопасность	7.51	18.02	Группа А на 58.33% быстрее, чем группа В
Стеганография	17.12	35.24	Группа А на 51.41% быстрее, чем группа В
OSINT	10.46	15.56	Группа А на 32.79% быстрее, чем группа В
Криптография	37.9	91.31	Группа А на 58.49% быстрее, чем группа В
Реверс-инженерия	41.03	64.78	Группа А на 36.65% быстрее, чем группа В

В таблице 3 представлены результаты участников по выполненным заданиям в разрезе по модулям киберполигона. Всего задач было 20, группа А успешно завершила 15 задач из 20 быстрее, чем группа В. Количество участников в обеих группах одинаковое.

Таблица 3. Рейтинг выполнения задач

Фокус-группа	Успешно выполненные задания	Общее количество участников	Рейтинг успешности в процентах
Группа А	15	20	75%
Группа В	5	20	25%

Следовательно, рейтинг успеха внутри группы А в три раза выше, чем в группе В. Данные результаты показывают эффективность применения киберполигонов в обучении и повышении квалификации.

Заключение

В данной статье был проведен анализ мировой практики в области обучения по кибербезопасности и борьбе с киберпреступностью. Актуальность создания такой платформы обосновывается растущим интересом к данной области. Различие разработанной нами платформы подчеркнуто ее гибкостью в части дополнения контентом. Также проведена апробация данной платформы посредством применения в

обучении в двух различных фокус- группах. В ходе апробации платформы в тестировании приняли участие 42 пользователя, включающие студентов направления «Кибербезопасность», а также начинающих специалистов, заинтересованных в практическом освоении методов этичного взлома. В рамках пилотного запуска было выполнено более 310 практических заданий, распределённых по четырём основным категориям: веб-безопасность, OSINT, стеганография и криптография. Среднее время выполнения задач и процент успешных попыток позволили провести сравнительный анализ подготовленности различных групп участников. Кроме того, по итогам тестирования был собран массив качественных отзывов. Более 78% пользователей отметили удобство интерфейса и интуитивную навигацию платформы, а 83% подтвердили, что выполнение практических упражнений помогло лучше понять принципы эксплуатации уязвимостей. Также пользователи предложили расширить каталог заданий и добавить дополнительные уровни сложности. Сводный анализ отзывов показал высокий уровень удовлетворённости и подтверждение практической ценности платформы на ранних этапах обучения в области кибербезопасности.

В заключение следует отметить, что разработанная платформа киберполигона представляет собой эффективный и научно обоснованный инструмент для подготовки начинающих специалистов по кибербезопасности. Её ключевая новизна заключается во внедрении адаптивного механизма оценки сложности задач и встроенной системы мониторинга прогресса обучающихся, что отсутствует в большинстве существующих решений. Предложенный подход обеспечивает объективную и воспроизводимую оценку компетенций, а архитектура платформы позволяет масштабировать систему за счёт расширения сценариев атак, подключения новых обучающих модулей и интеграции с образовательными и корпоративными тренинговыми средами. Полученные результаты апробации подтверждают практическую значимость платформы и её потенциал для дальнейших исследований в области симуляционного обучения и подготовки кадров по кибербезопасности.

Вклад авторов

Толкын Толеутай, Алибек Ахметов внесли существенный вклад в разработку концепции и дизайна исследования, а также в проектирование архитектуры платформы киберполигона HackerPlace. Авторы осуществили разработку клиентской и серверной частей системы, реализовали программную логику, включая механизмы аутентификации и мониторинга результатов, а также провели анализ и интерпретацию полученных технических результатов.

Жетписбаева Алия, Куттыбек Ажар внесли вклад в сбор, анализ и интерпретацию данных, выполнили систематический литературный обзор, провели сравнительный анализ существующих решений и сформировали теоретическое обоснование исследования. Помимо этого, авторы участвовали в подготовке и критическом пересмотре содержания статьи.

Садвакасова Асемгуль внесла вклад в написание текста статьи, сбор и статистическую обработку экспериментальных данных, их интерпретацию, а также организацию и проведение апробации разработанной платформы.

Список литературы

1. Miloslavskaya N., Tolstoy A. Cyber Polygon Site Project in the Framework of the MEPhI Network Security Intelligence Center // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. — Vol. 1310. — Pp. 295–308.
2. Galata L. P., Korniyenko B. Y., Yudin A. K. Research of the Simulation Polygon for the Protection of Critical Information Resources // *ITS*. — 2017. — November. — Pp. 23–31.
3. Fenton D., Traylor T., Hokanson G., Straub J. Integrating Cyber Range Technologies and Certification Programs to Improve Cybersecurity Training Programs // *The Challenges of the Digital Transformation in Education: Proceedings of the 21st International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL2018)-Volume 2*. — Springer International Publishing, 2019. — Pp. 632–643.
4. Jelo M., Helebrandt P. Gamification of Cyber Ranges in Cybersecurity Education // *2022 20th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*. — IEEE, 2022. — October. — Pp. 280–285.
5. Apruzzese G., Laskov P., Montes de Oca E. et al. The Role of Machine Learning in Cybersecurity // *Digital Threats: Research and Practice*. — 2023. — Vol. 4, no. 1. — Pp. 1–38.
6. Lee D., Kim Y. First-Mover Advantages and Intentional Knowledge Spillover Effects on Cybersecurity Start-Ups' Financial and Innovation Performance: Incentive for Revealing Innovations in High-Tech Emerging Industry // *Asian Journal of Technology Innovation*. — 2022. — Pp. 1–19.
7. Schrom E., Kinzig A., Forrest S. et al. Challenges in Cybersecurity: Lessons from Biological Defense Systems // *Mathematical Biosciences*. — 2023. — P. 109024.
8. D. Lee, D. Kim, C. Lee, M. K. Ahn and W. Lee, "ICSTASY: An Integrated Cybersecurity Training System for Military Personnel," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 62232-62246, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3182383
9. D. Qiu, M. Liu, R. Zhang, T. Luo, A. Griffo and X. Zhang, "Cyber-Physical Real-Time Digital Simulation for Cybersecurity Analysis in Microgrids," in *IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems*, vol. 3, pp. 429-441, 2025, doi: 10.1109/TICPS.2025.3569640
10. Hart S. A Pedagogical Design Model to Create Serious Games for Cyber Security: Ph.D. thesis // *University of Southampton*. — 2022.
11. K. Fotiadou, T. -H. Velivassaki, A. Voulkidis, K. Railis, P. Trakadas and T. Zahariadis, "Incidents Information Sharing Platform for Distributed Attack Detection," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 593-
12. Yamin, M. M., Katt, B., Gkioulos, V. Cyber ranges and security testbeds: Scenarios, functions, tools and architecture. *Computers & Security*, 2020. DOI: 10.1016/j.cose.2019.101636
13. Katsantonis, M. N., Manikas, A., Mavridis, I., Gritzalis, D. Cyber range design framework for cyber security education and training. *International Journal of Information Security*, 2023. DOI: 10.1007/s10207-023-00680-4
14. Glas, M., Vielberth, M., Pernul, G. Train as you Fight: Evaluating Authentic Cybersecurity Training in Cyber Ranges. *Proceedings of CHI '23 (ACM)*, 2023. DOI: 10.1145/3544548.3581046
15. Jelo, M., Helebrandt, P. Gamification of cyber ranges in cybersecurity education. *IEEE ICETA 2022*, 2022. DOI: 10.1109/ICETA57911.2022.9974714

T. Toleutai^{1*}, A. Akhmetov², A. Zhetpisbayeva¹, A. Kuttybek¹, A. Sadvakasova¹

¹ Astana IT University, Astana, Kazakhstan

² Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

Development of a cyber range platform for cybersecurity beginners

Abstract. The rapid growth of cybercrime, with global damages reaching USD 9.5 trillion by the end of 2024, as well as the active use of artificial intelligence technologies by malicious actors for cyber espionage and hard-to-detect attacks, necessitate the improvement of cybersecurity specialist training. Despite the increase in the average Global Cybersecurity Index score to 65.7 points, the scale and complexity of threats continue to rise, requiring the implementation of practice-oriented and technologically flexible educational solutions. The article presents a systematic analysis of existing cyber platforms and identifies their limitations, including the lack of built-in tools for monitoring and analyzing learners' progress. As a solution, the HackerPlace cyber range platform was developed and implemented using Python Django, React.js, REST API, and SQLite. The system architecture follows a modular principle and includes client-side, server-side, and authentication subsystems. The platform supports tasks in web security, OSINT, steganography, cryptography, and reverse engineering, with mechanisms for tracking task completion time and success rates. Testing among two student groups demonstrated a 32–58% increase in task-solving speed and improved performance outcomes.

Keywords. Cybersecurity, threats, cyber range platform, CTF, python, simulation-based learning.

References

1. Miloslavskaya N., Tolstoy A. Cyber Polygon Site Project in the Framework of the MEPhI Network Security Intelligence Center // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. - Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. - Vol. 1310. -Pp. 295–308.
2. Galata L. P., Korniyenko B. Y., Yudin A. K. Research of the Simulation Polygon for the Protection of Critical Information Resources // *ITS*. - 2017. - November. - Pp. 23–31.
3. Fenton D., Traylor T., Hokanson G., Straub J. Integrating Cyber Range Technologies and Certification Programs to Improve Cybersecurity Training Programs // *The Challenges of the Digital Transformation in Education: Proceedings of the 21st International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL2018)-Volume 2*. - Springer International Publishing, 2019. - Pp. 632–643.
4. Jelo M., Helebrandt P. Gamification of Cyber Ranges in Cybersecurity Education // *2022 20th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*. - IEEE, 2022. - October. - Pp. 280–285.
5. Apruzzese G., Laskov P., Montes de Oca E. et al. The Role of Machine Learning in Cybersecurity // *Digital Threats: Research and Practice*. - 2023. - Vol. 4, no. 1. -Pp. 1–38.
6. Lee D., Kim Y. First-Mover Advantages and Intentional Knowledge Spillover Effects on Cybersecurity Start-Ups' Financial and Innovation Performance: Incentive for Revealing Innovations in High-Tech Emerging Industry // *Asian Journal of Technology Innovation*. - 2022. - Pp. 1–19.
7. Schrom E., Kinzig A., Forrest S. et al. Challenges in Cybersecurity: Lessons from Biological Defense Systems // *Mathematical Biosciences*. - 2023. - P. 109024.

8. D. Lee, D. Kim, C. Lee, M. K. Ahn and W. Lee, "ICSTASY: An Integrated Cybersecurity Training System for Military Personnel," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 62232-62246, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3182383
9. D. Qiu, M. Liu, R. Zhang, T. Luo, A. Griffo and X. Zhang, "Cyber-Physical Real-Time Digital Simulation for Cybersecurity Analysis in Microgrids," in *IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems*, vol. 3, pp. 429-441, 2025, doi: 10.1109/TICPS.2025.3569640
10. Hart S. A Pedagogical Design Model to Create Serious Games for Cyber Security: Ph.D. thesis // *University of Southampton*. - 2022.
11. K. Fotiadou, T. -H. Velivassaki, A. Voulkidis, K. Railis, P. Trakadas and T. Zahariadis, "Incidents Information Sharing Platform for Distributed Attack Detection," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 593-
12. Yamin, M. M., Katt, B., Gkioulos, V. Cyber ranges and security testbeds: Scenarios, functions, tools and architecture. *Computers & Security*, 2020. DOI: 10.1016/j.cose.2019.101636
13. Katsantonis, M. N., Manikas, A., Mavridis, I., Gritzalis, D. Cyber range design framework for cyber security education and training. *International Journal of Information Security*, 2023. DOI: 10.1007/s10207-023-00680-4
14. Glas, M., Vielberth, M., Pernul, G. Train as you Fight: Evaluating Authentic Cybersecurity Training in Cyber Ranges. *Proceedings of CHI '23 (ACM)*, 2023. DOI: 10.1145/3544548.3581046
15. Jelo, M., Helebrandt, P. Gamification of cyber ranges in cybersecurity education. *IEEE ICETA 2022*, 2022. DOI: 10.1109/ICETA57911.2022.9974714

Сведения об авторах:

Толеутай Т. – автор для корреспонденции, магистрант, Astana IT University, Астана, Казахстан, пр. Мангилик ел 55/11, 010000

Ахметов А. – магистр, Satbayev University, Алматы, Казахстан.

Жетписбаева А. – магистр, сеньор лектор Школы Инженерии, Astana IT University, Астана, Казахстан.

Куттыбек А. – магистр, сеньор лектор Школы Кибербезопасности, Astana IT University, Астана, Казахстан

Садвакасова А. – магистр, сеньор лектор Школы Инженерии, Astana IT University, Астана, Казахстан

Toleutay T. – Corresponding author, Master's student, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, 55/11 Mangilik El Ave., 010000 Akhmetov A. – Master's degree holder, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

Zhetpisbaeva A. – Master's degree holder, Senior Lecturer at the School of Engineering, Astana IT University, Astana, Kazakhstan

Kuttybek A. – M.Sc., Senior Lecturer, School of Cybersecurity, Astana IT University, Astana, Kazakhstan

Sadvakasova A. – M.Sc., Senior Lecturer, School of Engineering, Astana IT University, Astana, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Editor-in-Chief: B.B. Togizbayeva
Desktop Publishing and Layout: A. Tulekov

Instructions for Authors and the Publication Ethics Statement are available on the
journal website: <http://bultech.enu.kz>

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)
No. 2 (155), 2026. – Astana: L.N. Gumilyov Eurasian National University. – 342 pp.

Volume: 20.1 printer's sheets.
Print run: On demand.

Signed for publication: June 30, 2026.

Open Access Electronic Version: <http://bultech.enu.kz>

The Publisher is not responsible for the content of the published materials.

Editorial Office:
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Kazhimukhan str 2., of. 424, Z01C0X1

Printed by the Publishing House of L.N. Gumilyov Eurasian National University.