

ISSN (Print) 2616-7263
ISSN (Online) 2663-1261

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ

BULLETIN

of L.N. Gumilyov
Eurasian National University

ВЕСТНИК

Евразийского национального
университета имени Л.Н. Гумилева

ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР сериясы

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY Series

Серия ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

№3 (152)/ 2025

1995 жылдан бастап шығады

Founded in 1995

Издается с 1995 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

Астана, 2025

Astana, 2025

Бас редакторы: Тогизбаева Б.Б.

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

Бас редактордың орынбасары **Жусупбеков А.Ж.**, т.ғ.д., проф., Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Жауапты редактор **Закирова А.Б.**, п.ғ.к., 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
Бану Ергеш	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Рахима Чекаева	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Жанболат Шахмов	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Михаил Жумагулов	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Данияр Базарбаев	PhD, ТОО «Solid Research Group», Астана, Қазақстан
Алия Забиева	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Редакцияның мекен жайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2,

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 402 б.

Тел.: +7 (7172) 709-500, (ішкі: 31-315). **E-mail:** vest_techsci@enu.kz

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы

ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР сериясы

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

Мерзімділігі: жылына 4 рет

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігімен тіркелген

19.04.2021 ж. № KZ31VPY00034682 қайта есепке қою туралы куәлігі

Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі 13/1

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Тел: +7 (7172)709-500 (ішкі 31-315). Сайт: <http://bultech.enu.kz>

Editor-in-Chief: Baglan Togizbayeva

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

Deputy Editor-in-Chief

Askar Zhussupbekov, Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Executive editor

Alma Zakirova, Assoc. Prof. (comp. sci.), 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 Perugia
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
Рысрем Саянпұев	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
B.Yergesh	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
R.Chekayeva	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Zh.Shakhmov	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
M.Zhumagulov	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
D.Bazarbayev	PhD, TOO «Solid Research Group», Astana, Kazakhstan
A.Zabiyeva	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editorial address: 2, Satpayev str., of. 402,

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, 010008

Tel.: +7 (7172) 709-500, (ext. 31-315), **E-mail:** vest_techsci@enu.kz

Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University

TECHNICAL SCIENCES and TECHNOLOGY Series

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

Periodicity: 4 times a year

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

Rediscount certificate № KZ31VPY00034682 from 19.04.2021

Address of Printing Office: 13/1 Kazhimukan str., Astana, Kazakhstan 010008

L.N. Gumilyov Eurasian National University

Tel: +7 (7172) 709-500 (ext.31-315). Website: <http://bultech.enu.kz>

Главный редактор: Тогизбаева Б.Б.

д.т.н., проф., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Зам. главного редактора

Жусупбеков А.Ж., д.т.н., проф., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Ответственный редактор

Закирова А.Б., к.п.н. (комп. науки), доцент, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Редакционная коллегия

Levente Kovács	Профессор, Обуда университет, Венгрия
Aljawarneh Shadi A.	Профессор, Университет Науки и Технологии Иордании, Иордания
Milani Alfredo	Профессор, Университ Перуджио, Италия
Rafal Burdzik	Профессор, Силезский университет Технологии, Польша
Akitoshi Mochizuki	Профессор, университет Токусима, Япония
András Molnár	Профессор, Обуда университет, Венгрия
Der Wen Chang	Тамканг Университеті, Тайвань Профессор, Института
Yoshinori Iwasaki	Гео исследований, Япония
Eun Chul Shin	Профессор, Ичхонского национального университета, Южная Корея
Viktor Kaliakin	Профессор, Университет штата Делавэр, США
Рустем Сахапов	Профессор, Казанский государственный университет, Россия
Tadatsugu Tanaka	Профессор, Университет Токио, Япония
Hoe Ling	Профессор, Колумбийский университет, США
Гульмира Бекманова	Профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Елбек Утепов	Профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Асель Тулебекова	Профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Бану Ергеш	Ассоц. профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Рахима Чекаева	Профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Жанболат Шахмов	Профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Михаил Жумагулов	Ассоц. профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Данияр Базарбаев	PhD, ТОО «Solid Research Group», Астана, Казахстан
Алия Забиева	Ассоц. профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2,
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, каб. 402
Тел.: +7(7172) 709-500, (вн. 31-315). **E-mail:** vest_techsci@enu.kz

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева
Серия ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Собственник: НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева» Периодичность:
4 раза в год

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан Свидетельство
о постановке на переучет № KZ31VPY00034682 от 19.04.2021 г.

Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Кажымукана, 13/1,
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева
Тел.: +7(7172)709-500 (вн.31-315). Сайт: <http://bultech.enu.kz>

МАЗМҰНЫ/ CONTENT/ СОДЕРЖАНИЕ

Мухаммед Косут

Оптимизацияланған қималары бар CFS (қалыпта суықтай иілген болат) қиғаш байланыстарымен қабырғалардың сейсмикалық әсерін бағалау.....

Muhammed Cosut

Evaluating the Seismic Response of CFS Strap-Braced Walls with Optimised Sections.....

Мухаммед Косут

Оценка сейсмической реакции стен с раскосами из холодногнутых профилей с оптимизированными сечениями..... 9

Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков, П. Еврич

Шахта тіректерін дайындауда жеңіл фибробетонды қолдану.....

Ю.В.Пухаренко , Д.А.Пантелеев , М.И.Жаворонков

Применение легкого фибробетона для изготовления шахтных затяжек.....

Yu.V. Pukhareenko, D.A. Panteleev, M.I. Zhavoronkov, P. Evrich

Application of Lightweight Fiber-Reinforced Concrete for Shaft Lagging..... 23

Ә.Қ. Әйтім

Жол қозғалысы ережелерін үйретуге арналған мобильді ойын әзірлеу.....

A.K.Aitim

Development of a Mobile Game for Teaching Traffic Rules.....

A.K. Айтим

Разработка мобильной игры для обучения правилам дорожного движения..... 41

М.Ө. Иманов, Т.Болотбек, К.А. Абдрахманова, А.Т.Мухамеджанова,

А. А. Абдрахманова

Су басу жағдайындағы жер құрылыстарының тұзды топырақтарының беріктік қасиеттері.....

М.О.Иманов, Темір Болотбек, К.А.Абдрахманова , А.Т.Мухамеджанова ,

А.А. Abdrakhmanova

Прочностные свойства засоленных грунтов земляных сооружений в условиях подтопления.....

М.О.Иманов,Т. Болотбек, К.А. Абдрахманова, А.Т.Мухамеджанова, А.А.

Абдрахманова

Strength properties of saline soils of earthworks in conditions of flooding. 51

М.А. Байбусинова, Г.В. Муратбекова, М.В. Аманова, Д.С. Мамбеталин

Қауіпсіздік пен тиімділіктің ашықтығын қамтамасыз етудегі блокчейннің артықшылықтарын зерттеу.....

М.А. Baibusinova, G.V. Muratbekova, M.V. Amanova, D.S. Mambetalin

Exploring the benefits of blockchain in ensuring security, transparency, and efficiency.....

М.А. Байбусинова, Г.В. Муратбекова, М.В. Аманова, Д.С. Мамбеталин

Исследование преимуществ блокчейна в обеспечении прозрачности безопасности и эффективности..... 65

Б. Ж. Карпсеитова, С.Ш. Садықова

Ғимараттарды бейімдеп қайта құру және олардың жаңа функцияларға

мүмкіндіктері (Діни ғимараттар мен құрылыстар мысалында.....	
B. Zh. Karpseitova, S. Sh. Sadykova	
Peculiarities of Adaptive Reconstruction of Buildings and Their Potential for New Functions (Using Religious Buildings and Structures as a Case Study)	
Б. Ж. Карпсеитова, С.Ш. Садыкова	
Особенности адаптивной перестройки зданий и их возможности для новых функций (на примере культовых зданий и сооружений)	79
К.Т.Ахметов, А.Б. Болатова, Е. Макажанов, Г.К. Саменов.	
PID реттегішін қолдана отырып, коллекторсыз қозғалтқыштар мен MPU6050 эксперименттік зерттеу.....	
К.Т.Аkhmetov, A.B.Bolatova, Y. Makazhanov, G.K. Samenov	
Experimental study of brushless motors and MPU6050 using a PID controller	
К.Т.Ахметов, А.Б. Болатова, Е.Макажанов, Г.К. Саменов	
Экспериментальное исследование бесколлекторных двигателей и MPU6050 с применением ПИД-регулятора.....	99
Р.М. Сәдуақасов, Қ.Ж.Сәдуақасова	
Сыни жағдайдағы адам мінезін зерттеудің қазіргі тәсілдері: 3D агенттерді virtual realitya интеграциялау.....	
Р.М. Садвакасов, К.Ж. Садвакасова	
Современные подходы к изучению поведения человека в критической ситуации: интеграция 3D-агентов в виртуальную реальность.....	
R.M. Sadvakassov, K.Zh. Sadvakassova	
Modern approaches to studying human behavior in a critical situation: integration of 3D agents into virtual reality.....	110
Ж.М. Рамазанова, Г.А. Кокаева, А.Е. Жакупова, О.К. Абдирашев	
Заманауи композициялық құрыш материалдары.....	
Zh.M. Ramazanova, G.A. Kokaeva, A.E. Zhakupova, O.K. Abdirashev	
Modern composite armor materials.....	
Ж.М. Рамазанова, Г.А. Кокаева, А.Е. Жакупова, О.К. Абдирашев	
Современные композитные бронематериалы.....	122
А.М.Байдаралина, Г.Д.Мауленова, Б.У.Куспангалиев, Д.Ж.Байдаралин	
Еуразиялық көшпелі өркениетті ребрендингтеу: климаттың өзгеруі және қазақстан территорияларының аридизациясы жағдайындағы тарихи көшпенділік тәжірибесінің мәні.....	
A.M. Baidaralina, G.D. Maulenova, B.U. Kuspangaliyev, D.Zh. Baidaralin	
Rebranding of the Eurasian nomadic civilization: the importance of the experience of historical nomadism in the context of climate change and aridization of the territories of Kazakhstan.	
А.М.Байдаралина, Г.Д.Мауленова, Б.У.Куспангалиев, Д.Ж.Байдаралин	
Ребрендинг евразийской кочевой цивилизации: значение опыта исторического кочевничества в контексте изменения климата и аридизации территорий казахстана.	137
К.С. Юсупова, С.Е. Бекжанова, Б.Б. Амралинова, Г.С. Муханова, А.В. Мухаметжанова	
Жүк ағындарындағы тұрақты даму факторларын зерттеу.....	
K.S Yussupova, S.E. Bekzhanova, B.B.Amralinova, G.S. Mukhanova, A.V. Mukhametzhanova	
Study of factors of sustainable development in cargo flows.....	
К.С. Юсупова, С.Е.Бекжанова, Б.Б. Амралинова, Г.С. Муханова, А.В. Мухаметжанова	
Исследование факторов устойчивого развития при перевозке грузов.....	155
Л.Б. Сағатова, С.А.Бортебаев, Д.Д.Басканбаева, Ш.Д. Ахметова	
Сорғы жабдықтарының техникалық жағдайын термиялық бақылау әдісімен диагностикалау.....	

L.B. Sagatova, S.A. Bortebayev, D.D. Baskanbayeva, Sh.D. Akhmetova Diagnostics of the technical condition of pumping equipment by thermal control method...	
Л.Б. Сагатова, С.А.Бортебаев, Д.Д. Басканбаева, Ш.Д. Ахметова Диагностика технического состояния насосного оборудования тепловым методом контроля.....	171
A.K. Тулешов, М.Ж. Куатова, А.Т. Хабиев, Б. Меркибаева Алты буынды механизм негізіндегі қосиінді баспақтың динамикалық сипаттамаларын және маховигін есептеудің аналитикалық тәсілі.....	
A.K. Тулешов, М.Ж.Куатова, А.Т. Хабиев, Б.М. Меркибаева Аналитический подход к расчёту динамических характеристик и маховика шестизвенного механизма кривошипного пресса.....	
A.K. Tuleshov, M.Zh. Kuatova, A.T. Khabiev, B. Merkibayeva Analytical Approach to Calculating the Dynamic Characteristics and Flywheel of a Six-Link Crank Press Mechanism.....	184
A. Р. Омаров, А.Ж. Жусупбеков, О.Д. Бибалаев, Д. М. Михайлов, Г. К. Танырбергенова, Ankit Garg Құрылыс саласында еңбек қауіпсіздігін компьютерлік көру және дрондар арқылы арттыру	
A.R. Omarov, A. Zh. Zhussupbekov, O. D. Bibalaev, D. M. Mikhailov, G. K. Tanyrbergenova, Ankit Garg Enhancing Construction Site Safety Using Computer Vision and Drones.....	
A. Р. Омаров, А.Ж. Жусупбеков, О.Д. Бибалаев, Д. М. Михайлов, Г. К. Танырбергенова, Ankit Garg Повышение безопасности труда в строительстве с помощью компьютерного зрения и дронов.....	201
Б.Т.Жали, Д.Уей, А.Д.Мусаев, Д. Г.Иғали Сұйықтық динамикасын есептеуді зерттеу және катетер білігіне Луер фитингін орнатудың ұсынылған процедурасын эксперименттік тексеру.....	
B.T.Zhali, D.Wei , A.Mussayev, D.G.Igali Computational Fluid Dynamics Study and Experimental Verification of the Proposed Procedure for Luer Fitting to Catheter Shaft Attachment.....	
Б.Т.Жали, Д.Уей, А.Д.Мусаев, Д. Г.Иғали Исследование динамики жидкости с помощью компьютерных вычислений и экспериментальная проверка предлагаемой процедуры установки Луер фитинга на шaft катетера.....	215
М.А. Джаксымбетова, А.Т. Канаев, Б.У. Байхожаева, Е.Ю. Ремшев Бейниттік түрлену механизмі мен бейниттік құрылымды машина жасау болаттарының термиялық беріктендіру сапасы туралы.....	
M.A. Jaxsymbetova, A.T. Kanaev, B.U. Baikhozhayeva, E.Yu. Remshev On the mechanism of bainitic transformation and the quality of heat treatment in engineering steels with a bainitic structure	
М.А. Джаксымбетова, А.Т. Канаев, Б.У. Байхожаева, Е.Ю. Ремшев О механизме бейнитного превращения и качестве термоупрочнения машиностроительных сталей с бейнитной структурой.....	231
Ж.Б. Жантлесова, Р.Е.Лукпанов, А.Д.Алтынбекова, Д.В. Цигулев, А.Е.Джексембаева Модификацияланған қоспаның инъекциялық ерітінділердің физика-механикалық қасиеттеріне әсерін бағалау.....	
Zh.B. Zhantlessova, R.E. Lukpanov, A.D. Altynbekova, D.V. Tsigulev, A.E. Jeksembayeva Evaluation of the Effect of a Modified Additive on the Physico-Mechanical Properties of Injection Grouts.....	
Ж.Б. Жантлесова, Р.Е.Лукпано , А.Д. Алтынбекова, Д.В. Цигулев, А.	

Е.Джесксембаева

Оценка влияния модифицированной добавки на физико-механические свойства инъекционных растворов.....	247
А.М. Сайынов, С.К. Ташенов, М.В. Карташов, А.М. Булгынова, Б.М. Есжанов	
Сәтпаев қаласының негізгі көше желісіне бағытталған кешенді көлік талдауы мен модельдеуі.....	
A.M. Saiynov, S.K. Tashenov, M.V. Kartashov, A.M. Bulgynova , B.M. Yeszhanov	
Detailed transport analysis and modelling focused on the key network of streets in Satpayev city.....	
А.М. Сайынов, С.К. Ташенов, М.В. Карташов, А.М. Булгынова, Б.М. Есжанов	
Детальный транспортный анализ и моделирование, сосредоточенные на ключевой уличной сети города Сатпаев.....	257
Ж.Е. Шукаманов, Г.А. Сүлейменова	
Интервалды реттеу жүйелерінің пойызаралық интервалға әсерін бағалау	
Zh.E. Shukamanov, G.A. Suleimenova	
Assessment of the impact of interval control systems on the inter-train interval.....	
Ж.Е. Шукаманов, Г.А. Сулейменова	
Оценка влияния систем интервального регулирования на межпоездной интервал....	268



IRSTI 67.01.00

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-9-22>

Evaluating the Seismic Response of CFS Strap-Braced Walls with Optimised Sections

Muhammed Cosut 

School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Sheffield, Sheffield, UK

E mail: mcosut1@sheffield.ac.uk

Abstract. Cold-formed steel (CFS) profiles are widely used in light steel-framed buildings, particularly for low- to mid-rise construction, where CFS strap-braced frames serve as key lateral load-resisting systems. This research focuses on the seismic performance of strap-braced walls incorporating CFS members, with a particular emphasis on optimising stud elements to function efficiently as beam-columns. A typical cross-section, derived from commercially available profiles, is selected and refined to maximise structural capacity while adhering to industry standards and practical limitations. Finite element (FE) models are developed for two strap-braced wall frames, where the sections are used for both the studs and chords: one frame uses commercially available CFS sections, while the other employs optimised sections aimed at enhancing seismic performance. While conventional designs include gravity loads, they often overlook P- Δ effects; this study addresses that limitation by applying different axial compression levels to assess the impact of P- Δ effects on both developed models. The structural performance is evaluated based on lateral drift compliance and the avoidance of premature failure caused by P- Δ effects in the chord studs. The outcomes offer valuable insights for enhancing the seismic design of CFS structures, presenting a systematic optimisation strategy that improves ductility, reliability, and structural integrity under seismic loading.

Keywords: Cold-Formed Steel; Strap-braced wall panels; Optimization, Gravity loading, Seismic performance

Received 30.08.2025. Revised 05.09.2025. Accepted 08.09.2025. Available online 30.09.2025

*the corresponding author

Introduction

CFS is widely valued in construction due to its excellent strength-to-weight ratio, long-lasting durability, and recyclability, qualities that contribute to its sustainability and cost-effectiveness [1-2]. Its lightweight characteristics enable easier transportation and faster installation. Additionally, CFS's adaptability allows for efficient section design and off-site manufacturing, which reduces material waste and shortens construction durations. In multi-storey buildings, CFS members frequently act as the primary lateral force-resisting elements, effectively supporting both vertical and lateral loads from wind and seismic forces [3-7]. In these systems, lateral load resistance is commonly provided by strap-braced stud walls [8-10], which are available in various forms such as X-bracing [11], K-bracing [12], knee-bracing, or combinations thereof.

Several researchers have investigated the behaviour of CFS strap-braced walls, particularly under monotonic and cyclic loading conditions. Al-Kharat and Rogers [11] performed experimental tests on light, medium, and heavy CFS strap-braced walls and found that heavier panels showed inadequate ductility. Likewise, Zeynalın and Ronagh [13] examined strap-braced walls with a 1:1 aspect ratio, focusing on the effects of strap quantity, angles, and bracket design under cyclic loads. Their results indicated that these walls maintained stable hysteretic behaviour and could be considered structurally dependable. Although shake-table tests conducted by others [14] have contributed valuable insights into CFS wall behaviour, the combined impact of gravity and lateral loads has often been neglected. Rad et al. [15] addressed this gap by performing full-scale cyclic tests on two-story CFS strap-braced systems, demonstrating robust elastic-plastic responses when appropriate detailing was implemented.

Optimization methods are commonly applied in structural engineering to enhance load capacity and stiffness or to reduce cost, weight, and carbon emissions. Depending on the design goals, various algorithms (such as metaheuristic, deterministic gradient-based, or hybrid approaches) can be employed. For example, Ye et al. [16-18] increased the load-carrying capacity of beams by optimizing cross-sectional designs incorporating edge and intermediate stiffeners and segmented folded flanges. Similarly, Mojtabaei et al. [19-20] developed a metaheuristic-based methodology to optimize CFS beam-column members, maximizing their load capacity while maintaining consistent material usage in compliance with Eurocode 3.

This study focuses on improving the load-bearing capacity of CFS strap-braced walls by substituting the commercially available stud and chord sections with optimized alternatives. The optimization process was constrained by material usage limits, specifically the total coil width and thickness of the chosen sections. FE models of walls with both commercially available and optimized stud sections were created and analysed under combined gravity and lateral loading to assess seismic performance. The subsequent sections of this paper include Section 2, which details the design process for the CFS beam-column elements; Section 3, which describes the optimization methodology and associated constraints; Section 4, covering the development and validation of the FE model; and Section 5, which presents the seismic performance evaluation.

The methodology

CFS beam-column element design

The design of CFS elements has been extensively investigated in previous studies using both prescriptive code-based methods and data-driven approaches [21-23]. In this study, the capacity

of the CFS beam-column element was determined using the EN1993-1-1 [24] and EN1993-1-3 [25] standards. The cross-sectional resistance was evaluated by considering both local and distortional buckling modes, while the member resistance accounted for global instabilities.

Local-distortional buckling and cross-section check

The Effective Width Method (EWM) outlined in Eurocode 3 addresses local buckling by reducing the load-bearing capacity of compressed plate regions. This reduction may cause a shift in the centroid position and result in additional bending moments. When the member is subjected to bending, an iterative procedure is employed to determine the neutral axis and compute the bending strength based on the effective partially plastic section modulus. Distortional buckling, which frequently occurs in stiffened plates under flexural or flexural-torsional loads, involves both in-plane and out-of-plane deformation modes. Eurocode 3 manages this phenomenon by decreasing the effective thickness of the stiffener and the adjacent plate areas. The buckling stress is then calculated by modelling the stiffened section as a compression element resting on an elastic foundation.

The cross-section of a CFS beam-column under axial compression and bending moments must satisfy the following criteria:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd}} \leq 1 \quad (1)$$

where $N_{c,Rd}$ denotes the design compressive resistance of the cross-section, while $M_{cy,Rd}$ and $M_{cz,Rd}$ design moment resistance about the major (y-axis) and the minor (z-axis) axes, respectively. The additional moments are calculated as $\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} e_{Ny}$ and $\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} e_{Nz}$, where e_{Ny} and e_{Nz} are the shifts of the y- and z-axes, respectively.

Member resistance requires various calculations for both pure compression and pure bending. In this regard, global buckling is considered for pure compression, while lateral-torsional buckling is assessed under pure bending. Additionally, member stability was evaluated using the equations provided in EN 1993-1-3.

The optimization in this study utilized the code developed by Mojtabaei et al. [19], which is based on the Particle Swarm Optimization (PSO) technique. The primary goal was to keep the material consumption, specifically the total coil width, consistent with that of the commercially available reference section used as a baseline. Using this reference, an optimized cross-sectional design was created to improve the load capacity under combined axial compression (N_{Ed}) and bending about the major axis ($M_{y,Ed}$). The bending moment was applied by introducing an eccentricity (e_y) to the axial compressive load, thereby maximizing the axial capacity N_{Ed} under conditions that closely simulate real-world loading ($M_{y,Ed} = N_{Ed} \times e_y$).

During the optimization, a beam-column element with simply supported end-fork supports was modelled, which permitted rotations and warping at its ends but restricted twisting along the longitudinal axis. The study focused on a lipped channel section and explored various parameters, such as section thicknesses of 1.6, 2, 3, and 4 mm, as well as eccentricities of 0, 100, and 300 mm. These variations were analysed to assess and compare the enhancements in axial compressive load capacity for each scenario. To maximize the axial load capacity, the cross-sectional optimization combined the Eurocode Design Procedure for Beam-Column Members with a Particle Swarm Optimization tool implemented in MATLAB.

Figure 1 illustrates both the original and optimized cross-sectional designs. Furthermore, Table 1 outlines the specific restrictions and requirements imposed by industry standards and

manufacturing processes. The design variables primarily involved the lengths of the flange and lip, which were limited according to these standards and production considerations. The angle θ was set to $\pi/2$. Additional constraints were introduced to accommodate the installation of hold-down devices (Simpson S/HD10 S with a depth of 59 mm) on the CFS strap-braced wall. These constraints ensured that the spacing between the lips of the chord members provided sufficient clearance for the hold-downs to be properly installed without causing any interference with the chord cross-sectional shape, as detailed below:

$$spacing \geq h - 2 \times c = 60 \quad (2)$$

where h denotes the web height and c represents the lip length.

Table 1. Optimization design variables, constraints and limitations

Design variables	Constraints based on EC3	Manufacturing & practical limitations (mm)
	$0.2 \leq c/b \leq 0.6$	
$X_1 = c/b$	$b/t \leq 60$	$b \geq 30$
$X_2 = b/L$	$c/t \leq 50$	$c \geq 10$
	$h/t \leq 500$	$h \geq 2c \sin(\theta)$
	$\pi/4 \leq \theta \leq 3\pi/4$	

Design variables which are X_1 and X_2 ratio ranges were computed based on the standard and manufacturing process. X_1 was set between 0.2 and 0.6, while X_2 was determined based on the total coil width and material thickness. The maximum ratio for X_2 was limited using two different arrangements to reduce the computational time by narrowing the range.

$$\frac{b_{min}}{L} \leq X_2 \leq \min \left\{ \frac{60 \times t}{L}, \frac{b_{msx}}{L} \right\} \quad (3)$$

$$b_{msx} = L - h_{min} - 2 \times c_{min} \quad (4)$$

where b_{min} was set 30 mm, L is the total coil width (300 mm), t , h_{min} , c_{min} represent the thickness, minimum web height and minimum lip length, respectively.

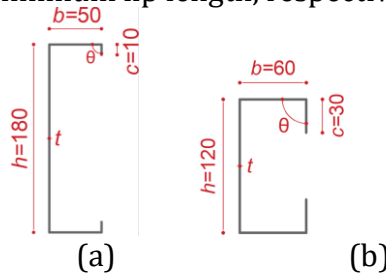


Figure 1 Cross-section of (a) commercially available, (b) optimised section

Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) is a metaheuristic technique rooted in the collective behavior observed in nature among groups like birds, fish, and ants. This method belongs to the broader family of swarm intelligence algorithms. In PSO, each particle adjusts its velocity by considering both its personal best experience and the best performance achieved by the swarm as a whole. This approach enables a balanced integration of individual adaptation and collaborative decision-making, making the algorithm highly effective for solving complex optimization problems. FE modelling: descriptions and properties.

Abaqus [26] is well-established for its effectiveness in precisely replicating the structural response of CFS structures, significantly reducing the reliance on large-scale physical testing [27-30]. Following the optimization of the C-lipped section with zero eccentricity ($e = 0$), FE models of CFS strap-braced walls were developed using both commercially available and optimised stud sections. Each wall model measured $2.44 \text{ m} \times 2.44 \text{ m}$ and included top and bottom rigid plates, tracks, chords, studs, X-shaped straps, bridging members, hold-downs, L-brackets, and anchor rods (see Figure 2).

Element type and material characterization

The cold-formed steel (CFS) strap-braced wall models were developed using four-node S4R shell elements, which are well-suited for analysing thin-walled components. To ensure accuracy and efficiency, a mesh sensitivity study was conducted, resulting in a mesh size of $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ for most structural elements, while rigid plates were assigned a coarser mesh of $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ to optimize computational performance. Material properties were obtained from experimental tests, and stress-strain data were converted to true stress-strain relationships for accurate Abaqus input. The elastic modulus is 203 GPa, and the Poisson's ratio is 0.3. Strap and track have the same yield (f_y) and ultimate stress (f_u) as 296 and 366 MPa, respectively. Also, stud and chord have the same f_y and f_u of 325 and 382 MPa, respectively. In addition, the isotropic hardening model was used for the monotonic analysis.

Table 2: Material properties

	f_y (MPa)	f_u (MPa)
Strap	296	366
Track		
Stud	325	382
Chord		

Boundary conditions, loading, and connection modelling

In the FE model, the hold-downs (Simpson S/HD10 S) and tracks were connected to reference points positioned at the anchor locations. These reference points at the base were fully fixed, while those at the top were permitted to move laterally within the plane. However, their out-of-plane translations and rotational degrees of freedom were restrained. A monotonic load was applied incrementally until the inter-storey drift reached a maximum limit of 5%. To replicate gravity loading, a 20 mm thick plate was added above the top track, facilitating even distribution of vertical loads. This top plate was subjected to uniform pressure, scaled based on the compressive capacities of the vertical members, as outlined in EN1993-1-3 [25]. The connections between tracks and studs, as well as straps and chords, were simulated using empirical formulations proposed by Pham and Moen [31]. Within Abaqus [26], screws were modelled as discrete fasteners, with the connector influence radius enabling the transfer of displacements and rotations from surface nodes to the fastening locations.

Geometric Imperfection

Initial geometric imperfections were incorporated by scaling the first buckling mode shape from an eigenvalue buckling analysis [32-35]. Slack in tension straps was simulated by applying unit lateral displacements at anchor points, inducing initial compression in the diagonals. Chord stud imperfections were omitted due to their negligible impact, enhancing computational

efficiency in multi-storey models.

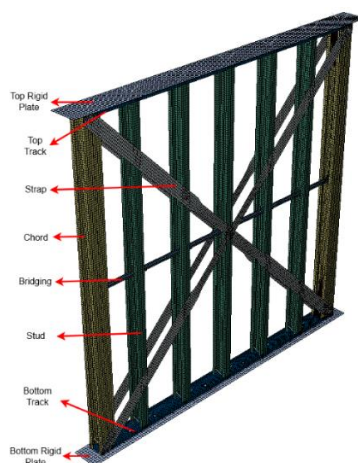


Figure 2. FE model

Findings/Discussion

In the optimization process, three different values of e (0, 100, and 300) were considered, along with four thicknesses (1.16, 2, 3, and 4) for the C-lipped stud element. These combinations were analysed to explore the relationship between e and thickness. The results show that as e increases, the capacity improvements between commercially available and optimised sections become smaller. To exemplify, the capacity improvement for $e=0$ ranges from approximately 42% to 91%, while for $e=300$, it ranges from about 8% to 25% (see Figure 3). Consequently, the differences in average capacity improvement of approximately 45% and 12% can be observed between $e=0$ and $e=300$, as well as between $e=100$ and $e=300$, respectively.

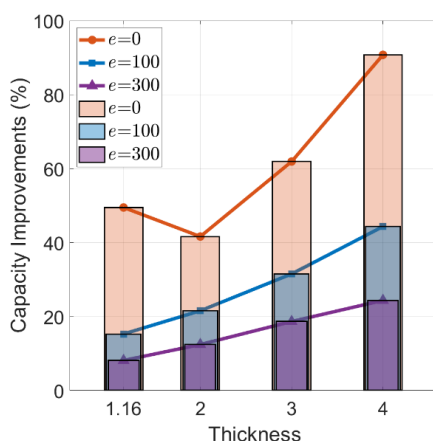


Figure 3 Optimization results based on thickness

Once the CFS strap-braced wall frames using both commercially available and optimised stud sections were created in Abaqus, the gravity load, calculated based on commercially available sections considering the total compressive strength of the vertical elements ($N_{b,t}$), was applied to

both frames across a range of load levels. This was done to examine the P- Δ responses of the models and to assess whether they reached the maximum allowable drift. Figure 4 illustrates the FE analysis results, showing the effects of applying gravity loads ranging from 0% to 50% $N_{b,t}$ on both frames. The analysis was conducted using 2 mm thick straps and 1.16 mm thick chords, and studs. The CFS strap-braced frame equipped with the optimised section (see Figure 4 (b)) demonstrated consistent performance, with most frames achieving the maximum allowable drift. However, the frames subjected to 43% and 50% $N_{b,t}$ are unable to reach this limit. In contrast, the CFS strap-braced frame equipped with a commercially available stud section (see Figure 4 (a)) showed a noticeable reduction in performance, failing to reach the maximum allowable drift at several load levels between 22% and 50% $N_{b,t}$.

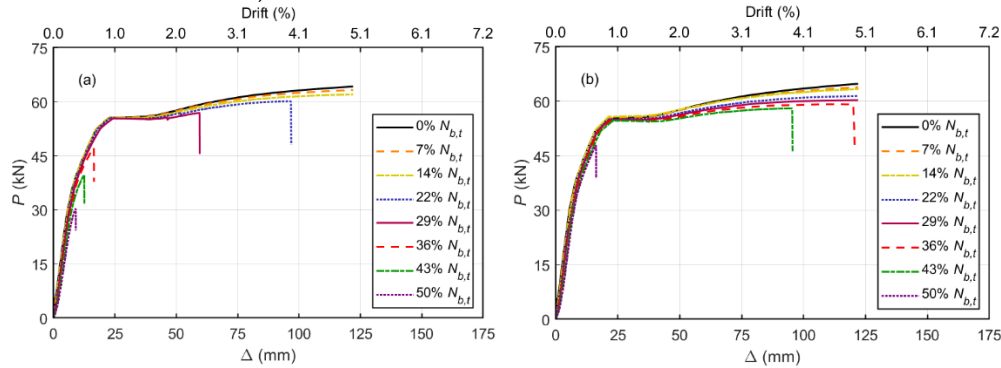


Figure 4 Monotonic response of (a): commercially available; (b): optimised models

The stiffness (k) (kN/mm) and ductility (μ) values were computed using the bilinear curve, which follows the Equivalent Energy Elastic-Plastic (EEEP) approach [36]. These values are determined as follows:

$$k = \frac{P_y}{\Delta_y} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (6)$$

where P_y is the yield load, Δ_y is the yield displacement, and Δ_u is the ultimate displacement.

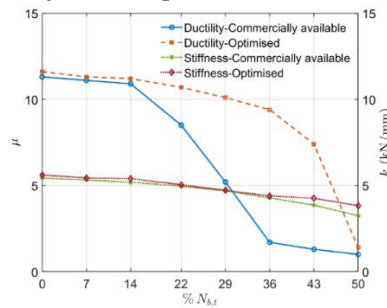


Figure 5 Evaluation of ductility ratio (μ) and stiffness (k) of the commercially available and optimised section under varying $N_{b,t}$

Based on monotonic analysis results, the stiffness and ductility of both CFS strap-braced frames, equipped with commercially available and optimised stud sections, were evaluated under varying vertical load ratios ($\% N_{b,t}$) (see Figure 5). The stiffness of both models exhibits a similar

decreasing trend, with a gradual reduction as the vertical load increases. For frames with commercially available stud sections, ductility shows a slight decline from 0% to 14% $N_{b,t}$, followed by a significant drop beyond this point. In contrast, frames with optimised stud section maintains higher ductility up to 36% $N_{b,t}$, with a noticeable reduction occurring only at higher vertical load levels. A sharp drop is observed particularly at 50% $N_{b,t}$, where the ductility value reaches approximately 1.4.

Conclusion

This study aimed to enhance the performance of CFS strap-braced frames by optimising stud (beam–column) sections within design and manufacturing constraints. The optimised cross-section was applied to both studs and chords, and FE models were developed in Abaqus using both commercially available and optimised stud sections. Combined gravity and lateral loads were applied to the frames, with the total gravity load calculated based on the compressive strength of the vertical elements (i.e., chords and studs) in the commercially available section. This reference value was then used to define gravity load levels ranging from 0% to 50% of $N_{b,t}$, and consistently applied to both frames. This approach enabled a consistent comparison of stiffness, strength, and ductility across configurations. The findings demonstrate that variations in eccentricity (e) and thickness during beam–column element optimization significantly influence the improvement of the load-bearing capacity, revealing clear differences between the optimised and commercially available sections. Moreover, increased eccentricity results in reduced capacity.

While low vertical loads have a minimal impact on lateral performance, higher gravity loads considerably enhance the peak strength, ductility, and stiffness of frames incorporating the optimised section, in contrast to those using commercially available section.

References

1. M. Hasanali, K. Roy, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, GC Clifton, JBP Lim A critical review of cold-formed steel seismic resistant systems: Recent developments, challenges and future directions. *Thin-Walled Structures* 180, (2022) 109953.
2. D.T. Phan, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, J. Ye, J.B.P Lim. Coupled Element and Structural Level Optimisation Framework for Cold-Formed Steel Frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 49 (2019) 69-83.
3. Papargyriou, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, J. Becque, K. Pilakoutas, Cold-formed steel beam-to- column bolted connections for seismic applications, *Thin-Walled Structures*, 172 (2022) 108876.
4. J. Ye, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, K. Pilakoutas, Efficient design of cold-formed steel bolted-moment connections for earthquake resistant frames, *Thin-Walled Structures*, 59 (2019) 49-61.
5. J. Ye, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha. Seismic performance of cold-formed steel bolted moment connections with bolting friction-slip mechanism, *Journal of Constructional Steel Research*, 27 (2019) 86- 100.
6. S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, J. Ye, Optimisation of cold-formed steel beams for best seismic performance in bolted moment connections, *Journal of Constructional Steel*

- Research, 181 (2021) 106621.
7. S.M. Mojtabaei, M.Z. Kabir, I. Hajirasouliha, M. Kargar, Analytical and experimental study on the seismic performance of cold-formed steel frames. *Journal of Constructional Steel Research* 143, (2018) 18-31.
 8. . Yilmaz, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, J. Becque, Behaviour and performance of OSB-sheathed cold- formed steel stud wall panels under combined vertical and seismic loading, *Thin-Walled Structures*, 183 (2023) 110419.
 9. F. Yilmaz, J. Becque, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, Capacity and Behavior of Sheathed Cold-Formed Steel Stud Walls under Outward Flexural Loading. *Journal of Structural Engineering* 151 (1), (2025) 04024192.
 10. F. Yilmaz, J. Becque, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, Experimental investigation of the behaviour and capacity of sheathed cold-formed steel stud walls under inward flexural loading. *Thin-Walled Structures* 192, (2024) 111048.
 11. Al-Kharat, M.; Rogers, C.A. (2007) Inelastic performance of cold-formed steel strap braced walls. *Journal of Constructional Steel Research* 63, 4, p. 460-474.
 12. Riahi, H.T. et al. (2020) Seismic collapse assessment of K-shaped bracings in cold-formed steel frames. *Structures* 27, p. 1803-1817.
 13. Zeynalian, M.; Ronagh, H. (2013) Experimental study on seismic performance of strap-braced cold-formed steel shear walls. *Advances in Structural Engineering* 16, 2, p. 245-257.
 14. Gad, E. et al. (1999) Lateral performance of cold-formed steel-framed domestic structures. *Engineering Structures* 21, 1, p. 83-95.
 15. Rad, P.L. et al. (2024) Experimental investigation on seismic performance of cold-formed steel strap-braced stud walls under lateral cyclic and vertical loading. *Thin-Walled Structures* 194, p. 111312.
 16. J. Ye, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha. Local-flexural interactive buckling of standard and optimised cold- formed steel columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 144 (2018) 106-118.
 17. J. Ye, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, Paul Shepherd, Kypros Pilakoutas, Strength and deflection behaviour of cold-formed steel back-to-back channels. *Engineering Structures* 177 (2018) 641-654.
 18. J. Ye, J. Becque, I. Hajirasouliha, S.M. Mojtabaei, J.B.P. Lim. Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending, *Engineering Structures*, 161 (2018) 55-67.
 19. Mojtabaei, S.M. et al. (2021) Structural size optimization of single and built-up cold-formed steel beam-column members. *Journal of Structural Engineering* 147, 4, p. 04021030.
 20. S.M. Mojtabaei, J. Ye, I. Hajirasouliha. Development of optimum cold-formed steel beams for serviceability and ultimate limit states using Big Bang-Big Crunch optimisation, *Engineering Structures*, 195 (2019) 172-181.
 21. S.M. Mojtabaei, R. Khandan, I. Hajirasouliha, Predicting restraining effects in CFS channels: A machine learning approach, *Steel and Composite Structures, An International Journal* 51 (4), 441-456.
 22. L. Simwanda, P. Gatheeshgar, F.M. Ilunga, B.D. Ikotun, S.M. Mojtabaei, Explainable machine learning models for predicting the ultimate bending capacity of slotted perforated cold-formed steel beams under distortional buckling, *Thin-Walled Structures* 205, (2024) 112587

23. S.M. Mojtabaei, J. Becque, I. Hajirasouliha, R. Khandan, Predicting the buckling behaviour of thin-walled structural elements using machine learning methods, *Thin-Walled Structures*, 184 (2023) 110518.
24. CEN (European Committee for Standardization) (2005) Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium.
25. CEN (European Committee for Standardization) (2005) Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels, Belgium.
26. Dassault Systèmes Simulia (2014) Abaqus 6.14 CAE User Guide.
27. D.T. Phan, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, T. L. Lau, J.B.P. Lim. Design and optimisation of cold-formed steel sections in bolted moment connections considering bimoment, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 146 (2020) 04020153.
28. S.M. Mojtabaei, J. Becque, I. Hajirasouliha. Local buckling in cold-formed steel moment resisting bolted connections: behaviour, capacity and design, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 146 (2020) 04020167
29. H. Parastesh, S.M. Mojtabaei, H. Taji, I. Hajirasouliha, A. Bagheri Sabbagh, Constrained optimization of anti-symmetric cold-formed steel beam-column sections, *Engineering Structures*, 228 (2021) 111452.
30. S.M. Mojtabaei, J. Becque, I. Hajirasouliha, Behavior and Design of Cold-Formed Steel Bolted Connections Subjected to Combined Actions, *Journal of Structural Engineering*, 147 (2021) 04021013.
31. Pham, H.S.; Moen, C.D. (2015) *Stiffness and strength of single shear cold-formed steel screw-fastened connections*. Proceedings of the Annual Stability Conference, p. 1–12.
32. M. Hasanali, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, G.C. Clifton, J.B.P. Lim, More accurate design equations for cold- formed steel members subjected to combined axial compressive load and bending, *Thin-Walled Structures*, 185 (2023) 110588.
33. M. Hasanali, S.M. Mojtabaei, G.C. Clifton, I. Hajirasouliha, S. Torabian, J.B.P. Lim, Capacity and design of cold- formed steel warping-restrained beam-column elements, *Journal of Constructional Steel Research*, 190 (2022) 107139.
34. F. Öztürk, S.M. Mojtabaei, M. Şentürk, S. Pul, I. Hajirasouliha, Buckling behaviour of cold-formed steel sigma and lipped channel beam-column members, *Thin-Walled Structures*, 173 (2022) 108963.
35. M. Hasanali, S.M. Mojtabaei, J.B.P. Lim, G.C. Clifton, I. Hajirasouliha, Optimized interaction equations for more efficient design of CFS channels under combined compression and biaxial bending. *Journal of Structural Engineering* 150 (8), (2024) 04024088.

Мухаммед Косут

Механикалық, аэроғарыштық және азаматтық инженерия мектебі, Шеффилд университеті, Шеффилд, Ұлыбритания

Оптимизацияланған қималары бар CFS (қалыпта суықтай иілген болат) қиғаш байланыстарымен қабырғалардың сейсмикалық әсерін бағалау

Аңдатпа. Суықтай иілген болат (CFS) профильдері жеңіл болаттан жасалған қаңқалы

ғимараттарда кеңінен қолданылады, әсіресе аз және орта қабатты құрылыстарда, мұнда CFS қиғаш байланыстары бар рамалар көлденең жүктемелерге қарсы негізгі жүйелер болып табылады. Бұл зерттеу CFS элементтері енгізілген қиғаш байланыстары бар қабырғалардың сейсмикалық жұмысын зерттеуге бағытталған, әсіресе тіреуіш элементтерді тиімді түрде баған-сүргіш ретінде жұмыс істету үшін оңтайландыруға баса назар аударылады. Саудада бар профильдер негізінде алынған және нақтыланған типтік қима таңдалып, салалық стандарттар мен практикалық шектеулерді сақтай отырып, көтергіштік қабілетті барынша арттыру көзделген. Қиғаш байланыстары бар екі рамалық жүйе үшін соңғы элементтер әдісі (СЭӘ) бойынша модельдер әзірленді: бір рамда коммерциялық қолжетімді CFS қималары қолданылса, екіншісінде сейсмикалық тұрақтылықты арттыруға бағытталған оңтайландырылған қималар пайдаланылды. Дәстүрлі жобаларда ауырлық күштері ескерілгенімен, көбінесе Р-Δ әсерлері назардан тыс қалады; бұл зерттеуде бұл шектеу әртүрлі осьтік қысу деңгейлерін қолданып, Р-Δ әсерінің екі модельге ықпалын бағалау арқылы шешілген. Құрылымдық жұмыс қабырға ығысу шегіне сәйкестігіне және хорда тіреуіштеріндегі Р-Δ әсерінен болатын мерзімінен бұрынғы істен шығуды болдырмауға негізделіп бағаланды. Нәтижелер CFS құрылымдарының сейсмикалық жобалауын жетілдіруге құнды ұсыныстар береді және пластикалылығын, сенімділігін және сейсмикалық жүктемелер кезіндегі құрылымдық тұтастығын арттыратын жүйелі оңтайландыру стратегиясын ұсынады.

Түйін сөздер: суықтай иілген болат; қиғаш байланысы бар қабырғалық панельдер; оңтайландыру; ауырлық жүктемесі; сейсмикалық тұрақтылық.

Мухаммед Косут

Школа машиностроения, аэрокосмической и гражданской инженерии, Университет Шеффилд, Шеффилд, Великобритания

Оценка сейсмической реакции стен с раскосами из холодногнутых профилей с оптимизированными сечениями

Аннотация. Холодногнутые стальные (CFS) профили широко применяются в каркасных зданиях из легкой стали, особенно в мало- и среднеэтажном строительстве, где рамы с раскосами из CFS служат основными системами восприятия горизонтальных нагрузок. В данном исследовании рассматривается сейсмическая работа стен с раскосами из CFS, с особым вниманием к оптимизации стоечных элементов для их эффективной работы в качестве балок-колонн. В качестве исходного выбран и уточнен типичный поперечный профиль, основанный на коммерчески доступных сечениях, с целью максимизации несущей способности при соблюдении отраслевых стандартов и практических ограничений. Для двух рамных систем с раскосами разработаны модели методом конечных элементов (МКЭ), где выбранные сечения используются как для стоек, так и для хорд: одна рама использует коммерчески доступные профили CFS, а другая — оптимизированные сечения, ориентированные на повышение сейсмической устойчивости. В то время как традиционные конструкции учитывают действие вертикальных нагрузок, они часто игнорируют эффекты Р-Δ; в данной работе эта проблема решается путём приложения различных уровней осевого сжатия для оценки влияния эффектов Р-Δ на обе

разработанные модели. Несущая способность конструкций оценивается по соответствию критериям предельного дрейфа и предотвращению преждевременного разрушения, вызванного эффектами Р-Δ в стоечных элементах хорд. Результаты дают ценные рекомендации по совершенствованию сейсмостойкого проектирования CFS-структур, предлагая систематическую стратегию оптимизации, улучшающую пластичность, надёжность и конструктивную целостность при сейсмических воздействиях.

Ключевые слова: холодногнутая сталь; стеновые панели с раскосами; оптимизация; вертикальная нагрузка; сейсмическая устойчивость.

References

1. M. Hasanali, K. Roy, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, GC Clifton, JBP Lim A critical review of cold-formed steel seismic resistant systems: Recent developments, challenges and future directions. *Thin-Walled Structures* 180, (2022) 109953.
2. D.T. Phan, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, J. Ye, J.B.P Lim. Coupled Element and Structural Level Optimisation Framework for Cold-Formed Steel Frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 49 (2019) 69-83.
3. Papargyriou, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, J. Becque, K. Pilakoutas, Cold-formed steel beam-to- column bolted connections for seismic applications, *Thin-Walled Structures*, 172 (2022) 108876.
4. J. Ye, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, K. Pilakoutas, Efficient design of cold-formed steel bolted-moment connections for earthquake resistant frames, *Thin-Walled Structures*, 59 (2019) 49-61.
5. J. Ye, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha. Seismic performance of cold-formed steel bolted moment connections with bolting friction-slip mechanism, *Journal of Constructional Steel Research*, 27 (2019) 86- 100.
6. S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, J. Ye, Optimisation of cold-formed steel beams for best seismic performance in bolted moment connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 181 (2021) 106621.
7. S.M. Mojtabaei, M.Z. Kabir, I. Hajirasouliha, M. Kargar, Analytical and experimental study on the seismic performance of cold-formed steel frames. *Journal of Constructional Steel Research* 143, (2018) 18-31.
8. F. Yilmaz, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, J. Becque, Behaviour and performance of OSB-sheathed cold- formed steel stud wall panels under combined vertical and seismic loading, *Thin-Walled Structures*, 183 (2023) 110419.
9. F. Yilmaz, J. Becque, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, Capacity and Behavior of Sheathed Cold-Formed Steel Stud Walls under Outward Flexural Loading. *Journal of Structural Engineering* 151 (1), (2025) 04024192.
10. F. Yilmaz, J. Becque, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, Experimental investigation of the behaviour and capacity of sheathed cold-formed steel stud walls under inward flexural loading. *Thin-Walled Structures* 192, (2024) 111048.
11. Al-Kharat, M.; Rogers, C.A. (2007) Inelastic performance of cold-formed steel strap braced walls. *Journal of Constructional Steel Research* 63, 4, p. 460–474.
12. Riahi, H.T. et al. (2020) Seismic collapse assessment of K-shaped bracings in cold-formed steel frames. *Structures* 27, p. 1803–1817.

13. Zeynalian, M.; Ronagh, H. (2013) Experimental study on seismic performance of strap-braced cold-formed steel shear walls. *Advances in Structural Engineering* 16, 2, p. 245–257.
14. Gad, E. et al. (1999) Lateral performance of cold-formed steel-framed domestic structures. *Engineering Structures* 21, 1, p. 83–95.
15. Rad, P.L. et al. (2024) Experimental investigation on seismic performance of cold-formed steel strap-braced stud walls under lateral cyclic and vertical loading. *Thin-Walled Structures* 194, p. 111312.
16. J. Ye, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha. Local-flexural interactive buckling of standard and optimised cold- formed steel columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 144 (2018) 106-118.
17. J. Ye, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, Paul Shepherd, Kypros Pilakoutas, Strength and deflection behaviour of cold-formed steel back-to-back channels. *Engineering Structures* 177 (2018) 641-654.
18. J. Ye, J. Becque, I. Hajirasouliha, S.M. Mojtabaei, J.B.P. Lim. Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending, *Engineering Structures*, 161 (2018) 55-67.
19. Mojtabaei, S.M. et al. (2021) Structural size optimization of single and built-up cold-formed steel beam-column members. *Journal of Structural Engineering* 147, 4, p. 04021030.
20. S.M. Mojtabaei, J. Ye, I. Hajirasouliha. Development of optimum cold-formed steel beams for serviceability and ultimate limit states using Big Bang-Big Crunch optimisation, *Engineering Structures*, 195 (2019) 172-181.
21. S.M. Mojtabaei, R. Khandan, I. Hajirasouliha, Predicting restraining effects in CFS channels: A machine learning approach, *Steel and Composite Structures, An International Journal* 51 (4), 441-456.
22. L. Simwanda, P. Gatheeshgar, F.M. Ilunga, B.D. Ikotun, S.M. Mojtabaei, Explainable machine learning models for predicting the ultimate bending capacity of slotted perforated cold-formed steel beams under distortional buckling, *Thin-Walled Structures* 205, (2024) 112587
23. S.M. Mojtabaei, J. Becque, I. Hajirasouliha, R. Khandan, Predicting the buckling behaviour of thin-walled structural elements using machine learning methods, *Thin-Walled Structures*, 184 (2023) 110518.
24. CEN (European Committee for Standardization) (2005) Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium.
25. CEN (European Committee for Standardization) (2005) Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels, Belgium.
26. Dassault Systèmes Simulia (2014) Abaqus 6.14 CAE User Guide.
27. D.T. Phan, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, T. L. Lau, J.B.P. Lim. Design and optimisation of cold-formed steel sections in bolted moment connections considering bimoment, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 146 (2020) 04020153.
28. S.M. Mojtabaei, J. Becque, I. Hajirasouliha. Local buckling in cold-formed steel moment resisting bolted connections: behaviour, capacity and design, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 146 (2020) 04020167
29. H. Parastesh, S.M. Mojtabaei, H. Taji, I. Hajirasouliha, A. Bagheri Sabbagh, Constrained optimization of anti-symmetric cold-formed steel beam-column sections, *Engineering*

- Structures, 228 (2021) 111452.
30. S.M. Mojtabaei, J. Becque, I. Hajirasouliha, Behavior and Design of Cold-Formed Steel Bolted Connections Subjected to Combined Actions, *Journal of Structural Engineering*, 147 (2021) 04021013.
31. Pham, H.S.; Moen, C.D. (2015) *Stiffness and strength of single shear cold-formed steel screw-fastened connections*. Proceedings of the Annual Stability Conference, p. 1–12.
32. M. Hasanali, S.M. Mojtabaei, I. Hajirasouliha, G.C. Clifton, J.B.P. Lim, More accurate design equations for cold- formed steel members subjected to combined axial compressive load and bending, *Thin-Walled Structures*, 185 (2023) 110588.
33. M. Hasanali, S.M. Mojtabaei, G.C. Clifton, I. Hajirasouliha, S. Torabian, J.B.P. Lim, Capacity and design of cold- formed steel warping-restrained beam-column elements, *Journal of Constructional Steel Research*, 190 (2022) 107139.
34. F. Öztürk, S.M. Mojtabaei, M. Şentürk, S. Pul, I. Hajirasouliha, Buckling behaviour of cold-formed steel sigma and lipped channel beam–column members, *Thin-Walled Structures*, 173 (2022) 108963.
35. M. Hasanali, S.M. Mojtabaei, J.B.P. Lim, G.C. Clifton, I. Hajirasouliha, Optimized interaction equations for more efficient design of CFS channels under combined compression and biaxial bending. *Journal of Structural Engineering* 150 (8), (2024) 04024088.

Information about the authors

Muhammed Cosut -doctoral student of Sheffield university

Мухаммед Кошут - докторант (аспирант) Университета Шеффилда

Мухаммед Кошут -Шеффилд университетінің докторанты



Copyright: © 2025 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/>).



МРНТИ 67.09.33

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-23-40>

Применение легкого фибробетона для изготовления шахтных затяжек

Ю.В.Пухаренко* , Д.А.Пантелеев , М.И.Жаворонков 

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E mail: tmm@spbgasu.ru

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения фиброкерамзитобетона в качестве материала для изготовления шахтных затяжек. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения прочности, трещиностойкости и долговечности крепей в подземных горных выработках. Целью исследования является разработка облегчённого бетона на пористом заполнителе с дисперсным армированием, обладающего оптимальными физико-механическими характеристиками для работы в шахтных условиях. В работе приведён сравнительный анализ традиционных и легких бетонных смесей, обоснован выбор керамзита в качестве заполнителя и фиброволокон для повышения прочности на растяжение при изгибе. Методология включает лабораторные испытания на прочность, плотность и водопоглощение различных составов. Основные результаты показали, что введение фибры позволяет значительно повысить трещиностойкость и прочность затяжек без увеличения массы конструкции. Исследование подтвердило целесообразность применения фиброкерамзитобетона для обеспечения эффективной и экономичной крепи в шахтных условиях. Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения полученных составов в строительные процессы горнодобывающей промышленности с целью увеличения срока службы конструкций и повышения безопасности работ.

Ключевые слова: фибробетон, керамзитобетон, шахтные затяжки, легкий бетон, дисперсное армирование, трещиностойкость, подземные выработки.

Поступила 28.06.2025. Доработана 10.07.2025. Одобрена 09.09.2025. Доступна онлайн 30.09.2025

* автор для корреспонденции

Введение

Шахтная затяжка представляет собой элемент крепи горных выработок в виде прямоугольной железобетонной плиты длиной до 1000 мм, шириной до 250 мм и толщиной до 50 мм (рис. 1).

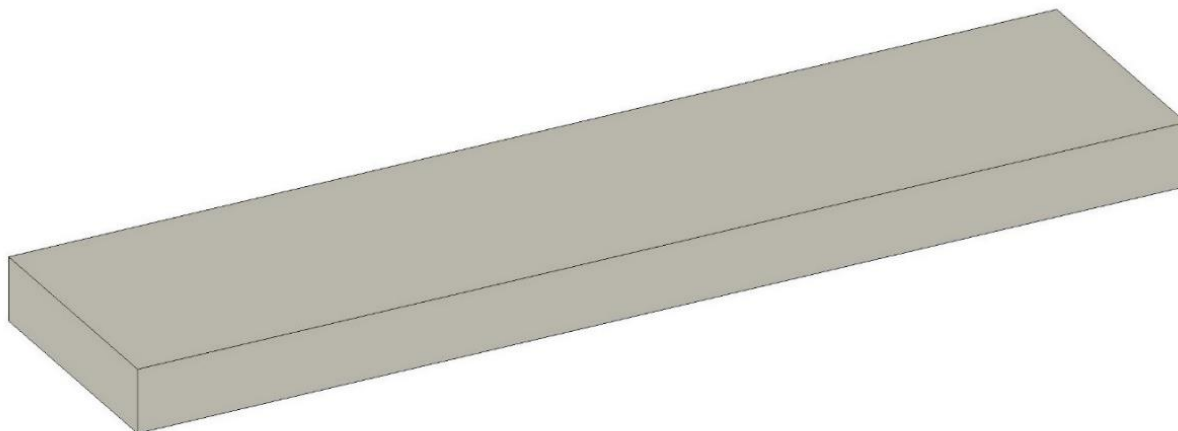


Рисунок 1. Шахтная затяжка

Несмотря на широкое применение, их использование сопряжено с рядом существенных недостатков, которые могут снижать эффективность и надежность горных работ. Одной из ключевых проблем является значительный вес конструкций, что усложняет транспортировку и монтаж затяжек, особенно в труднодоступных условиях подземных выработок. Кроме того, традиционные материалы, используемые для изготовления затяжек, часто характеризуются низкой трещиностойкостью и вязкостью разрушения, что увеличивает риск их повреждения [1, 2]. Для решения этих проблем современные исследования предлагают инновационные подходы, включая использование композиционных материалов, таких, как фибробетон, в том числе и легкий, например, фиброкерамзитобетон [3, 4].

Этот материал обладает уникальными свойствами, позволяющими существенно снизить вес конструкции за счет пористой структуры керамзита, одновременно увеличивая механическую прочность благодаря дисперсному армированию волокнами [5, 6]. Фиброкерамзитобетон также демонстрирует повышенную трещиностойкость и способность противостоять динамическим нагрузкам, что делает его перспективным решением для улучшения характеристик шахтных затяжек [7, 8].

В последние годы проведен значительный объем исследований и получены подробные сведения о трещиностойкости дисперсно-армированных бетонов, матрицей которых является тяжелый бетон [9, 10]. Гораздо меньше информации по данному вопросу поступает относительно фиброармированных легких бетонов [11].

Таким образом исследование свойств лёгких фибробетонов представляет собой актуальную научную и инженерную задачу, поскольку позволяет получить строительный материал, сочетающий в себе высокие прочностные характеристики, легкость и

устойчивость к внешним воздействиям. Это открывает возможности для его широкого применения в современном строительстве.

Методология

В работе применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» [12]; кварцевый песок с модулем крупности $M_k = 2,4$ по ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [13]; керамзитовый песок с насыпной плотностью 305 кг/м³ (марка по насыпной плотности М350) по ГОСТ 32496–2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия» [14]; пластификатор «СИНТЕФЛОУ» Мега 52 на основе поликарбоксилатного эфира в соответствии с ТУ 2216-008-78722668–2015 «Гиперпластификатор *Sinteflow*».

В качестве дисперсной арматуры в работе использовалась:

- Синтетическая макрофибра «*Concrix ES*» (рис. 2, а) по ТУ 2272-002-22885424–2013 «Полимерные волокна (фибры) "Конкриск" на основе для армирования различных поверхностей» длиной 50 мм, эквивалентным диаметром 0,5 мм, модулем упругости 11000 МПа.
- Стальная фрезерная фибра (рис. 2, б) длиной 36 мм, эквивалентным диаметром 0,6 мм, модулем упругости 210000 МПа.
- Стальная проволочная фибра (рис. 2, в) производства «Белорусского металлургического завода» по ТУ 14-1-5564–2008 «Фибра из стальной проволоки для дисперсного армирования бетона. Технические условия» длиной 22 мм, диаметром 0,3 мм, модулем упругости 210000 МПа.



Рисунок 2. Синтетическая макрофибра «*Concrix ES*» (а), стальная фрезерная фибра (б), стальная проволочная фибра (в)

Подбор состава керамзитобетонной матрицы осуществлялся с целью получения материала с оптимальным сочетанием прочностных и технологических характеристик, пригодного для применения в конструкциях с пониженной плотностью и повышенной трещиностойкостью.

При разработке состава учитывались следующие требования:

- осадка конуса – марка по подвижности П2.
- предел прочности при сжатии – не менее 25 МПа;

- средняя плотность – не выше 1700 кг/м³.

Для изготовления керамзитобетонных образцов использовалась легкобетонная смесь с соотношением портландцемента к кварцевому песку, равным 1:2. Для регулирования (уменьшения) средней плотности бетона, часть кварцевого песка заменялась керамзитовым. Водоцементное отношение подбиралось с учетом нормальной густоты портландцемента, водопотребности керамзитового и кварцевого песка, а также их фактического расхода. Составы смесей после корректировки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Составы керамзитобетонных смесей, кг/м³

Сырьевые материалы	Номер состава				
	1	2	3	4	5
Портландцемент	406	437	454	487	504
Кварцевый песок	812	842	908	975	1008
Керамзитовый песок	162	155	148	139	131
Вода	187	201	209	223	231
Пластифицирующая добавка	2,03	2,19	2,27	2,44	2,52

Процесс приготовления керамзитобетонных и фиброкерамзитобетонных смесей осуществлялся в лабораторном бетоносмесителе принудительного действия. Сначала загружались все сухие компоненты и перемешивались в течение 60 с. Далее добавлялась вода, содержащая дозированную часть суперпластификатора, и перемешивание продолжалось ещё на протяжении 120 с. Фибра в количестве 0,5 об. % и 1,0 об. % вводилась на последнем этапе, после чего процесс перемешивания продолжался до обеспечения равномерного распределения волокон по всему объему керамзитобетонной смеси. Для контроля прочности при сжатии изготавливались образцы-кубы размером 10х10х10 см, для контроля прочности на растяжение при изгибе и характеристик трещиностойкости – образцы-балки размером 7х7х28 см, для контроля ударной вязкости – образцы размером 2х10х40 см.

Процесс уплотнения смесей осуществлялся при помощи стандартной лабораторной виброплощадки. После чего свежееотформованные образцы помещались в камеру нормального твердения, в которой выдерживались 28 суток до начала испытаний. Определение силовых и энергетических характеристик трещиностойкости керамзитобетона и фиброкерамзитобетона производились в соответствии с требованиями ГОСТ 29167–2021 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» [15]. Подробное описание обработки полученных результатов опубликовано в предыдущих работах [16, 17]. Испытание по определению ударной вязкости проводилось на устройстве, позволяющем грузам (ударникам) известной массы (m) свободно падать с определенной высоты (h). В ходе испытания фиксировалось количество ударов (n), необходимое для появления первой трещины и для полного разрушения образца.

Коэффициент ударной вязкости (μ) вычисляют по формуле (1):

$$\mu = E_{\text{разр}}/E_{\text{тр}} \quad (1)$$

где, $E_{тр}$ – энергия, необходимая для появления первой трещины; $E_{разр}$ – энергия, необходимая для полного разрушения.

Энергию (E) вычисляют по формуле (2):

$$E = n \cdot (m \cdot g \cdot h) \quad (2)$$

где, m – масса ударника, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – высота падения груза (ударника), м; n – количество ударов.

Ударную вязкость ($R_{уд}$) вычисляют по формуле (3):

$$R_{уд} = \frac{E_{разр}}{b \times t} \quad (3)$$

где, b – ширина образца, измеренная вблизи линии излома, м; t – толщина образца, измеренная по линии излома, м.

Результаты и Обсуждение

В возрасте 28 суток образцы высушивались до постоянной массы, взвешивались и подвергались испытанию по определению предела прочности при сжатии. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Полученные результаты средней плотности и предела прочности при сжатии керамзитобетон

Характеристики керамзитобетона	Номер состава				
	1	2	3	4	5
Средняя плотность, кг/м ³	1462	1527	1614	1722	1768
Марка по средней плотности	D1500	D1600	D1700	D1800	D1800
Предел прочности при сжатии, МПа	18,2	20,5	26,2	29,1	32,8

По результатам испытаний оптимальным признан состав №3, с показателями предела прочности при сжатии 26,2 МПа и средней плотности 1614 кг/м³. Данный состав использовался как базовый для фиброкерамзитобетон.

На рисунке 3 представлены диаграммы деформирования керамзитобетонных и фиброкерамзитобетонных образцов, полученных в ходе проведения эксперимента.

Предел прочности на растяжение при изгибе неармированных керамзитобетонных образцов составил 3,6 МПа. При армировании стальной проволоочной фиброй предел прочности на растяжение при изгибе составил: при 0,5 об. % – 7,13 МПа (+98 % по сравнению с неармированным образцом); 1,0 об. % – 9,98 МПа (+177 % по сравнению с неармированным образцом). При армировании стальной фрезерной фиброй предел прочности на растяжение при изгибе составил: 0,5 об. % – 6,8 МПа (+89 % по сравнению с неармированным образцом); 1,0 об. % – 10,07 МПа (+180 % по сравнению с неармированным образцом).

При армировании синтетическими макроволокнами в количестве 0,5 об. % предел прочности на растяжение при изгибе составил 5,19 МПа, что превышает прочность неармированного керамзитобетона на 44 %. Увеличение содержания волокон до 1,0 об. %, привело к росту прочности до 8,06 МПа (+124 % по сравнению с неармированным образцом).

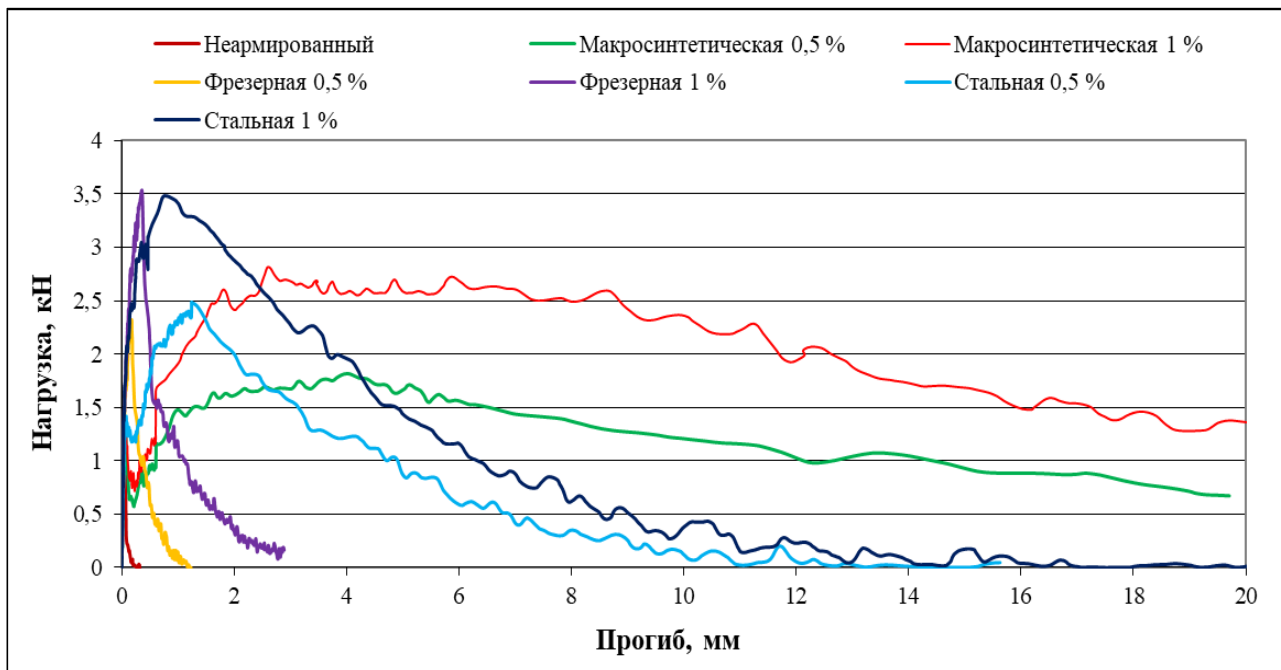


Рисунок 3. Диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов

Все три типа фибры обеспечивают повышение прочности с увеличением объёмного содержания армирующих волокон от 0 до 1,0 %. При этом стальная проволочная и фрезерная фибра обеспечивает наивысшие численные значения прочности при изгибе на всех стадиях армирования. Это объясняется высоким модулем упругости стали, который значительно превышает модуль упругости керамзитобетонной матрицы.

Синтетическая макрофибра демонстрирует менее выраженный рост прочности, однако обеспечивает лучшее распределение напряжений при больших прогибах, что особенно ценно при циклических и ударных нагрузках.

При сравнении поведения образцов, армированных стальной фрезерной фиброй, можно отметить, что увеличение содержания фибры с 0,5 % до 1,0 % приводит к значительному увеличению пикового значения нагрузки – с 2,4 кН до 3,6 кН. Однако при этом форма диаграммы не претерпевает качественных изменений: в обоих случаях после достижения максимума наблюдается резкое снижение деформационной кривой, что свидетельствует о хрупком разрушении. Это указывает на то, что даже при удвоении количества фрезерной фибры её влияние ограничивается увеличением начального сопротивления, но не способствует существенному повышению вязкости разрушения.

Таким образом, её работа ограничена до момента начала раскрытия трещины, после чего волокна теряют способность эффективно перераспределять напряжения.

В то же время образцы, армированные стальной проволоочной фиброй, демонстрируют иное поведение. При содержании 0,5 % максимальная нагрузка составляет около 2,6 кН – выше, чем у фрезерной фибры того же содержания. Более того, кривая имеет плавный наклон после точки максимума, указывающий на наличие остаточной прочности и устойчивого сопротивления разрушению.

Полученные после обработки диаграмм деформирования силовые и энергетические характеристики трещиностойкости керамзитобетона и фиброкерамзитобетона, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости

Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости фиброкерамзитобетона	Вид и содержание фибры						
	неармированный бетон	синтетическая макрофибра (0,5 об. %)	синтетическая макрофибра (1,0 об. %)	стальная проволоочная (0,5 об. %)	стальная проволоочная (1,0 об. %)	стальная фрезерная (0,5 об. %)	стальная фрезерная (1,0 об. %)
Средняя плотность, кг/м^3	1582	1612	1631	1626	1689	1636	1689
Удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, $G_i, \text{Дж/м}^2$	12,2	16,6	17,8	23,6	23,2	25,3	25,3
Удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, $G_f, \text{Дж/м}^2$	20,9	7636	15606	3379	6169	252	899
Критический коэффициент интенсивности напряжений, $K_c, \text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$	0,48	0,58	0,60	0,65	0,69	0,70	0,74
J-интеграл, Дж/м^2	7,63	11,20	12,77	18,29	22,78	18,90	20,98
Модуль упругости, $E, \text{МПа}$	20131	20336	20529	22958	24929	23108	24852
Предел прочности на растяжение при изгибе, $R_{изг}, \text{МПа}$	3,60	5,19	8,06	7,13	9,98	6,80	10,07

При увеличении содержания проволоочной фибры до 1,0 % пиковая нагрузка возрастает до 3,5 кН, то есть не столь резко, как у фрезерной фибры, однако при этом характер разрушения становится ещё более вязким. Кривая демонстрирует длительное удержание нагрузки даже при значительном прогибе, достигающем 10 мм. Это говорит о высокой способности проволоочной фибры сопротивляться раскрытию трещин и поддерживать работоспособность конструкции на стадии постпикового разрушения.

На рисунке 4 представлена диаграмма деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных стальной фиброй двух типов – проволоочной и фрезерной.

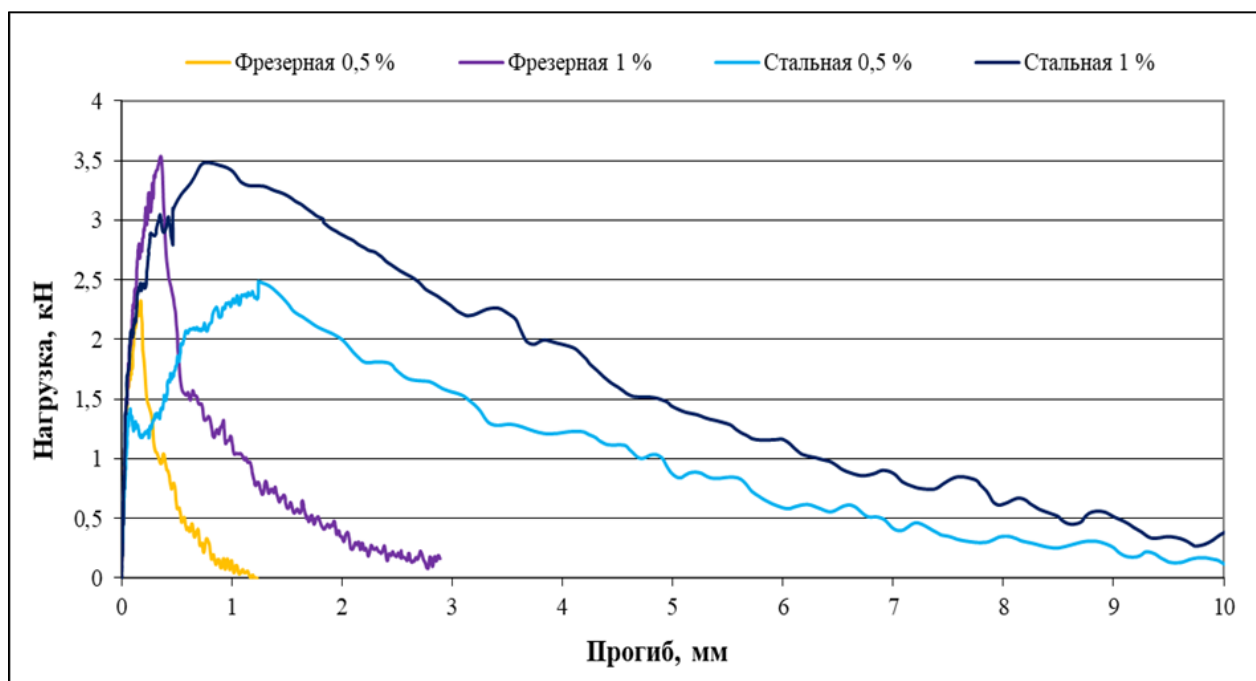


Рисунок 4. Диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных стальной фрезерной и проволоочной фиброй

Сравнивая оба типа фибры при одном и том же содержании, видно, что фрезерная обеспечивает лишь рост максимальной прочности, но не предотвращает хрупкое разрушение, тогда как проволоочная фибра формирует вязкий и устойчивый процесс разрушения с длительным удержанием остаточной несущей способности. Это делает её более предпочтительной для конструкций, подверженных циклическим или ударным нагрузкам, где важна не только прочность, но и способность материала сохранять целостность после начала трещинообразования.

Таким образом, увеличение процентного содержания фибры оказывает положительное влияние на прочность, но степень этого влияния зависит от типа волокон. На основании представленных диаграмм оптимальным выбором для армирования лёгкого фибробетона с точки зрения комплексных характеристик – прочности и сопротивления разрушению – является применение 1,0 % стальной проволоочной фибры, которая обеспечивает надёжную работу конструкции даже в условиях раскрытия и развития трещин.

На рисунке 5 представлена диаграмма деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных стальной проволочной и синтетической макрофиброй. Армирование керамзитобетона синтетической макрофиброй в количестве 0,5 об. %, обеспечивает максимальную нагрузку в 1,8 кН с последующим относительно плавным снижением. Прогиб достигает 20 мм, и кривая сохраняет устойчивую форму с невысокой, но стабильной остаточной несущей способностью. Поведение материала можно охарактеризовать как вязкое, без признаков хрупкого разрушения, однако максимальная прочность сравнительно невысока

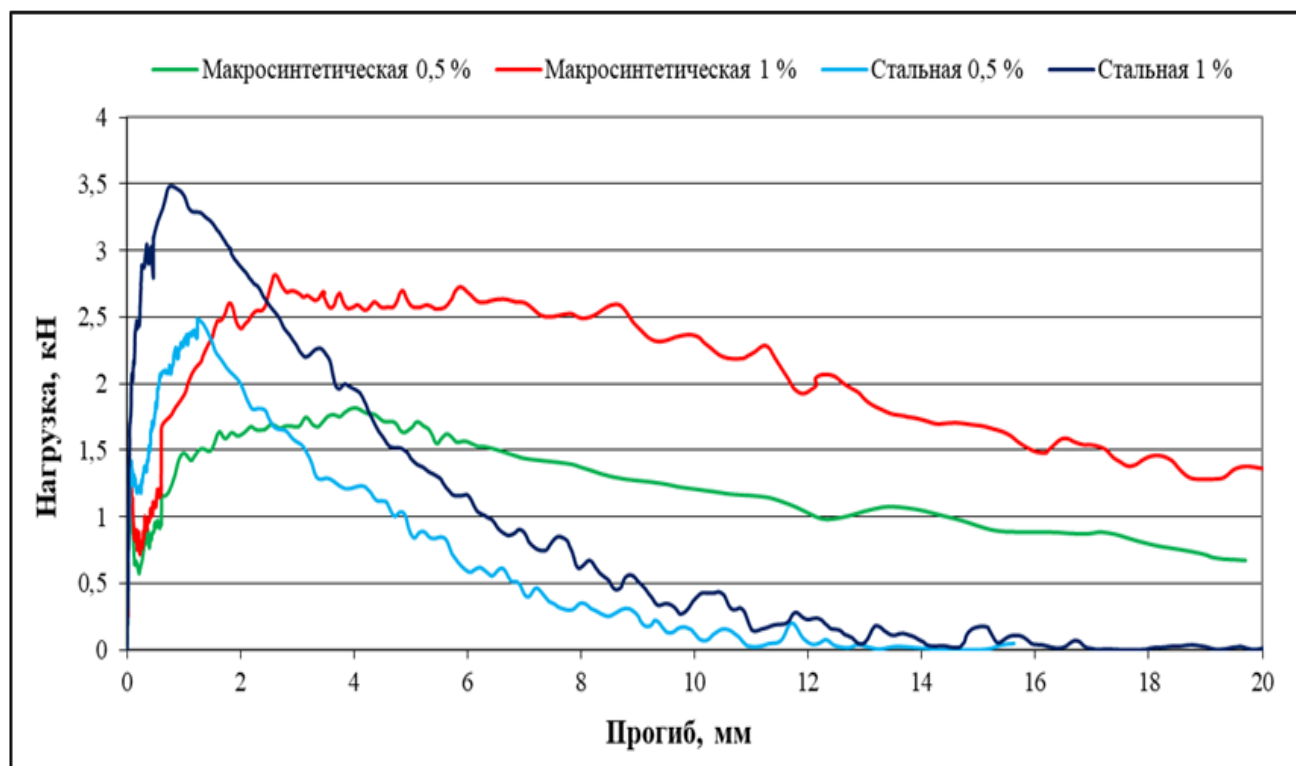


Рисунок 5. Диаграммы деформирования фиброкерамзитобетонных образцов, армированных стальной проволочной и синтетической макрофиброй

При увеличении содержания синтетической макрофибры до 1,0 об. % наблюдается значительное повышение прочности: максимальная нагрузка достигает 2,7 кН. Главное отличие – появление устойчивой горизонтальной части на кривой после достижения пика, что указывает на активную работу волокон в постпиковой стадии. Прогиб также превышает 20 мм, а линия демонстрирует умеренное снижение несущей способности с увеличением деформаций. Таким образом, повышение содержания синтетических макроволокон, улучшает как прочность, так и способность материала сохранять целостность после начала трещинообразования.

Для сравнения: стальная проволочная фибра при содержании равном 0,5 об. % демонстрирует пиковую нагрузку 2,6 кН, однако сразу после пика происходит быстрое снижение сопротивления. Несмотря на это, остаточная прочность сохраняется на уровне, близком к бетону на макросинтетике с 0,5 об. %, при меньшем прогибе – около 10 мм. При

увеличении содержания проволочной фибры до 1,0 % пиковая нагрузка возрастает до 3,5 кН. Однако при прогибе равном 6–8 мм наблюдается существенное снижение несущей способности. Максимальный прогиб – менее 10 мм. Таким образом, проволочная фибра обеспечивает высокую начальную прочность, но характеризуется ограниченной вязкостью по сравнению с синтетической макрофиброй.

Сравнивая оба вида армирования, можно сделать вывод, что проволочная фибра эффективнее в увеличении прочности на ранних стадиях нагружения и трещиностойкости (критический коэффициент интенсивности напряжений керамзитобетона, армированного стальной фиброй, больше, чем фиброкерамзитобетона с использованием синтетической макрофибры), особенно при содержании 1,0 об. %, но после возникновения магистральной трещины она быстро теряет несущую способность. В то же время синтетическая макрофибра обеспечивает более стабильную и длительную работу при больших прогибах. Это делает её более подходящей для конструкций, где важна способность материала сопротивляться деформациям и сохранять целостность после появления трещин.

Анализ графиков, иллюстрирующих зависимость нагрузки от прогиба при изгибе образцов лёгкого фибробетона, позволяет сделать обоснованные выводы о характере работы и эффективности различных видов дисперсного армирования:

- Стальная проволочная фибра обеспечивает наиболее высокую прочность на пике нагружения, что говорит о высокой несущей способности материала. Однако характер разрушения носит относительно хрупкий характер (в сравнении с керамзитобетоном, армированным синтетической макрофиброй) – после достижения максимума диаграмма резко снижается и предельный прогиб составляет 10 мм. Это указывает на то, что проволочная фибра лучше работает в конструкциях, где важна высокая начальная прочность, но не требуется значительная деформативность после трещинообразования.
- Стальная фрезерная фибра также показывает высокий уровень пиковых нагрузок, сравнимый или даже превышающий проволочную фибру. Однако её характер разрушения ещё более хрупкий – кривая резко обрывается после пика, что свидетельствует о низкой вязкости разрушения и отсутствии остаточной несущей способности. Следовательно, фрезерная фибра эффективна только на стадии предварительного разрушения, но не обеспечивает работу материала после раскрытия трещин.
- Синтетическая макрофибра, напротив, проявляет наилучшую вязкость разрушения и устойчивость в постпиковой стадии. Предельный прогиб достигает 20 мм. Это делает её оптимальной для конструкций, подверженных длительному воздействию нагрузок, ударов или циклических деформаций, где важно не столько предотвратить трещинообразование, сколько обеспечить безопасное и контролируемое разрушение конструкции.

Таким образом, выбор оптимального типа фибры зависит от условий эксплуатации конструкции: при необходимости обеспечения высокой начальной прочности целесообразно использовать высокомодульную стальную фибру, а при необходимости повышенной деформативности и вязкости разрушения – синтетическую макрофибру, обеспечивающую надёжную работу композита в постпиковой стадии.

В ходе испытания по определению ударной вязкости фиксировалось количество ударов (n), необходимое для появления первой трещины ($E_{тр}$) (рис. 6, а) и для полного разрушения образца ($E_{разр}$) (рис. 6, б).

Ударная вязкость характеризует способность материала поглощать энергию при динамическом нагружении и является важным параметром при оценке трещиностойкости и вязкости разрушения бетона.

Согласно полученным результатам, ударная вязкость неармированного керамзитобетона составляет 1051 Дж/м^2 , что свидетельствует о низкой способности материала к поглощению энергии при динамическом или ударном нагружении.

Синтетическая макрофибра демонстрирует наибольшую эффективность в аспекте роста ударной вязкости. Характер роста показателя почти линейный. Это указывает на высокую способность синтетических макроволокон поглощать энергию при раскрытии и развитии трещин, благодаря их значительной деформативности и хорошему сцеплению с цементной матрицей.

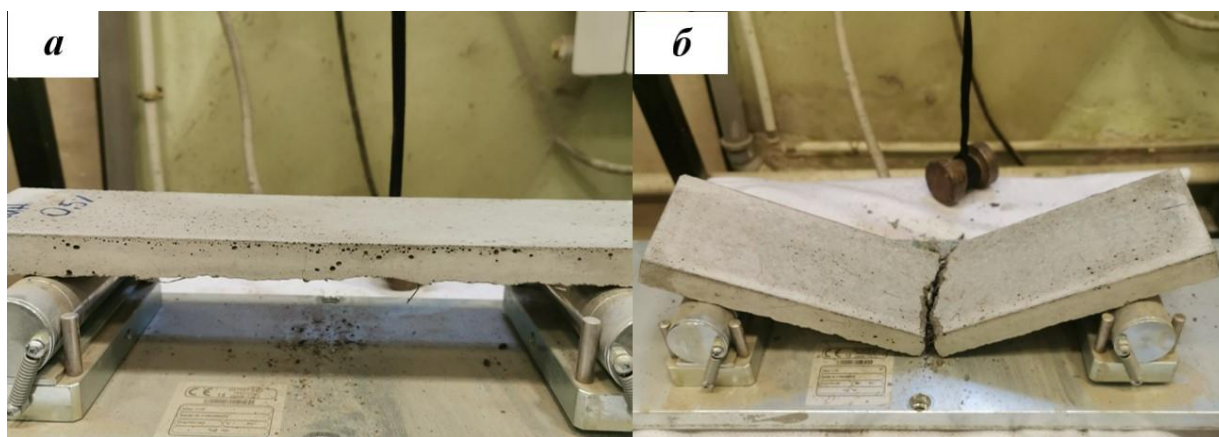


Рисунок 6. Процесс испытания ударной вязкости: а – появление первой трещины на испытуемом образце; б – полное разрушение испытуемого образца

Результаты, полученные в ходе проведения эксперимента, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты испытания ударной вязкости

Вид и содержание фибры, %	Ударная энергия (первая трещина), $E_{тр}$, Дж	Ударная энергия (разрушение образца), $E_{разр}$, Дж	Ударная вязкость, $R_{уд}$, Дж/м ²	Коэффициент ударной вязкости, μ
неармированный керамзитобетон	0,74	1,48	1057	2
стальная проволочная (0,5 %)	14,72	29,44	21029	2
стальная проволочная (1,0 %)	19,62	41,69	29779	2,125
стальная фрезерная (0,5 %)	5,89	7,36	5257	1,25

стальная фрезерная (1,0 %)	8,83	11,04	7886	1,25
синтетическая макрофибра (0,5 %)	4,91	49,10	35071	10
синтетическая макрофибра (1,0 %)	9,81	83,39	59564	8,5

Проволочная стальная фибра обеспечивает умеренное повышение ударной вязкости. Несмотря на меньшие значения по сравнению с синтетической макрофиброй, данный тип армирования способствует повышению прочности при изгибе в большей мере, а также к сопротивлению разрушению на упругой стадии (трещиностойкость).

Фрезерная стальная фибра показывает наименьший прирост ударной вязкости. Это может быть обусловлено укороченной длиной волокон и их ограниченной способностью к анкерованию в бетонной матрице при динамическом воздействии. Синтетическая макрофибра, несмотря на низкий модуль упругости, обладает значительным запасом энергии деформации и хорошо работает в условиях раскрытия трещин за счёт высокой растяжимости. Это позволяет ей эффективно тормозить процесс разрушения при динамических воздействиях, обеспечивая значительный прирост ударной вязкости. Проволочная стальная фибра демонстрирует сбалансированные свойства: умеренный уровень ударной вязкости сочетается с высокой несущей способностью и прочностью на растяжение при изгибе. Фрезерная фибра в силу своей структуры более эффективна в условиях статического нагружения, чем при ударных воздействиях.

Таким образом, наибольший эффект в плане повышения ударной вязкости лёгкого бетона достигается при использовании синтетической макрофибры в количестве 1,0 об. %, что делает её предпочтительной в конструкциях, эксплуатируемых в условиях динамического или ударного нагружения. Проволочная стальная фибра – оптимальный вариант, когда требуется сочетание трещиностойкости, вязкости разрушения и высокой несущей способности. Фрезерная фибра может использоваться в системах, где критична статическая прочность, однако её эффективность в ударных условиях ограничена.

Заключение

В результате проведенных исследований получены новые экспериментальные данные, доказывающие эффективность использования дисперсно-армированного керамзитобетона для изготовления шахтных затяжек.

Исследованы физико-механические характеристики дисперсно-армированного керамзитобетона с использованием различных видов волокон. Установлено, что: Стальная проволоочная фибра при объёмном содержании, равном 1,0 %, обеспечивает наивысшие значения как начальной прочности, так и некоторых деформативных и энергетических характеристик:

- максимальный прирост модуля упругости;
- высокая ударная энергия до образования первой трещины ($E_{тр} \approx 20$ Дж);
- значительные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины ($G_i \approx 23$ Дж/м²) и удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение ($G_f = 6200$ Дж/м²).

Это делает данный тип фибры оптимальным для конструкций, эксплуатируемых в условиях динамических, ударных и вибрационных нагрузок, где критична способность материала к сдерживанию и торможению развития трещин.

Стальная фрезерная фибра также демонстрирует высокую эффективность при содержании 1,0 %, уступая проволоочной лишь по показателям вязкости разрушения – удельным эффективным энергозатратам на статическое разрушение (G_f) и ударной вязкости ($R_{уд}$). Её применение целесообразно в конструкциях, где требуется высокая прочность, устойчивость к усадочным деформациям и надёжность при сохранении технологичности укладки бетонной смеси.

Синтетическая макрофибра, несмотря на низкий модуль упругости, способствует повышению вязкости разрушения, устойчивости материала к распространению трещин при больших деформациях и ударной вязкости. Такая фибра может эффективно использоваться в конструкциях, где основное требование – это равномерное распределение деформаций, безопасность разрушения и долговечность в агрессивных средах (например, в элементах, при необходимости защиты от коррозии или в условиях повышенной влажности).

Исходя из этого, выбор оптимального типа и содержания фибры должен осуществляться в зависимости от условий работы подземной конструкции в целом и конкретных требований к шахтным затяжкам.

Вклад авторов

Ю.В. Пухаренко — разработка концепции исследования, общее руководство работой.

Д.А. Пантелеев — проведение экспериментов, сбор и обработка исходных данных.

М.И. Жаворонков — анализ полученных данных, участие в написании и редактировании текста статьи.

Список литературы

1. Семенюк С.Д., Кетнер Э.А. Прочность и деформативность керамзитобетонов на основе сырья заводов Республики Беларусь // Проблемы современного бетона и железобетона. 2017. № 9. С. 414–435.
2. Семенюк С.Д., Ржевуцкая В.А. Влияние компонентов легкого бетона на прочностные и деформативные характеристики // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 4 (61). С. 102–109.
3. Раупов Ч.С. Керамзитобетон для транспортного строительства: монография / Ташкент: Tamaddun, 2020. – 356 с.
4. T.M. Ismael, S.D. Mohammed Structural performance of fiber-reinforced lightweight concrete slabs with expanded clay aggregate // Materialstoday: proceedings. Volume 42, Part 5, 2021, Pp. 2901–2908. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.746>
5. Zhiyi Tang, Xiongjun He, Yinda Fu, Haoyu Li, Weiwei Wu, Jianxin Lu, Chi Sun Poon Flexural bearing capacity of lightweight concrete beams reinforced by end-hooked steel fibers // Construction and Building Materials Volume 472, 18 April 2025, 140826. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140826>

6. Qiao Liao, Shen-Yi Lu, Jian-Xin Lu, Chi Sun Poon Improving mechanical and fracture properties of high-performance lightweight concrete by using steel fiber and sustainable high-strength core-shell lightweight aggregate // Construction and Building Materials Volume 459, 17 January 2025, 139697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139697>
7. Москалькова Ю.Г., Ржевуцкая В.А. Полипропиленовая фибра как фактор снижения полных усадочных деформаций керамзитобетона // Научный журнал строительства и архитектуры. 2024. № 1 (73). С. 11–23. DOI 10.36622/2541-7592.2024.73.1.001
8. Afshar Seydmoradi, Mohammad Hadi Tavana, Mohammad Reza Habibi Investigation on the response of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete slab under sequential impact loading // Engineering Failure Analysis Volume 161, July 2024, 108221. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108221>
9. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости // Вестник СибАДИ. 2022, Т. 19, № 5 (87). С. 752–761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>
10. Матус Е.П., Пичугин А.П. Трещиностойкость сталефибробетона с малым процентом армирования // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 11–12 (683–684). С. 85–90.
11. Jinwang Mao, Ninghui Liang, Xinrong Liu, Zuliang Zhong, Chuanhua Zhou Investigation on early-age cracking resistance of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete in restrained ring tests // Journal of Building Engineering Volume 70, 1 July 2023, 106155. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106155>
12. ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия». – М.: Стандартиформ, 2020. – 16 с.
13. ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». – М.: Стандартиформ, 2019. – 8 с.
14. ГОСТ 32496–2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия». – М.: Стандартиформ, 2019. – 12 с.
15. ГОСТ 29167–2021 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении». – М.: Стандартиформ, 2022. – 16 с.
16. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Развитие метода испытания трещиностойкости сталефибробетона // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 132–137.
17. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Развитие метода исследования поведения сталефибробетона под нагрузкой при изгибе // Экономика строительства. 2024. № 9. С. 168–171.

Ю.В. Пухаренко*, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков

Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті

Шахта тіректерін дайындауда жеңіл фибробетонды қолдану

Аңдатпа. Мақалада шахта тіректерін дайындау материалы ретінде фиброкерамзитобетонды қолдану мүмкіндігі қарастырылады. Тақырыптың өзектілігі жер астындағы тау-кен қазбаларындағы тіректердің беріктігін, жарықшаға төзімділігін және ұзақ мерзімділігін арттыру қажеттілігімен айқындалады. Зерттеудің мақсаты – дисперсті арматураланған кеуекті толтырғыш негізінде шахталық жағдайда жұмыс істеуге қолайлы оңтайлы физика-механикалық сипаттамалары бар жеңіл бетон әзірлеу. Жұмыста дәстүрлі және жеңіл бетон қоспаларының салыстырмалы талдауы жүргізіліп, толтырғыш ретінде керамзитті және иілу кезіндегі созылу беріктігін арттыру үшін фиброталшықтарды таңдаудың негіздемесі берілген. Әдістеме әртүрлі құрамдардың беріктігіне, тығыздығына және су сіңіргіштігіне жүргізілген зертханалық сынақтарды қамтиды. Негізгі нәтижелер фибра енгізу арқылы тіректердің жарықшаға төзімділігі мен беріктігін құрылым салмағын арттырмай едәуір жоғарылатуға болатынын көрсетті. Зерттеу нәтижелері шахталық жағдайларда тиімді және үнемді тіректерді қамтамасыз ету үшін фиброкерамзитобетонды қолданудың орынды екенін растады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы – алынған құрамдарды тау-кен өнеркәсібіндегі құрылыс процесіне енгізу арқылы құрылымдардың қызмет ету мерзімін ұзарту және жұмыстардың қауіпсіздігін арттыру мүмкіндігі болып табылады.

Түйін сөздер: фибробетон, керамзитобетон, шахта тіректері, жеңіл бетон, дисперсті арматуралау, жарықшаға төзімділік, жер асты қазбалары

Yu.V. Pukharenskiy*, D.A. Panteleev, M.I. Zhavoronkov

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Application of Lightweight Fiber-Reinforced Concrete for Shaft Lagging

Abstract. The article examines the possibility of using fiber-reinforced expanded clay concrete as a material for shaft lagging. The relevance of the topic is determined by the need to increase the strength, crack resistance, and durability of supports in underground mine workings. The aim of the study is to develop lightweight concrete on a porous aggregate with dispersed reinforcement, possessing optimal physical and mechanical properties for operation under mining conditions. The paper presents a comparative analysis of traditional and lightweight concrete mixes, justifies the choice of expanded clay as an aggregate, and fiber reinforcement for improving tensile strength in bending. The methodology includes laboratory tests of various compositions for strength, density, and water absorption. The main results showed that the introduction of fibers significantly improves crack resistance and strength of lagging without increasing the weight of the structure. The study confirmed the feasibility of using fiber-reinforced expanded clay concrete to ensure efficient and cost-effective support in mining conditions. The practical significance of the work lies in the possibility of introducing the developed compositions into the construction processes of the mining industry in order to extend the service life of structures and improve work safety.

Keywords: fiber concrete, expanded clay concrete, shaft lagging, lightweight concrete, dispersed reinforcement, crack resistance, underground workings

References

1. Semenyuk S.D., Ketner E.A. Prochnost' i deformativnost' keramzitobetonov na osnove syr'ya zavodov Respubliki Belarus' // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona. 2017. № 9. Pp. 414–435
2. Semenyuk S.D., Rzhhevutskaya V.A. Vliyanie komponentov legkogo betona na prochnostnye i deformativnye kharakteristiki // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. 2018. № 4 (61). Pp. 102–109
3. Raurov Ch.S. Keramzitobeton dlya transportnogo stroitel'stva: monografiya / Tashkent: Tamaddun, 2020. – 356 p.
4. T.M. Ismael, S.D. Mohammed Structural performance of fiber-reinforced lightweight concrete slabs with expanded clay aggregate // Materials Today: Proceedings. Volume 42, Part 5, 2021, Pp. 2901–2908. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.746>
5. Zhiyi Tang, Xiongjun He, Yinda Fu, Haoyu Li, Weiwei Wu, Jianxin Lu, Chi Sun Poon Flexural bearing capacity of lightweight concrete beams reinforced by end-hooked steel fibers // Construction and Building Materials Volume 472, 18 April 2025, 140826. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140826>
6. Qiao Liao, Shen-Yi Lu, Jian-Xin Lu, Chi Sun Poon Improving mechanical and fracture properties of high-performance lightweight concrete by using steel fiber and sustainable high-strength core-shell lightweight aggregate // Construction and Building Materials Volume 459, 17 January 2025, 139697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139697>
7. Moskal'kova Yu.G., Rzhhevutskaya V.A. Polipropilenovaya fibra kak faktor snizheniya polnykh usadochnykh deformatsiy keramzitobetona // Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury. 2024. No. 1 (73). Pp. 11–23. DOI 10.36622/2541-7592.2024.73.1.001
8. Afshar Seydmoradi, Mohammad Hadi Tavana, Mohammad Reza Habibi Investigation on the response of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete slab under sequential impact loading // Engineering Failure Analysis Volume 161, July 2024, 108221. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108221>
9. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Otsenka effektivnosti dispersnogo armirovaniya betonov po pokazatelyam prochnosti i treshchinostoykosti // Vestnik SibADI. 2022, Vol. 19, No. 5 (87). Pp. 752–761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761>
10. Matus E.P., Pichugin A.P. Treshchinostoykost' stalefibrobetona s malym protsentom armirovaniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2015. No. 11–12 (683–684). Pp. 85–90.
11. Jinwang Mao, Ninghui Liang, Xinrong Liu, Zuliang Zhong, Chuanhua Zhou Investigation on early-age cracking resistance of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete in restrained ring tests // Journal of Building Engineering Volume 70, 1 July 2023, 106155. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106155>
12. GOST 31108–2020 «Tsementy obshchestroitel'nye. Tekhnicheskie usloviya». – Moscow: Standartinform, 2020. – 16 p.
13. GOST 8736–2014 «Pesok dlya stroitel'nykh rabot. Tekhnicheskie usloviya». – Moscow: Standartinform, 2019. – 8 p.
14. GOST 32496–2013 «Zapolniteli poristye dlya legkikh betonov. Tekhnicheskie usloviya». – Moscow: Standartinform, 2019. – 12 p.

15. GOST 29167-2021 «Betony. Metody opredeleniya kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhении». – Moscow: Standartinform, 2022. – 16 p.
16. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Razvitie metoda ispytaniya treshchinostoykosti stalefibrobetona // Ekonomika stroitel'stva. 2023. No. 9. Pp. 132–137.
17. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Razvitie metoda issledovaniya povedeniya stalefibrobetona pod nagruzkoy pri izgibe // Ekonomika stroitel'stva. 2024. No. 9. Pp. 168–171.

Сведения об авторах

Пухаренко Юрий Владимирович- доктор технических наук (05.23.05 – Строительные материалы и изделия), профессор, профессор-консультант кафедры технологии строительных материалов и метрологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 2-я Красноармейская ул., д.4, 190005, г. Санкт-Петербург, РФ.

Пантелеев Дмитрий Андреевич- кандидат технических наук (05.23.05 – Строительные материалы и изделия), доцент кафедры технологии строительных материалов и метрологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 2-я Красноармейская ул., д.4, 190005, г. Санкт-Петербург, РФ.

Жаворонков Михаил Ильич- кандидат технических наук (05.23.05 – Строительные материалы и изделия), доцент кафедры технологии строительных материалов и метрологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 2-я Красноармейская ул., д.4, 190005, г. Санкт-Петербург, РФ.

Пухаренко Юрий Владимирович – техникалық ғылымдар докторы (05.23.05 – Құрылыс материалдары мен бұйымдары), профессор, Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университетінің Құрылыс материалдары технологиясы және метрология кафедрасының профессор-кеңесшісі, Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ., 2-Қызыләскерлік к-сі, 4 үй, 190005.

Пантелеев Дмитрий Андреевич – техникалық ғылымдар кандидаты (05.23.05 – Құрылыс материалдары мен бұйымдары), доцент, Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университетінің Құрылыс материалдары технологиясы және метрология кафедрасының доценті, Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ., 2-Қызыләскерлік к-сі, 4 үй, 190005.

Жаворонков Михаил Ильич – техникалық ғылымдар кандидаты (05.23.05 – Құрылыс материалдары мен бұйымдары), доцент, Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университетінің Құрылыс материалдары технологиясы және метрология кафедрасының доценті, Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ., 2-Қызыләскерлік к-сі, 4 үй, 190005.

Yuriy Vladimirovich Pukharenko – Doctor of Technical Sciences (05.23.05 – Building Materials and Products), Professor, Consulting Professor at the Department of Building Materials Technology and Metrology, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4, 190005, Saint Petersburg, Russian Federation.

Dmitry Andreevich Panteleev – Candidate of Technical Sciences (05.23.05 – Building Materials and Products), Associate Professor at the Department of Building Materials Technology and Metrology,

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4, 190005, Saint Petersburg, Russian Federation.

Mikhail Ilyich Zhavoronkov – Candidate of Technical Sciences (05.23.05 – Building Materials and Products), Associate Professor at the Department of Building Materials Technology and Metrology, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya St., 4, 190005, Saint Petersburg, Russian Federation.



Copyright: © 2025 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/>).



IRSTI 06.81.23

Review

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-41-50>

Development of a Mobile Game for Teaching Traffic Rules

A.K.Aitim 

International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

E mail: a.aitim@iitu.edu.kz

Abstract. The use of mobile games in the educational process has gained increasing attention in recent years, as they provide a unique opportunity to combine situational and active learning with elements of entertainment. By incorporating interactive features, mobile games can transform traditional learning into an engaging and memorable experience. The findings demonstrate that mobile games incorporating AR features, animated instructors, and real-life simulations have the potential to significantly enhance learner motivation, interest, and retention of knowledge. These elements encourage active participation and provide learners with realistic scenarios that mimic everyday traffic situations, thereby reinforcing the acquired knowledge in practice. Preliminary analysis suggests that the integration of game-based mechanics, such as rewards, progress tracking, and immersive storytelling, further contributes to sustaining long-term engagement. The use of AR specifically allows learners to interact with their physical environment in meaningful ways, making the learning experience more authentic and effective. In conclusion, this study emphasizes the potential of AR-enhanced mobile games as powerful educational tools in the domain of road safety. Recommendations for future research include the optimization of mobile applications through adaptive learning systems, the inclusion of personalized feedback mechanisms, and the exploration of emerging technologies such as virtual reality (VR). It is expected that this work will serve as a foundation for further innovations in mobile learning and contribute to improving traffic safety education.

Keywords: gamification, Augmented Reality, game-based learning, traffic rules, studying road rules.

Introduction

In the development timeline of humanity, teaching and learning have consistently been crucial components of societal progress. As we navigate through an era dominated by technological advancements, leveraging these innovations for educational purposes has become increasingly vital. Today, while technology has transformed how we access information and learn, there is a concerning trend of diminishing engagement in traditional study methods. Many individuals now feel less inclined to invest time in learning, believing that machines can perform basic tasks, which may lead to a lack of essential skills and knowledge, in the vital fields of teaching traffic rules. This field such road rules and discipline are crucial to be solved due to the serious problems and challenges caused by this field.

The aim of this study is to introduce innovative methods for teaching traffic rules, transforming the learning process into an engaging and interactive experience that motivates learners to actively participate. It is widely acknowledged that traditional methods of teaching traffic regulations and safe driving techniques often become boring and fail to engage students effectively. Consequently, drivers, especially beginners, the young generation, may not fully understand or apply the knowledge they have acquired in practice, leading to an increase in violations and accidents on the roads. The mobile game will use cutting-edge technology, such as gamification and augmented reality (AR), to create an effective and enjoyable learning experience. The app will have different difficulty levels, and the gamified emergency training will involve scenarios where players can learn important emergency response skills. Players will practice actions such as calling for help, providing first aid, and avoiding accidents. They will receive rewards/points for completing tasks correctly, encouraging them to improve their skills. In addition, augmented reality will be used to simulate real-world scenarios, allowing users to practice checking oil levels, refueling a car, and understanding its internal systems. This will enhance their confidence and practical knowledge, helping them to engage with the game more effectively.

The literature review

The road is the most important element in our lives, it plays a key role in both daily life and routine affairs. Road safety is crucial, especially in the context of increasing accidents, which makes traffic safety education extremely important. The development of mobile games for traffic safety education has attracted the attention of researchers and practitioners due to its interactivity and ability to engage users. Research shows that gamification of learning can significantly increase student motivation, which is especially important for young people who actively use mobile technologies. One of the key aspects of gamification is the use of game elements to increase user engagement and interest in the learning process. According to Gee (2003), games contribute to creating a learning context by allowing users to master information through hands-on experience and problem solving in a game format. Mobile games focused on learning traffic rules can provide interactive scenarios that allow users to apply their knowledge in a safe and controlled environment. Regarding the specifics of traffic regulations training, works such as the study by J. A. V. Rojas and co-authors (2019) indicate the need to create adaptive systems that consider the level of knowledge and skills of users. A personalized approach in mobile games can help with targeted training, as well as increase the level of security, as users will be able to practice the rules in practice in conditions close to real ones. Considering new technologies, the use of mobile games for traffic regulations training can be effective in combination with other methods such as theoretical classes, tests and practical exercises. Research shows that a combined approach

increases the chances of successful learning of the material and the formation of skills necessary for safe driving. In conclusion, the use of mobile games as a tool for teaching traffic rules opens new horizons for educational technologies. This approach not only helps to increase motivation, but also makes the learning process more interactive and accessible, which is especially important today, where mobile devices are central to people's lives.

The methodology

The main goal of this systematic review is to evaluate the effectiveness of using gamification and augmented reality technologies in learning traffic and road rules, by collecting, analyzing existing literature relating to the topic of the study. Consequently, the methodology part is written by following PRISMA guidelines that guarantee the transparency and relevance of data. The research problem for this study is that traditional methods of teaching traffic rules and safe driving skills are often boring and do not engage users enough. As a result, drivers, especially beginners, may not learn or put their knowledge into practice. One of the main hypotheses of this study is that the combination of game-based and Augmented Reality (AR) techniques for teaching safe driving will enhance the quality of learning and better prepare users for practical application of traffic rules compared to more traditional teaching methods.

Information sources. The extensive search of these databases was carried out to identify relevant literature related to the development of mobile games, augmented reality (AR) technologies and gamification, as well as their application in teaching traffic rules and road safety. Moreover, according to the search strategy, there was used keywords including “gamification learning traffic rules”, “AR for study traffic rule”, while applying filters to limit results to publications from 2020 to 2024. These databases were chosen for their wide coverage in the fields of engineering, technology and social sciences, which are directly related to the mobile game development project and the use of AR to improve road safety. To ensure the relevance and timeliness of our review, we analyzed studies published between 2020 and 2024 years. Furthermore, the PRISMA flowchart diagram which highlights study selection process in accordance with the PRISMA guidelines [3].

Inclusion Criteria: Studies of application system:

- gamification and augmented reality (AR) in road safety education, driver training.
- Studies evaluating or discussing the effectiveness of AR and gamified approaches in teaching road safety.

- Articles on the effectiveness of gamification in learning.

- Articles on the effectiveness of AR in learning.

Exclusion Criteria: Research on -

- unrelated topics such as psychological or medical factors that are not related to the topic
- formats (mini-reviews, opinion articles) studies without relevant data or results by topic.
- topics unrelated to road safety or driver education

From the initial set of 731 studies, 435 were excluded due to non-compliance with these criteria. The remaining studies were carefully analyzed for their relevance and inclusion in the analysis. A mobile game effectively caters to three main audiences. Young drivers gain practical knowledge and confidence, driving school students reinforce their theoretical learning through simulations, and children/teens build foundational road safety skills in an engaging way. The game's use of gamification and AR makes learning more interactive and effective for all groups.

Data collection methods. In this study, we will use a combination of qualitative and quantitative

data to evaluate the effectiveness of our mobile game application. Quantitative data will be collected through pre- and post-tests on driving knowledge and skills to measure the effectiveness of the learning process and improvements in user scenarios. We will also collect data on users' interactions within the application, including the frequency of sessions, rates of performance in AR-based simulations, and other relevant metrics.

Data items. For this study, the following results were requested in order to evaluate the effectiveness of a mobile application with elements of gamification and augmented reality for teaching traffic rules in Table 1.

Table 1. Results and variables requested in the study of a mobile application for teaching traffic rules

Category	Results/Variables	Description	Compatibility with the field of results	Methods for selecting results
Main results	The level of knowledge	Measurement by pre- and post-tests, assessment of the correctness of answers	Compatible: knowledge of traffic rules	They were chosen because of their direct connection with the objectives of the study
	Reaction and accuracy of decisions	Average reaction time and percentage of correct decisions	Compatible: assessment of decision-making skills on the road	Selected to analyze the impact of gamification on practical skills
	The level of user engagement	Frequency and duration of application usage	Compatible: an indicator of interest in the gameplay	The basis for evaluating the success of gamification
	The effectiveness of training	Comparing the results of pre- and post-tests	compatible: the success rate of the methodology	key indicator of the effectiveness of the application
Additional results	User Experience Assessment	Satisfaction with the functionality and convenience of the interface	Shows a subjective assessment of the application	Selected to understand user preferences
	Behavioral changes	Changing awareness of traffic regulations and road behavior	Related to the purpose of improving road safety	Assessment through questionnaires and focus groups
Participant variables	Age	Grouping by age categories (9–17, 18–35, 35+)	Allows you to evaluate the effectiveness for different groups	They are used to stratify participants
	Gender	Distribution of participants by gender	Influences the analysis of engagement and preferences	It is analyzed as an additional factor
	Driving experience	Division into groups	It affects the perception of the	It is used to build a more

		with/without experience	material	accurate analysis
Game indicators	Points and rewards	The number of points for completing tasks	Shows the success of users in the gameplay	It is used as an indicator of engagement
	Level progress	Reaching new levels of difficulty	The success rate of learning	It is evaluated according to the application data
	Interaction with AR	The number of successful recognitions and simulations	Evaluates the use of augmented reality technology	It is directly related to the AR mechanics of the application
	Usage time	Total duration and number of gaming sessions	Indicates the degree of engagement	Reflects long-term interest

The Table 1, contains a list of the main and additional results, as well as the variables requested in the study. It reflects their relationship to the objectives of the study and the methods of analysis used.

The sampling methods for this study are a stratified sampling method. In stratified sampling, researchers divide subjects into subgroups called strata based on characteristics that they share (e.g., race, gender, educational attainment) [4]. This method ensures that each subgroup is represented, as shown in Table 1, there are 3 key audience groups. Participants can be recruited through driving schools, online platforms and social media for experiments and pre, post test. Moreover, in a beta-testing phase, there will be recruited individuals interested in new technology or gamified learning experiences.

Here are the key ethical considerations for this app

- User Privacy and Data Protection will be considered, by ensuring privacy policies and obtaining explicit user consent.
- The app will provide clear instructions and safety warnings, particularly for AR interactions involving real-world objects, users must be given consent and be aware of potential risks.
- AR scenarios and gamified content should encourage safe practices, avoid promoting risky behaviors, and provide guidance to prevent accidents or misuse.
- There will be ensured that all educational content is accurate and up to date, as misinformation could lead to unsafe driving practices.

The difficulty levels in the game are set to ensure a gradual learning experience based on the player's correct or incorrect answers. The accident scenarios, safe driving training, and emergency response in the game have been designed with the principles of augmented reality in mind. These features provide visual and audio feedback that simulate realistic driving situations, enhancing the learning experience. This is just the beginning of the development process for this mobile game. After it is released, a beta test will be conducted to identify any issues that users may encounter and prevent them. Following the launch, user feedback will continue to be collected for ongoing refinement and content updates. In addition, a study using both quantitative and qualitative data will not only measure how well the participants learned the information, but also find out how involved they were in the learning process, which is also important for us. This approach will help you understand how effective these innovative methods are in teaching traffic rules and how useful they can be for future drivers.

Findings/Discussion

For the systematic review of this topic, there were several academic databases used. Furthermore, for the significant and comprehensive account this study demonstrated the PRISMA flow diagram in Figure 1, with the template [3] from the official website.

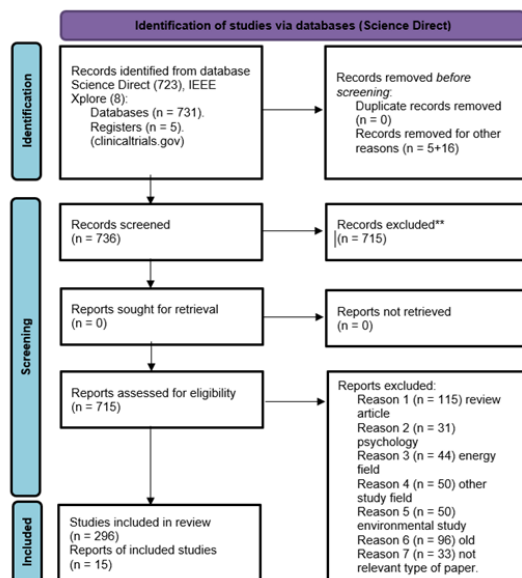


Figure 1. Prisma flow diagram for this topic

To illustrate, Science Direct, IEEE Xplore and clinicaltrials.gov was used for the identification of similar studies in the range of 2020-2024. Consequently, 435 studies from 731 are considered irrelevant to this study, due to the different reasons.

Including, the variety of study areas [5][6][7][8], like papers that focus on the psychological factors, medical factors, etc. In addition, some papers were not fit by the format as mini reviews [9]. Furthermore, some papers handle different key factors, areas like “Human-machine cooperative decision-making and planning for automated vehicles using spatial projection of hand gestures” [10], “A game-based deep reinforcement learning approach for energy-efficient computation in MEC systems”.

For instance, in the article “The Zebra Crossing Game – Using game theory to explain a discrepancy between road user behavior and traffic rules”, focusing on the Norway cyclists and pedestrians. To test this, they studied crossing behaviour at three zebra crossings, two crossings where cyclists approached from the pavement and one crossing where cyclists came from a combined cycle and walking path, and found that rather than aligning with traffic rules, the actual crossing behaviour aligned with the solution generated by game theory. The results of this research show that game theoretic modelling can be a valuable tool to understand road user interaction with the statement like, better understanding and ability to predict road user interactions could help to improve traffic safety.

Conclusion

The application is expected to have an impact on increasing users' confidence in knowing the rules of the road, which will serve as an important step for developing safe driving skills.

The analysis of statistical data, which will be carried out in the future, will probably confirm the high efficiency of mobile applications with elements of augmented reality and gamification for teaching traffic rules. It is expected that most users will note an improved understanding of traffic rules, which will indicate the significant potential of AR technologies in the field of educational applications. At the same time, subsequent research will identify possible technical difficulties that users may encounter, which will allow developers to improve the interface and adapt the application for various mobile platforms. In the future, work will focus on making the app more accessible to a wide audience. Thus, this research will become the basis for the development of future mobile educational applications aimed at improving road safety. In the future, the development of versions of the application for various operating systems will help reach more users. Further research will also focus on the impact of long-term use of the application on the sustainability of knowledge and practical skills. At the next stage of the project, it is planned to add complexity level adjustment functions, a progress monitoring system and adaptive learning elements that will allow the application to adapt to each user, increasing their interest and motivation to learn. Since the project is being carried out in Kazakhstan, its development will strengthen the patriotic component, which corresponds to the state program for the introduction of modern technologies and the development of human capital. The use of AR and gamification in teaching traffic rules will contribute to the formation of responsibility and a safety culture among the population, which is important for creating a responsible society. Overall, it is expected that further work on the project will confirm the effectiveness of combining augmented reality and gamification in educational applications, and that this approach will prove useful for improving road safety.

References

1. Road accidents are the main cause of deaths among children and youth, UN News, December 13, 2023, available at: <https://news.un.org/ru/story/2023/12/1447702> (date of access: December 27, 2023).
2. E. Eliseeva, The Ministry of Internal Affairs named the most common causes of accidents on the roads of Kazakhstan, Zakon.kz, May 21, 2024, available at: <https://www.zakon.kz/obshestvo/6435099-v-mvd-nazvali-samyie-chastye-prichiny-dtp-na-dorogakh-kazakhstana.html> (date of access: May 27, 2024).
3. PRISMA, PRISMA 2020 Flow Diagram, PRISMA Statement (2020), available at: <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram> (date of access: September 17, 2020).
4. L. Thomas, How to use stratified sampling, Scribbr, September 18, 2020, available at: <https://www.scribbr.com/methodology/stratified-sampling> (date of access: September 29, 2020).
5. Lubart and S. Capelli, "Gamification of the point of sale using hybrid-reality games: Non-players' negative influence on players' service experience," Technological Forecasting and Social Change 203, pp. 1-18, 123380 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123380>
6. T. Fleming, K. Sutcliffe, M. Lucassen, R. Pine, and L. Donkin, "10.05 – Serious Games and Gamification in Clinical Psychology," in G. J. G. Asmundson (Ed.), ScienceDirect; Elsevier (2022), available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978012818697800011X> (date of access: November 7, 2022).

7. Y. Wu and H. Li, "Signalling security: An observational and game theory approach to inter-pedestrian psychology," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 86, pp. 238–251 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.02.017>
8. W. Tabone, R. Happee, J. García, Y. M. Lee, M. L. Lupetti, N. Merat, and J. de Winter, "Augmented reality interfaces for pedestrian-vehicle interactions: An online study," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 94, pp. 170–189 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.02.005>
9. Shahraki, M. Abbasi, A. Taherkordi, and A. D. Jurcut, "A comparative study on online machine learning techniques for network traffic streams analysis," *Computer Networks*, pp. 1-18, 108836 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108836>
10. Y. Zhang, Z. Hu, P. Hang, S. Lou, and C. Lv, "Human-machine cooperative decision-making and planning for automated vehicles using spatial projection of hand gestures," *Advanced Engineering Informatics* 62, pp. 1-12, 102864 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102864>

Ә.Қ. Әйтiм

Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университетi, Алматы, Қазақстан

Жол қозғалысы ережелерiн үйретуге арналған мобильдi ойын әзiрлеу

Аңдатпа. Оқу процесiнде мобильдi ойындарды қолдану ситуациялық және белсендi оқытуды ойын-сауық элементтерiмен тиiмдi үйлестiре алады. Бұл зерттеу кеңейтiлген шындық (AR) және геймификация элементтерiн пайдалана отырып, мобильдi ойынды дамытуға, пайдаланушылардың белсендiлiгiн арттыруға және олардың жол қозғалысы ережелерiн түсiнуiн жақсартуға арналған. Әдебиеттердi жүйелi шолу аясында 2020-2024 жылдар аралығында мобильдi ойындардың оқуға әсерi туралы жарияланған 435 мақала талданып, қаралды. Әдебиеттердi алдын ала талдау AR және анимациялық нұсқаушылар сияқты ойын элементтерiн бiрiктiру пайдаланушылардың қызығушылығын және ақпаратты сақтауды арттыруы мүмкiн екенiн көрсетедi. Бұл тәсiл жол қозғалысы қауiпсiздiгi саласындағы бiлiм сапасын арттырады деп күтiлуде. Қорытындылай келе, бiлiм берудiң мобильдi қосымшаларын оңтайландыруға және оқу процесiне инновациялық технологияларды енгiзуге бағытталған болашақ зерттеулерге ұсыныстар енгiзiлген. Бұл жұмыс мобильдi оқыту және жол қауiпсiздiгiн арттыру саласындағы одан әрi дамудың негiзi болады деп күтiлуде.

Түйiн сөздер: геймификация, Толықтырылған Шындық, ойынға негiзделген оқыту, жол қозғалысы ережелерi, жол қозғалысы ережелерiн үйрену.

А.К. Айтим

Международный Университет Информационных Технологий, Алматы, Казахстан

Разработка мобильной игры для обучения правилам дорожного движения

Аннотация. Использование мобильных игр в образовательном процессе позволяет эффективно сочетать ситуационное и активное обучение с элементами развлечения. Данное исследование посвящено разработке мобильной игры с использованием элементов

дополненной реальности (AR) и геймификации, чтобы повысить вовлеченность пользователей и улучшить их понимание правил дорожного движения. В рамках систематического обзора литературы были проанализированы и рецензированы 435 статей, опубликованных в период с 2020 по 2024 год о влиянии мобильных игр на обучение. Предварительный анализ литературы показывает, что интеграция игровых элементов, таких как дополненная реальность и анимированные инструкторы, потенциально может повысить интерес пользователей и сохранить информацию. Ожидается, что такой подход повысит качество образования в области безопасности дорожного движения. В заключение приводятся рекомендации для будущих исследований, направленных на оптимизацию образовательных мобильных приложений и внедрение инновационных технологий в учебный процесс. Ожидается, что эта работа станет основой для дальнейших разработок в области мобильного обучения и повышения безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: геймификация, дополненная реальность, обучение на основе игр, правила дорожного движения, изучение правил дорожного движения.

References

1. Road accidents are the main cause of deaths among children and youth, UN News, December 13, 2023, available at: <https://news.un.org/ru/story/2023/12/1447702> (date of access: December 27, 2023).
2. E. Eliseeva, The Ministry of Internal Affairs named the most common causes of accidents on the roads of Kazakhstan, Zakon.kz, May 21, 2024, available at: <https://www.zakon.kz/obshestvo/6435099-v-mvd-nazvali-samy-chastye-prichiny-dtp-na-dorogakh-kazakhstana.html> (date of access: May 27, 2024).
3. PRISMA, PRISMA 2020 Flow Diagram, PRISMA Statement (2020), available at: <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram> (date of access: September 17, 2020).
4. L. Thomas, How to use stratified sampling, Scribbr, September 18, 2020, available at: <https://www.scribbr.com/methodology/stratified-sampling> (date of access: September 29, 2020).
5. A. Lubart and S. Capelli, "Gamification of the point of sale using hybrid-reality games: Non-players' negative influence on players' service experience," Technological Forecasting and Social Change 203, pp. 1-18, 123380 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123380>
6. T. Fleming, K. Sutcliffe, M. Lucassen, R. Pine, and L. Donkin, "10.05 – Serious Games and Gamification in Clinical Psychology," in G. J. G. Asmundson (Ed.), ScienceDirect; Elsevier (2022), available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978012818697800011X> (date of access: November 7, 2022).
7. Y. Wu and H. Li, "Signalling security: An observational and game theory approach to inter-pedestrian psychology," Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 86, pp. 238–251 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.02.017>
8. W. Tabone, R. Happee, J. García, Y. M. Lee, M. L. Lupetti, N. Merat, and J. de Winter, "Augmented reality interfaces for pedestrian-vehicle interactions: An online study," Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 94, pp. 170–189 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.02.005>

9. A.Shahraki, M. Abbasi, A. Taherkordi, and A. D. Jurcut, "A comparative study on online machine learning techniques for network traffic streams analysis," *Computer Networks*, pp. 1-18, 108836 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108836>
10. Y. Zhang, Z. Hu, P. Hang, S. Lou, and C. Lv, "Human-machine cooperative decision-making and planning for automated vehicles using spatial projection of hand gestures," *Advanced Engineering Informatics* 62, pp. 1-12, 102864 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102864>

Information about the authors

Aitim A.K. – corresponding author, master of Technical Sciences, Assistant-professor, Department of Information Systems, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan.

Айтим А.К. – автор для корреспонденции, магистр технических наук, ассистент-профессор кафедры Информационных систем, Международный Университет Информационных Технологий, Алматы, Казахстан.

Әйтiм Ә.Қ. – хат-хабар авторы, техника ғылымдарының магистрі, Ақпараттық жүйелер кафедрасының ассистент-профессоры, Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университеті, Алматы, Қазақстан.



Copyright: © 2025 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/>).



ХҒТАР 67.13.29
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-51-64>

Су басу жағдайындағы жер құрылыстарының тұзды топырақтарының беріктік қасиеттері

М.Ө. Иманов ^{ID} 1, Т.Болотбек ^{ID} 2, К.А. Абдрахманова ^{ID} 1
А.Т.Мухамеджанова ^{ID} 3, А. А. Абдрахманова ^{ID} *1

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

² И.Раззаков атындағы Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті, Бішкек, Қырғызстан

³ Л. Н. Гумилев атындағы Еуразиялық Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан

E mail: aardasha@list.ru

Аңдатпа. «Су басу жағдайларында жер құрылыстарының тұзды топырағының беріктік қасиеттері» мақаласында ішінара немесе толық су басу жағдайларында тұздануға ұшыраған топырақтың беріктік сипаттамаларының өзгерістері қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі су басу жағдайларында жер құрылыстарында қолданылатын топырақтың беріктік сипаттамаларына тұзды еріткіштердің әсерін бағалау, мақсаты олардың механикалық тәртібінің ерекшеліктерін айқындау және судың әсер етуі және химиялық өзгеретін әсерлер жағдайларында осындай құрылыстардың орнықтылығын арттыру үшін ұсыныстар әзірлеу болып табылады. Атап айтқанда, тұздардың сумен әрекеттесуіне және топырақ құрылымының өзгеруіне баса назар аударылған, бұл ғимараттардың беріктігінің және тұрақтылығының төмендеуіне әкелуі мүмкін. Автор сондай-ақ тұзды және су басатын аудандардағы жер конструкцияларын жобалау және нығайту бойынша практикалық ұсыныстарды талқылайды. Қорытындысында, мақала құрылыс жұмыстарын жоспарлау және су басудан қорғау жүйелерін құру кезінде тұзды топырақтың беріктік қасиеттерін есепке алу қажеттілігін атап көрсетеді, оның инфрақұрылымның ұзақ мерзімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін маңызды мәні бар.

Түйін сөздер: тұзды топырақ, сазды топырақ, топырақтың сығылуы, топырақтың физика-механикалық қасиеттері, топырақтың функционалдық өзгерістері, құрылымдық өзгерістер, тығыздау процестері.

Кіріспе

Тұзды топырақта инженерлік жер құрылыстарын салу проблемасы автомобиль және темір жолдарының, көпірлердің, туннельдердің, сондай-ақ осы топырақ аса көп кездесетін еліміздің құрғақ өңірлерінде әртүрлі гидротехникалық және гидромелиорациялық құрылыстардың (бөгеттердің, дамбалардың, су қоймаларының) қарқынды салынуына байланысты әсіресе қазіргі уақытта өзекті болып тұр. Қазақстанның осы аудандарында мұндай объектілерді салу үшін тұзды топырақты кешенді зерттеу қажет.

Қазіргі уақытта, Қазақстанның ірі өңірлерінде, оның ішінде тұзды топырақпен жиналған аумақтарда болып жатқан қатты тасқындарға және селдерге байланысты, су басқан жерлердің гидрогеологиялық құрылымында елеулі өзгерістер болуы мүмкін. Бұл өз кезегінде тау жыныстарының құрылымында, әсіресе су басқан аумақтардың тұзды топырағы үшін түбегейлі өзгерістерге әкелуі мүмкін. Сондықтан, судың ұзақ және ауқымды әсер етуі жағдайларында тұзды топырақтың беріктік қасиеттерінің өзгеруін зерттеу проблемасы біздің уақытымызда ерекше өзекті болып отыр.

Ахмедов М.А., Салямова К.Д. өз жұмысында гидротехникалық құрылыстар немесе олардың құрама бөліктері зақымдануы немесе толық бұзылуы орын алғанда, ол кезде су шаруашылығының инженерлік объектілерінде әртүрлі апаттық жағдайлар туындаған оқиғалар мысалдарын келтіреді. Өзбекстан Республикасының гидротехникалық құрылыстар кешенінің техникалық жағдайына талдау жүргізілген, су шаруашылығы объектілерінің апаттық зақымдануының негізгі себептері көрсетілген. Гидротехникалық құрылыстарды пайдалану кезінде апаттық жағдайларды болдырмау үшін халықаралық практикадан алынған ұсыныстар келтіріледі. Жұмыста гидротехникалық объектілердің тіреу құрылыстарының соңғы 40-50 жылда зақымдану мен бұзылу себептеріне талдау берілген [1]. Тиісті инфрақұрылымды құру арқылы топырақ дамбаларын, бөгеттерді және басқа да гидротехникалық құрылыстарды жобалау үшін тұзды топырақты арнайы зерттеулер, сондай-ақ мұнай-газ кен орындарын, әсіресе теңіздердің, су қоймаларының және тұзды топырақпен жиналған басқа су айдындарының жағалаудағы аймақтарында игеру кезінде қажет.

Тұзды топырақтың ерекшеліктерін ескере отырып, қасиеттерін зерделеу бойынша жүргізілген зерттеулер санының көптігіне қарамастан, мұндай топырақтың сипаттамалары өзгеруінің жалпы заңдылықтарын анықтау мүмкін болмады. Бұл осы зерттеулердің әртүрлі өңірлердің тұзды топырақтары, әртүрлі генезисті топырақтар үшін жүргізілгендігімен түсіндіріледі. Бұдан тұзды топырақтың физикалық, деформациялық, беріктік және сүзу қасиеттерін зерттеудің, суда еритін тұздардың еру және шығару процесінде олардың сипаттамаларының өзгеруін зерделеудің өзекті міндет болып табылатыны шығады.

Өз жұмысында (авторлар М.Ю. Абелев, И.В. Аверин, Д.Ю. Чунюк, А.А. Алмазов) [2] өнеркәсіптік және азаматтық құрылыстарды салудың негізі ретінде тұзды топырақты пайдалану ерекшеліктерін зерттеді. Тұзды топырақтың генезисі, олардың құрамы және осындай топырақпен жиналған негізгі алаңдардың таралу облысы зерделенген. Тұзды топырақтың аз ылғалды және сумен қаныққан күйдегі қасиеттерінің ерекшеліктері қарастырылады. Мұндай топырақты тығыздау мәселелері зерттелген, инженерлік геологиялық іздеулер жүргізу, өнеркәсіптік және азаматтық құрылыстар салу ерекшеліктері туралы мәліметтер келтірілген. Тұзды топырақты техникалық мелиорациялаудың жаңа технологиялары және тұзды топырақтың жасанды негіздерін

құрудың заманауи әдістері әзірленген.

Топырақ құрамындағы суда еритін тұздар олардың беріктік қасиеттеріне айтарлықтай әсер етеді. Тұзды топырақтан жасалған құрылыстардың негіздері пайдалану процесінде көбінесе жер асты және/немесе тасқын сулардың әсеріне ұшырайды, нәтижесінде кейіннен тұздардың еруімен және шығарылуымен (суффозиясымен) топырақтың минералды бөлшектері арасындағы тұз байланыстары әлсірейді. Бұл топырақтың кеуектілігінің ұлғаюына әкеледі. Жүктеме астындағы тұзды топырақтың кеуектілігінің ұлғаюы көбінесе қосымша (суффозиялық) шөгіндімен бірге жүреді.

Топырақтың құрамындағы тұздардың сапалық құрамы мен мөлшері тұзды топырақтың беріктік сипаттамаларына әртүрлі әсер ететіні анықталды. Кейіннен тұздардың еруімен және шығуымен топырақ саңылаулары арқылы суды сүзу кезінде осы топырақтың беріктік қасиеттері өзгереді. В.С. Вискребенцевтің [3] жұмысында тұзды сары топырақтың (құмдақтар мен саздақтардың) химиялық суффозиясы процесінде олардың сүзу, деформациялық және беріктік сипаттамалары өзгертіні анықталды. Сондай-ақ сілтісіздендіру топырақтағы тұздардың мөлшері мен сапалық құрамының, гранулометриялық құрамының, меншікті салмағының кеуектілігінің өзгеруіне әкеледі. Осының салдарынан топырақ тығыздалмайды, қосымша шөгумен бірге жүреді. Топырақтың қосымша деформациялары ығысу аймақтарының пайда болуына әкеледі. Сондықтан, тұзды сары топырақтың жалпы деформациясын анықтау кезінде топырақ құрамындағы тұздардың мөлшері мен сапалық құрамын ескеру қажет.

Автор өз жұмысында [3] инженерлік-геологиялық зерттеулер жүргізу, жобалау және құрылыс жұмыстарын жүргізу кезінде, сондай-ақ инженерлік құрылыстарды пайдалану кезінде тұзды топырақтың ерекше қасиеттерін (тұздардың мөлшері мен сапалық құрамы, топырақ массивіндегі таралу түрі) ескеруді ұсынады. Жүргізілген зерттеулер нәтижелері бойынша мыналар анықталды: тұзды сары топырақта жұқа дисперсиялық карбонатты тұздардың болуы осындай топырақтың беріктік сипаттамаларының (ілінісудің, ішкі үйкеліс бұрышының) ұлғаюына ықпал етеді. Инженерлік құрылыстар негіздерін тұзды сары топырақта дайындаудың тиімді технологияларын әзірлеу үшін топырақта ғана емес, сонымен қатар сүзу сұйықтығында да тұздардың мөлшері мен сапалық құрамын ескеру қажет. Б.Б. Бакеновтың, Н.В. Бойконың, У.Р. Джумашевтің [4] еңбектерінде Қарағанды қаласының тұзды сазды топырақтарын зерттеу кезінде алдын ала тұзсыздандырудан кейінгі беріктік сипаттамалары мәндерінің айтарлықтай төмендеуі туралы деректер көрсетіледі. Егер топырақ үлгілерін табиғи ылғалдылық кезінде жылдам ығысу әдістемесі бойынша сынау кезінде ілінісу мәні 0,048 МПа тең болса, онда осы топырақты алдын ала тұзсыздандырудан кейін ілінісу 0,01 МПа құрады, ал тұзсыздандырудан кейін осы топырақтың ішкі үйкеліс бұрышы 20%-ға азайды. С.Б. Ухов [5] жасанды тұзды саздақтарға зерттеулер жүргізді, олар топырақ ерітіндісіндегі тұздар концентрациясы өзгеруінің ығыстыру күшінің шамасына айтарлықтай әсер етпейтінін көрсетті.

Өз зерттеулерінде В.П. Петрухин [6] тұздарды сілтісіздендіру процесінде гипстелген саздақтар мен құмдақтардың беріктігі өзгеруінің сандық заңдылықтарын анықтады. Тәжірибелер нәтижесінде топырақтан гипс тұздарын сілтісіздендіру дәрежесі жоғарылаған кезде гипстелген саздақтарды тұздау кезінде ішкі үйкеліс пен ілінісу бұрышының мәндері азаятыны алынды. Табиғи құрылымды гипстелген құмдақтардың ілінісуі елеусіз болады. Құмдақтардан тұздарды сілтісіздендіру процесінде ішкі үйкеліс бұрышы жоғарылайды да, 20-30-ға азаяды, ал ілінісу мәні нөлге тең болады.

Тез еритін тұздармен және гипспен жасанды және табиғи тұздалған тұзды құмдар мен құмдақтардың беріктік сипаттамаларын зерттеу кезінде, түрде, А.А. Курбанов [7] гипстің құрамы 10-дан 50%-ға дейін ұлғайған кезде, жасанды тұздалған құмдақта ығыстырушы күш шамасы – 1,8-2 есе, ішкі үйкеліс бұрышының мәні – 50%-ға, ал ілінісу 2 есе артатынын анықтады. Гипс құрамының ұлғаюымен табиғи гипстелген құмдар мен құмдақтардың ығысуына кедергі артады. Б. Рахманов, Х. Журакуловтың [8] зерттеулерінде тұзды топырақ үлгілерін шоғырландырылған кесу тәсілі пайдаланылған болатын. Ығысу сынақтарын өткізу алдында үлгілер алдын ала сумен қаныққан немесе 0,2 МПа жүктемеде сілтісіздендіруге ұшыратылған. Үлгілерді ығысуға сынау жүргізу алдында мұндай дайындық тұзды топырақтың ерекше қасиеттерінің ерекшеліктерін ескеру мақсатында жүргізілді. Сумен қанығу және сілтісіздендіру нәтижесінде тұзды топырақтың беріктігі мен физика-механикалық қасиеттерінің өзгеру сипаттамаларын анықтау үшін тұзды топырақ үлгілерін ығысуға сынақтар Н.Н. Масловтың әдістемесі бойынша жүргізілді. Тұзды топырақта сіңдіру және химиялық суффозия нәтижесінде олардың құрылымы, тұздардың сандық және сапалық құрамы, сүзу ерітіндісінің құрамы және сазды бөлшектердің мөлшері өзгереді, олардың құрамы негізінен сазды топырақтың беріктік және деформациялық қасиеттерін едәуір дәрежеде анықтайды.

Зерттеу нәтижелері бойынша сумен қанығу және химиялық суффозия процестері тұзды топырақтың ілінісуіне, шекті беріктігіне және сырғымалылығына айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Ылғалдылық, тығыздық сияқты физикалық сипаттамалар, сонымен қатар сазды топырақты сіңдіру және химиялық суффозия процесінде құрылымдық байланыстардың өзгеруі зерттелген топырақтың беріктік параметрлерінің өзгеру сипатын едәуір дәрежеде анықтайды.

Э.А. Аракелянның [9] зерттеу нәтижелері тез еритін тұздардың тұзды топырақтың беріктігіне әсері күрделі сипатта болатынын көрсетті. Бұл тұздардың түріне және тұздану түріне байланысты. Оның пайымдауынша, көп жағдайда топырақта тез еритін тұздардың болуы беріктіктің аздап жоғарылауына әкеледі. Құрылымы бұзылған гипстелген сазды топырақтың беріктігі гипстің бастапқы құрамының ұлғаюымен артады. Құрамында гипс аз құрылымы бұзылмаған топырақ үшін беріктіктің ұлғаюы байқалды, ал гипс құрамы көп құрылымы бұзылмаған топырақ үшін беріктіктің азаюы болды. Әртүрлі генезисті тұзды топырақты зерттеу кезіндегі қосымша қиындықтар топырақта тұздардың жеке қосындылар, жолақшалар, қабатшалар, друзалар және әртүрлі концентрациялы тұзды ерітінділер түрінде болуы мүмкін екендігінен туындайды. Мұндай проблемалар ғалымдар мен құрылысшылардың алдында тұрған Қазақстанның жеке өңірлерінің тұрған тұзды топырағын мақсатты түрде зерттеу қажеттілігі туралы міндеттің өзектілігін атап қана көрсетеді.

Р.М. Худайкулов [10] жүргізген зерттеулер нәтижелері бойынша, автомобиль жолдарының жер төсемін салу кезінде тұзды топырақтың (тұзды батпақтың) ылғалдылығы параметрлерінің, беріктігі мен суффозиялық сығылғыштығы сипаттамаларының әсерін ескеру қажет екендігі анықталды. Автор әртүрлі сындарлы шешімдерді пайдалану жолымен автомобиль жолының жер төсемінің жоғарғы бөлігін ылғалдың әсерінен қорғау бойынша жұмыстар жүргізуді ұсынады. Осындай шешімдердің бірі топырақ төсемі үйіндісінің жотасы биіктігінің топырақ (беттік) сулар деңгейінен нормативтік биіктіктен 20%-ға жоғары және тұздану дәрежесіне және пайдаланылатын топырақ түріне байланысты одан да көп ұлғаюын болжайды. Сондай-ақ қалыңдығы 20 см-

ге дейін қиыршық тастан тұратын қабаттарды немесе битуммен араласқан топырақ қабаттарын (қалыңдығы 5 см) пайдалану ұсынылады. Көлденең профильдердің, науалардың, бермдердің құрылғысы бойынша жұмыстар да автожолдың жер төсемінен суды бұруды жақсартуға ықпал ететін болады. Мұндай сындарлы шешімдерді дұрыс таңдау және нақты орындау автожолдар мен басқа да көлік құрылыстарының топырақты негізінің серпімділік модулін арттыруға ықпал етеді.

Әдіснама

Топырақтың ығысуға қарсылығы топырақтың ең маңызды беріктік сипаттамаларының бірі болып табылады, оның көрсеткіштері беткейлердің орнықтылығын бағалау кезінде және инженерлік жер ғимараттары беріктігін басқа есептеулерде кеңінен пайдаланылады. Зерттеулердің мақсаты – тұзды топырақтың беріктік сипаттамаларын зерделеу және мұндай топырақты инженерлік жер ғимараттары (соның ішінде осы ғимараттардың негіздері) ретінде пайдалану мүмкіндігін анықтау.

Эксперименттер құрамында 5%-дан 24%-ға дейін тұз болатын құрылымы бұзылған тұзды топырақта жүргізілді.



1-сурет. Кесу жазықтығы бекітілген Гидрожоба модификациясындағы
Маслов-Лурье бір жазықтықты кесу аспабы

Ылғалдылық деңгейі әр түрлі топырақпен жүргізілген осы зерттеулерде тұзды топырақтағы су ерітіндісінің топырақтың ығысуға қарсылығына әсері анықталды. Берілген ылғалдылық кезінде ығысуға кедергінің өзгеруі бірдей тік қысым болғанда сіңдіру дәрежесі әртүрлі тұзды топырақ үлгілері бар тәжірибелер циклін жүргізген соң анықталды. Ығысуға кедергіні тұзды топырақтың алдын ала дайындалған үлгілері (аяқталған тығыздау) үшін кесу жазықтығы бекітілген (1-сурет)

Гидрожоба модификациясындағы (ГГП-30) Маслов-Лурье бір жазықтықты кесу аспаптарында жүзеге асырылды. Топырақ үлгісін дайындау алдын ала тығыздау аспабында жүргізілді. Ығысу 0,05 мм/мин жылдамдықпен тоқтамайтын деформация жағдайларында жүргізілді. Тығыздаушы жүктемелер үш үлгіден кем емес тығыздаушы

жүктеменің әрбір сатысы үшін сынаудың қайталануымен 0,2; 0,4 және 0,8 кгс/см²-ге тең етіп тағайындалды. Сынақтар үшін кесектерінің (бөлшектерінің) ірілігі 3 мм-ден артық емес құрылымы бұзылған тұзды топырақтың алдын ала дайындалған үлгілері пайдаланылды (1-кесте). Тәжірибелерде диаметрі 70 мм және биіктігі 24 мм кем емес цилиндр пішінді тұзды топырақ үлгілері пайдаланылды.

Топырақ үлгілерін тез шоғырландырылмаған (құрғатылмаған) ығысу сұлбасы бойынша сынады. Бұл ретте Маслов-Лурье аспаптары үшін ығысу уақыты 1-1,5 минуттан аспауы тиіс. Ығыстырушы жүктемені 10 секундтан артық емес сатылармен салды. Үлгінің деформациясы жүктеменің соңғы сатысын салған соң үздіксіз болған кезде ығысу аяқталды деп саналды. Ығысу аяқталған соң кесу аймағында топырақтың ылғалдылыққа сынамасын таңдап алды. Тұзды топырақ үлгілерін ығысуға кедергіге сынау жүргізу алдында зерттелетін топырақтың тығыздалу дәрежесін зертханалық жағдайларда анықтады.

Топырақтың талап етілетін тығыздығын ү зертханалық жағдайларда оңтайлы ылғалдылық болғанда максимум тығыздыққа үмакс. байланысты анықтады. Топырақтың тығыздалу дәрежесін «СоюздорНИИ» шағын стандартты тығыздау аспабында анықтады (2-сурет). Бұл аспап алмалы-салмалы цилиндрден (көлемі 0,1 л), бекітілетін екі бұрандасы бар тіреуіштен, бағыттаушы цилиндрлік қондырмадан, плунжерден (соққы жүктемесін беру үшін), салмағы 2,5 кг гiрден, бағыттаушы өзектен, тұтқадан және қосымша беттен тұрады. Ығысуға кедергіге сынау үшін топырақ үлгілерін тығыздық пен ылғалдылық берілген кезде құрамында бастапқы тұзы бар монолиттерден дайындады.



2-сурет. СОЮЗДОРНИИ шағын стандартты тығыздау аспабы (ШТА)

Зерттелген үлгілер үшін ығысуға кедергіні 1,0, 2,0, 3,0 кг/см² үш тік жүктеме болғанда сумен толық қаныққан кезде анықтады. Тығыздық шамасын максимум тығыздық мәнін ұмах тығыздау коэффициентіне Ктығ. көбейту жолымен анықтады. Бұл коэффициентті 0,7; 0,8; 0,95; 1,0-ге тең деп алды. Дайындалған біртекті топырақ массасын ығыстыру аспабының құрсауына (сақинасына) салды, содан кейін престің астында тығыздады. Содан кейін үлгісі бар құрсауды тығыздағышқа салды және топырақтың тығыздығын ұмах х

Ктығ. тең есептік мәнге дейін 12 сағат ішінде жеткізді. Осылайша дайындалған тығыздалған үлгілерді 24 сағат ішінде толық қаныққанға дейін құрсауға суға салып қойды. Ал тығыздығы жоғары үлгілерді (Ктығ. = 1,0 болғанда) – 48 сағат ішінде. Үлгілерді суға салу үшін ауыз су пайдаланылды. Толық сумен қаныққан соң үлгілерді есептік максимум кернеуге 6 дейін тығыздады. Үлгіге жүктеме беру сатылармен жүрді. Бұл ретте жүктеменің әрбір аралық сатысын 30 минут ішінде ұстап тұрды.

Соңғы сатыны үлгі деформациясының шартты тұрақталуына дейін ұстап тұрды (12 сағат ішінде 0,01 мм-ден аспайтын қысу). Ығысуға кедергіні анықтау үшін құрсаудағы топырақ үлгісін қалыпты шешпей, тығыздағыштан дереу кесуге арналған қорапқа ауыстырды.

Содан соң үлгіні есептік мәнге 6 дейін қайта жүктеді. Сынақтар үшін үлгілерді алдын ала електен (ұяшықтардың диаметрі 3 мм) өткізілген, ұнтақталған топырақтан дайындады. Содан кейін топыраққа берілген тығыздау дәрежесі болғанда оңтайлы ылғалдылыққа қол жеткізу үшін қажетті су мөлшерін қосты.

Тік жүктемені 0,5 кг/см²-тан 2,0 кг/см² мәніне дейін сатылармен және одан әрі 1,0 кг/см²-ден сатылармен берді. Әрбір аралық сатыны – 5 минуттан, соңғыны 30 минуттан ұстап тұрды. Бұл ретте кесу қорабына су құйды.

Көлденең ығыстыру жүктемелерін сатылармен салды (6 мәнінен 5%-дан артық емес). Әрбір келесі сатыны ығысу деформацияларын шартты тұрақтандыру анықталған соң, яғни ығысу деформациясының жылдамдығы 0,01 мм/мин аспайтын болғанда салды.

Нәтижелер мен талқылау

Құрылымы бұзылған тұзды топырақ үлгілерін ығысуға 48 сынақ орындалды. Зерттеулер үшін алдын-ала дайындалған топырақ үлгілері пайдаланылды. Зерттелген топырақтың физикалық сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.

1-кесте. Зерттелген топырақтың физикалық қасиеттері

Топырақ түрі	Тұздардың құрамы, %	Құрғақ топырақтың көлемдік массасы ρ_s , г/см ³	Топырақ бөлшектерінің тығыздығы ρ , г/см ³	Топырақтың кеуектілік коэффициенті, е	Топырақты сүзу коэффициенті Кф, см/сек	Бір осьті қысу беріктігінің шегі, МПа	
						табиғи ылғалдылық болғанда	сумен қаныққан күйінде
Шаңдақ тұзды құм	5	1,60	2,67	0,80	10 ⁻³	0,022	-
Шаңдақ тұзды құм	9	1,61	2,67	0,79	10 ⁻³	0,024	-
Гипстелген құмдақ	15	1,41	2,75	0,92	10 ⁻⁵	1,1	0,2
Гипстелген құмдақ	21	1,37	2,76	0,98	10 ⁻⁵	1,2	0,3
Гипстелген саздақ	12	1,52	2,71	0,75	10 ⁻⁶	5,6	3,0
Гипстелген саздақ	24	1,41	2,60	0,79	10 ⁻⁵	4,8	2,0

Графиктен (3-сурет) ішкі үйкеліс бұрышы ϕ мен топырақтың тығыздығы (тығыздалу коэффициенті $K_{тығ.}$) арасында анық байланыс бар екені анық.

2-кесте Тұзды топырақтың максимум тығыздығы және оңтайлы ылғалдылығы (үлгілерді ығысуға сынау кезінде)

Топырақ түрі	Тұз мөлшері, %	Оңтайлы ылғалдылық, %	Құрғақ топырақтың тығыздығы, γ_s , г/см ³	Топырақтың көлемдік салмағы γ , г/см ³
Шаңдақ құм	5	7	1,60	1,72
Шаңдақ құм	9	8	1,61	1,74
Құмдақ	15	12	1,41	1,58
Құмдақ	21	14	1,37	1,56
Саздақ	12	16	1,52	1,75
Саздақ	24	19	1,41	1,68

Сынақтар нәтижесінде алынған тұзды топырақтың беріктік сипаттамаларының мәндері (ішкі үйкелу бұрышы ϕ және ілінісу 3-кестеде келтірілген.

Тұзды топыраққа жүргізілген ығысуға сынау нәтижелерін өңдеу кезінде зерттелетін үлгілер қаңқасының көлемдік салмағының мәні тұздардың құрамы $d_0 = 5 - 24\%$ болғанда тұрақты болатыны есепке алынды.

Топырақтың тығыздалу коэффициенті $K_{тығ.}$ артқан сайын ішкі үйкеліс бұрышының ϕ мәндері де артады. Тығыздалу коэффициенті $K_{тығ.} = 0,80$ болғанда шаңдақ құм үшін 5%-дан 9%-ға дейін тұз болғанда ϕ мәні 100-тан 120-қа дейін өзгереді. $K_{тығ.} = 0,80$ мәні болғанда, құмдақ үшін ϕ мәні іс жүзінде өзгеріссіз қалады, 15%-дан 21%-ға дейін тұз болғанда шамамен 120 болады. Тұздардың әр түрлі мөлшері бар зерттелетін топырақтың олардың оңтайлы ылғалдылығына максимум тығыздығын анықтау нәтижелері 2-кестеде келтірілген.

3- кесте. Зерттелген топырақтың беріктік сипаттамалары

Топырақ түрі	Тұз мөлшері, %	Максимум тығыздық, γ , г/см ³ Максимум тығыздық, γ , г/см ³	Тығыздалу коэффициенті, $K_{тығ.}$	Топырақ қаңқасының көлемдік салмағы γ_s , г/см ³	Ішкі үйкеліс бұрышы, ϕ , дәрежесі	Ілініс u , с, г/см ³
Шаңдақ құм	5	1,72	0,80	1,38	9	0,00
			0,85	1,46	11	0,00
			0,90	1,55	14	0,00
			0,95	1,63	16	0,01
			1,00	1,72	19	0,01
Шаңдақ құм	9	1,74	0,80	1,39	10	0,00
			0,85	1,48	12	0,00
			0,90	1,57	16	0,01
			0,95	1,65	18	0,01
			1,00	1,74	23	0,02

Саздақ	12	1,75	0,80	1,40	16	0,14
			0,85	1,49	19	0,20
			0,90	1,58	22	0,28
			0,95	1,66	29	0,35
			1,00	1,75	35	0,44
Құмдақ	15	1,58	0,80	1,26	13	0,09
			0,85	1,34	16	0,12
			0,90	1,42	20	0,17
			0,95	1,50	25	0,38
			1,00	1,58	28	0,47
Құмдақ	21	1,56	0,80	1,25	12	0,10
			0,85	1,33	18	0,14
			0,90	1,40	22	0,18
			0,95	1,48	27	0,35
			1,00	1,56	29	0,48
Саздақ	24	1,68	0,80	1,34	19	0,19
			0,85	1,43	25	0,22
			0,90	1,51	29	0,28
			0,95	1,60	38	0,34
			1,00	1,68	41	0,48

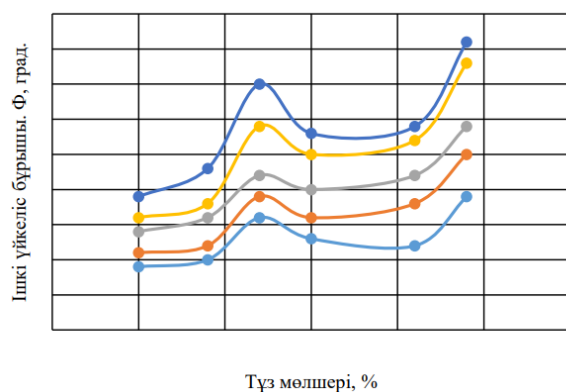
Ішкі үйкелу бұрышының φ құрамында тұздардың болуына тәуелділігі 4-кестеде келтірілген.

4- кесте.Ішкі үйкеліс бұрышының φ тұздың болуына тәуелділігі

Топырақ түрі	Тұздардың құрамы, %	Тығыздау коэффициенті $K_{\text{тығ.}}$ болғандағы ішкі үйкеліс бұрышы φ				
		0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
Шаңдақ құм	5	9	11	14	16	19
Шаңдақ құм	9	10	12	16	18	23
Саздақ	12	16	19	22	29	35
Құмдақ	15	13	16	20	25	28
Құмдақ	21	12	18	22	27	29
Саздақ	24	19	25	29	38	41

Ығысуға сынау нәтижелері бойынша (4-кесте) ішкі үйкеліс бұрышының φ тұздардың

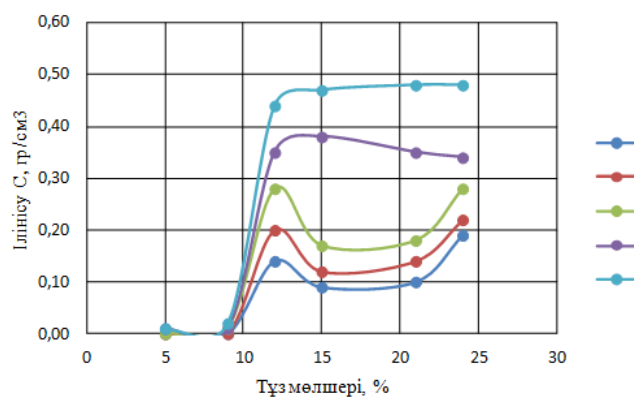
пайыздық құрамына d_0 тәуелділігінің графигі салынды (3-сурет).



3-сурет. Зерттелген топырақтың ішкі үйкеліс бұрышының ϕ тығыздау дәрежесі әртүрлі болғанда тұздардың пайыздық құрамына d_0 байланысты өзгеру графигі,

1). $K_{тығ.}=0,80; 0,85; 0,90; 0,95; 1,00$.

$K_{тығ.}=1,00$.



4-сурет. Әр түрлі тығыздалу дәрежесі болғанда тұздардың пайыздық мөлшеріне d_0 байланысты зерттелген топырақтардың c ілінісуінің өзгеру графигі:

1) $K_{тығ.}=0,80$; 2) $K_{тығ.}=0,85$; 3)

$K_{тығ.}=0,90$; 4) $K_{тығ.}=0,95$; 5)

$K_{тығ.}=1,00$

5-кесте. c ілінісудің тұздардың бар болуына тәуелділігі

Топырақ түрі	Тұздардың бар болуы, %	Тығыздалу коэффициенті $K_{тығ.}$ болғандағы ішкі үйкеліс бұрышы ϕ				
		0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
Шандақ құм	5	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Шандақ құм	9	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
Саздақ	12	0,14	0,20	0,28	0,35	0,44
Құмдақ	15	0,09	0,12	0,17	0,38	0,47
Құмдақ	21	0,10	0,14	0,18	0,35	0,48
Саздақ	24	0,19	0,22	0,28	0,34	0,48

Ығысуға сынау нәтижелері бойынша (5-кесте) c ілінісудің d_0 тұздарының пайыздық құрамына d_0 тәуелділігі графигі салынды (4-сурет).

Қорытынды

Табиғи және құрылымы бұзылған кәдімгі тұзды емес топырақтың (құмдақтар мен саздақтардың) беріктік сипаттамаларын салыстыру топырақтың беріктігінің олардың құрылымы бұзылған кезде төмендейтінін көрсетті. Құрамында гипс тұздары бар табиғи құрылымды құмдақтар мен саздақтардың құрамында тұзы жоқ қарапайым топыраққа қарағанда беріктік сипаттамалары аса жоғары болады. Эксперименттік зерттеулер гипстелген сазды топырақтың беріктік сипаттамаларының $K_{тығ.}$ тығыздалу

коэффициентіне және топырақтағы гипс тұздарының пайыздық құрамына байланысты болатынын көрсетті. Құрылымы бұзылған гипстелген топырақ (құмдақтар және саздақтар) жоғары беріктік сипаттамаларымен ерекшеленеді. Ктығ.> 0,90 болғанда, ішкі үйкеліс бұрышының мәндері ϕ 200-тан 390-қа дейін өзгереді. Ктығ.> 0,90 болғанда, ілінісу мәндері c 0,17-ден 0,48 кгс/см²-ге дейін өзгереді. Жүргізілген зерттеулер негізінде гипстелген құмдақтар мен құрылымы бұзылған саздақтардың жоғары беріктік сипаттамаларымен ерекшеленетіні шығады. Бұл топырақ инженерлік жер ғимараттарының құрылысында толық пайдаланыла алады.

Авторлардың қосқан үлесі.

М.Ө. Иманов, Т.Болотбек – мәтінді түсіну, талдау, өңдеу, бекіту.

К.А. Абдрахманова, А.Т.Мухамеджанова – мәліметтерді жинау, визуализация, жобалау.

А. А. Абдрахманова - мәліметтерді жинау, талдау, жазу.

Әдебиеттер тізімі

1. М.А. Ахмедов, К.Д. Саямова, Анализ и оценка повреждений гидротехнических сооружений, («Fan va texnologiya», Ташкент, 2016), с.160. - монография
2. М.Ю.Абелев, И.В.Аверин, Д.Ю.Чунюк, А.А. Алмазов, Методы строительства промышленных и гражданских сооружений на засоленных грунтах, (АСВ, Москва, 2024), с.182. - книга
3. В.С. Вискребенцев, О влиянии химической суффозии на физические и деформационные свойства лессовых грунтов, (Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2016), с. 96-101. - статья
4. Б.Б.Бакенов, Н.В.Бойко, У.Р. Джумашев, Основания и фундаменты на засоленных грунтах, («Стройиздат», Москва, 1988), с.133. - статья
5. С.Б. Ухов, Искусственное засоление связных грунтов для возведения насыпей в зимнее время, (Автореферат, Москва, 1961), - автореферат
6. В.П. Петрухин, Строительство сооружений на засоленных грунтах, (Стройиздат. Москва, 1989), с.264. - книга
7. А.А. Курбанов, Исследование засоленных грунтов для строительства земляных плотин, (Автореферат, Москва. 1980), с.21. - автореферат
8. Б.Рахманов, Х.Журакулов, Изменение прочности засоленных грунтов при их выщелачивании, (Вестник ОшГУ. Ош), с. 64-75. - статья
9. Э.А. Аракелян, Особенности определения физических свойств загипсованных грунтов, (ОФМГ, Москва, 1986), с.20-21.- статья
10. Р.М. Худайкулов, Особенности учета характеристик засоленных грунтов при строительстве автомобильных дорог, (НМЖ: Проблемы современной науки и образования, Иваново, 2021), с. 17-20. -статья

**М.О.Иманов¹, Т. Болотбек², К.А. Абдрахманова¹, А.Т.Мухамеджанова³,
А.А. Абдрахманова*¹**

*¹ НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
Караганда, Казахстан*

*² Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова,
Бишкек, Кыргызстан*

³ Евразийский Национальный Университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Прочностные свойства засоленных грунтов земляных сооружений в условиях подтопления.

Аннотация. В статье «Прочностные свойства засоленных грунтов земляных сооружений в условиях подтопления» рассматривается изменение прочностных характеристик грунтов, подвергшихся засолению в условиях частичного или полного затопления. Актуальность исследования обусловлена тем, что многие регионы сталкиваются с проблемами, связанными с изменением уровня грунтовых вод, что негативно сказывается на устойчивости земляных сооружений. В работе представлены результаты исследований, показывающих, как присутствие солей в почве влияет на ее механические свойства. Исследуются различные типы солей и их концентрации, а также условия, при которых почва наиболее чувствительна к изменениям прочностных характеристик. В частности, особое внимание уделяется взаимодействию солей с водой и изменению структуры почвы, что может привести к снижению прочности и устойчивости структур. Автор также обсуждается практические рекомендации по проектированию и укреплению земляных сооружений на засоленных и затопленных землях. В заключение, подчеркивается необходимость учета прочностных свойств засоленных почв при планировании строительных работ и создании систем защиты от наводнений, что важно для обеспечения прочности и безопасности инфраструктуры.

Ключевые слова: засоленная почва, глинистая почва, уплотнение почвы, физико-механические свойства почвы, функциональные изменения почвы, структурные изменения, процессы уплотнения.

**M.O.Imanov¹, Temir Bolotbek², K.A.Abdрахmanova¹, A.T.Mukhamedzhanova³,
A.A.Abdрахmanova*¹**

*¹ NAO "Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov",
Karaganda, Kazakhstan*

*² Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov,
Bishkek, Kyrgystan*

³ L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Strength properties of saline soils of earthworks in conditions of flooding.

Abstract. The article "Strength properties of saline soils of earthworks in conditions of flooding" examines the change in strength characteristics of soils subjected to salinization in conditions of partial or complete flooding. The relevance of the study is due to the fact that many

regions face problems related to changes in the groundwater level, which negatively affects the stability of earthworks. The paper presents the results of experimental studies showing how the presence of salts in the soil affects its mechanical properties. Various types of salts and their concentrations are investigated, as well as the conditions under which the soil is most sensitive to changes in strength characteristics. In particular, special attention is paid to the interaction of salts with water and changes in the structure of the soil, which can lead to a decrease in the strength and stability of structures. Practical recommendations on the design and strengthening of earthworks on saline and flooded lands are also discussed. In conclusion, the need to take into account the strength properties of saline soils when planning construction works and creating flood protection systems is emphasized, which is important to ensure the strength and safety of infrastructure.

Keywords: saline soil, clay soil, soil compaction, physical and mechanical properties of soil, functional changes of soil, structural changes, compaction processes.

References

1. M.A Akhmedov, K.D Salyamova, Analiz i otsenka povrezhdenii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii, («Fan va texnologiya», Tashkent, 2016), s.160. - monografiya
2. M.YU.Abelev, I.V.Averin, D.YU.Chunyuk, A.A. Almazov, Metody stroitel'stva promyshlennykh i grazhdanskikh sooruzhenii na zasolennykh gruntakh, (ASV, Moskva, 2024), s.182. - kniga
3. V.S. Vyskrebentsev, O vliyanii khimicheskoi suffozii na fizicheskie i deformatsionnye svoistva lessovykh gruntov, (Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova, Belgorod, 2016), s. 96-101. - stat'ya
4. B.B.Bakenov, N.V.Boiko, U.R. Dzhumashev, Osnovaniya i fundamenty na zasolennykh gruntakh, («Stroiizdat», Moskva, 1988), s.133. - stat'ya
5. S.B. Ukhov, Iskusstvennoe zasolenie svyaznykh gruntov dlya vozvedeniya nasypei v zimnee vremya, (Avtoreferat, Moskva, 1961), - avtoreferat
6. V.P. Petrukhin, Stroitel'stvo sooruzhenii na zasolennykh gruntakh, (Stroiizdat. Moskva, 1989), s.264. - kniga
7. A.A. Kurbanov, Issledovanie zasolennykh gruntov dlya stroitel'stva zemlyanykh plotin, (Avtoreferat, Moskva. 1980), s.21. - avtoreferat
8. B. Rakhmanov, KH.Zhurakulov, Izmenenie prochnosti zasolennykh gruntov pri ikh vyshchelachivanii, (Vestnik OSHGU. Osh), s. 64-75. - stat'ya
9. E.H.A. Arakelyan, Osobennosti opredeleniya fizicheskikh svoistv zagipsovannykh gruntov, (OFMG, Moskva, 1986), s.20-21. - stat'ya
10. R.M. Khudaikulov, Osobennosti ucheta kharakteristik zasolennykh gruntov pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog, (NMZH: Problemy sovremennoi nauki i obrazovaniya, Ivanovo, 2021), s. 17-20. - stat'ya

Авторлар туралы мәлімет:

Иманов Марат Өмірбекович- т.ғ.к., қауымд. профессор, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56

Абдрахманова Каламкас Аманбековна- PhD, қауымд. профессор, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев

даңғылы,56

Темир Болотбек- т.ғ.д., И. Раззаков атындағы Қырғыз мемлекеттік техникалық университетінің профессоры

Мұхамеджанова Әсел Төлеубекқызы- PhD, құрылыс кафедрасының қауымд. профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Сәтбаев көшесі 2

Абдрахманова Ардак Аманбековна- докторант, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы,56,

Иманов Марат Омирбекович- к.т.н., асс. профессор, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр.Н.Назарбаева,56, alivek@mail.ru

Абдрахманова Каламкас Аманбековна- PhD, асс. профессор, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр.Н.Назарбаева,56

Темир Болотбек- д.т.н., профессор, Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова Мухамеджанова Асель Төлеубековна, PhD, асс. профессор кафедры «Строительства», ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, Астана, ул. Сәтбаева 2

Абдрахманова Ардак Аманбековна- докторант, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр.Н.Назарбаева,56,

Imanov Marat Omirbekovich-Ph.D., ass. Professor, NAO "Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov", 56 N.Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan, alivek@mail.ru

Abdrakhmanova Kalamkas Amanbekovna- PhD, ass. Professor, NAO "Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov", 56 N.Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan

Temir Bolotbek- Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov

Mukhamedzhanova Assel Toleubekovna- PhD ass. Professor of the Department of Construction NAO "L.N. Gumilyov ENU",tumar2304@mail.ru , PhD, Senior Lecturer of the Department of Construction, L. N. Gumilyov ENU, Astana, Satbayeva str. 2

Abdrakhmanova Ardak Amanbekovna- PhD student, НАО «Карагандинский техниеский университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр.Н.Назарбаева,56,



Copyright: © 2025 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/>)



IRSTI 656

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-65-78>

Exploring the benefits of blockchain in ensuring security, transparency, and efficiency

M.A. Baibusinova ¹, G.V. Muratbekova *¹
M.V. Amanova ¹, D.S. Mambetalin ²

¹International Transport And Humanitarian University, Almaty, Kazakhstan

²Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan

E mail: mieruiert.baibusinova@mail.ru

Abstract. In recent years, blockchain technology has attracted significant attention due to its capabilities in ensuring transparency, security, and efficiency of various processes. This paper explores the advantages of using blockchain in logistics, with a particular focus on increasing operational transparency, enhancing data security, and improving the overall efficiency of supply chain processes. The study analyzes the fundamental features of blockchain technology—such as decentralization, immutability of records, and the use of smart contracts—and how these attributes contribute to cost reduction and increased trust between stakeholders. Furthermore, the paper includes a comparative overview of international practices, assesses the current state of blockchain adoption in Kazakhstan’s digital economy, and highlights the main barriers to implementation, including scalability issues, integration challenges, and legal uncertainties. Recommendations are provided for future development, including regulatory frameworks, educational initiatives, and pilot project support. This review also identifies opportunities for further research, such as case studies and empirical evaluation of blockchain deployment in logistics.

Keywords: blockchain, transparency, security, efficiency, decentralization, product tracking, supply chain management, digitalization, data protection, cost reduction, logistics innovation, Kazakhstan, smart contracts, digital economy, regulatory frameworks, technology adoption.

Introduction

Blockchain is an innovative technology for storing and transmitting data through decentralized distributed networks, enabling the exchange of information without the involvement of intermediaries or central servers. Each block in the chain contains encrypted information about transactions and events, as well as a hash link to the previous block, ensuring data security, integrity, and immutability. [1]

One of the key features of blockchain is its transparency: all participants in the network can access the data, and any changes require consensus from the majority. This makes the system resistant to fraud and significantly increases trust among stakeholders in logistics operations. The application of blockchain is particularly relevant in scenarios where traceability and control of goods movement are essential.

Blockchain technology can greatly improve the efficiency of logistics operations and reduce their associated costs. It enables real-time shipment tracking, product quality monitoring, inventory management, automated document processing, and optimized transportation routing. According to a MarketsandMarkets report, the blockchain market in logistics was valued at USD 204 million in 2021 and is projected to grow more than tenfold over the next 5–7 years. [2]

Beyond logistics, blockchain is being adopted across various sectors of the economy—from finance and healthcare to energy and public administration. It is particularly prominent in the **fintech sector**, where it is used for decentralized payments, identity verification, and transaction cost reduction. In healthcare, blockchain supports the management of electronic medical records and pharmaceutical supply chains, while in law, it enables the development of digital notary services and the automation of contract execution.

The growing interest in blockchain is driven not only by its technological advantages but also by global trends in digital transformation, which demand new approaches to data governance, cybersecurity, and resilient infrastructure. In this context, logistics emerges as one of the most promising industries for large-scale blockchain adoption.

Thus, the use of blockchain in logistics paves the way for the development of a new model of supply chain management—one that is based on transparency, reliability, and automation. This study aims to analyze the benefits of blockchain technology in logistics, with a focus on international and Kazakhstani practices, identification of implementation barriers, and recommendations for future development.

The methodology

The study of blockchain technologies within Kazakhstan's digital economy employs a multifaceted methodological approach, combining qualitative and quantitative research techniques to provide a comprehensive understanding of the current state, challenges, and prospects of blockchain adoption.

1) Document and Policy Analysis

A thorough review of legislative frameworks, strategic government documents, and regulatory acts related to blockchain technology was conducted to assess Kazakhstan's official stance on blockchain development. This analysis included national digitalization programs, cybersecurity strategies, and innovation policies published by key ministries and regulatory bodies. [3] The aim was to identify the regulatory environment's readiness to support blockchain initiatives and to understand policy trends shaping the ecosystem.

2) Public Sector Project Analysis

The research investigated blockchain applications in Kazakhstan's public sector, with a focus on e-governance and digital identity management. Notably, the Ministry of Digital Development has launched pilot projects that utilize blockchain for issuing and verifying academic diplomas, enhancing transparency, and reducing fraud in educational credentialing. These projects serve as practical case studies illustrating blockchain's potential to improve public services and foster citizen trust in digital government systems.

3) Expert and Organizational Survey

An online survey was distributed among 50 representatives from diverse sectors, including IT companies, government agencies, and educational institutions. The survey aimed to capture attitudes towards blockchain implementation, perceived benefits, and obstacles. The results showed that 52% of respondents are prepared to adopt blockchain solutions in their operations. However, 28% highlighted the shortage of qualified personnel and the high costs of implementation as significant barriers. This feedback underscores the need for capacity-building and financial support to accelerate blockchain adoption [4]

4) Startup and Project Analysis

The study examined the landscape of blockchain startups in Kazakhstan, focusing on sectors such as agrotechnology, fintech, and digital identity management. Many startups demonstrate innovative approaches but face challenges related to scaling their solutions and attracting sufficient investment. Common hurdles include limited access to venture capital, regulatory uncertainty, and technical integration issues. This analysis helps identify gaps in the ecosystem and potential areas for governmental and private sector intervention.

5) Comparative International Analysis

To contextualize Kazakhstan's blockchain development, the research compared its regulatory and technological environment with countries recognized as blockchain frontrunners, including Estonia, Switzerland, and the United Arab Emirates (UAE). These countries have established clear regulatory frameworks, supportive infrastructure, and incentive programs that foster blockchain innovation. Unlike Kazakhstan's fragmented and nascent ecosystem, their coordinated efforts have resulted in higher adoption rates and successful deployment of blockchain solutions in both public and private sectors.

Together, these methods provide a holistic view of Kazakhstan's blockchain landscape, informing the assessment of current strengths, weaknesses, and opportunities for strategic growth in the digital economy.

Findings/Discussion

Blockchain technology continues to evolve rapidly, opening up a wide range of opportunities across multiple sectors of the economy. Its transformative potential lies not only in its technical architecture but also in its ability to reconfigure the very nature of trust, transparency, and interaction in digital systems. In recent years, this technology has expanded far beyond its original application in cryptocurrencies, finding new ground in logistics, governance, energy, healthcare, and beyond [5].

Among the most promising applications of blockchain are:

1. Decentralized Applications (dApps)

The emergence of decentralized applications represents a significant paradigm shift in software development. Apps operate on blockchain networks without reliance on centralized servers, ensuring greater security, resilience, and resistance to single points of failure. Their decentralized

nature fosters transparency and enables communities to maintain and evolve applications collaboratively, which is particularly valuable in systems requiring trust and autonomy. These applications form the core of the so-called “Web3” architecture, where user empowerment and data ownership are key priorities.

2. Smart Contracts

One of the most revolutionary innovations introduced by blockchain is the concept of smart contracts—self-executing agreements with the terms directly written into code. These contracts automatically enforce obligations between parties without the need for intermediaries such as banks or legal institutions. This not only reduces operational costs and delays but also minimizes the human factor and related risks. In sectors such as logistics, finance, and law, smart contracts are already contributing to the automation of routine processes and improving compliance and auditability.

3. Integration with the Internet of Things (IoT)

The intersection of blockchain and the Internet of Things (IoT) has the potential to significantly enhance the security and reliability of distributed networks of connected devices. Blockchain offers immutable and verifiable data recording, which is essential for environments where devices must autonomously exchange and validate information. For example, in smart logistics, blockchain can provide a secure record of temperature, humidity, or location data captured by IoT sensors, ensuring the integrity of the supply chain and real-time product tracking.

4. Financial Technology (FinTech) Applications

FinTech has become one of the most active domains for blockchain experimentation and implementation. From peer-to-peer payment systems to decentralized finance (DeFi) platforms, blockchain enables faster, more secure, and cost-efficient financial operations. The reduced reliance on traditional intermediaries such as banks and clearinghouses leads to streamlined services and greater financial inclusion, especially in underserved or underbanked regions.

5. Creation of Decentralized Communities and Organizations

Blockchain enables the establishment of Decentralized Autonomous Organizations (DAOs), which operate through coded rules agreed upon by members and executed without centralized governance. These structures democratize decision-making processes and enhance transparency in organizational activities. The model has gained traction in sectors such as venture capital, social networks, and open-source development, offering new forms of collective management and stakeholder engagement.

6. Emergence of New Types of Digital Assets and Cryptocurrencies

Blockchain continues to facilitate the creation of new digital assets tailored to specific economic or social functions. Beyond Bitcoin and Ethereum, new cryptocurrencies are being developed to serve purposes such as microtransactions, reward mechanisms, tokenization of physical goods, or representation of carbon credits. The diversity of these assets opens up new financial ecosystems and alternative forms of value exchange.

7. Resource Sharing and Optimization

In sectors such as energy, transportation, and agriculture, blockchain provides tools for more efficient and equitable resource distribution. For example, peer-to-peer energy trading platforms built on blockchain allow households with solar panels to sell excess electricity directly to neighbors, bypassing traditional utilities. Similarly, shared logistics platforms can use blockchain to match unused freight space with shippers in need, optimizing delivery networks and reducing carbon footprints. [6] This broader and more nuanced understanding of blockchain’s capabilities

illustrates its role not only as a technological innovation but also as a catalyst for structural and systemic transformation. As industries continue to adapt and integrate blockchain-based solutions, the importance of interdisciplinary research and collaborative experimentation becomes ever more evident.

All these multifaceted possibilities of blockchain technology collectively point toward the emergence of a more secure, efficient, and democratically structured economy and society. As digital infrastructure becomes increasingly foundational to modern life, the role of blockchain in facilitating transparent, verifiable, and tamper-proof transactions holds the potential to transform not only individual enterprises but also entire sectors and institutional frameworks. Through its inherent properties—such as decentralization, immutability, and automated logic—blockchain introduces a paradigm shift in how trust, value, and data integrity are managed across interconnected systems.

One of the most promising domains for blockchain application lies in **supply chain management**, a field inherently dependent on coordination, traceability, and transparency across multiple stakeholders. Blockchain's capabilities enable the transformation of traditional logistics systems into more intelligent, adaptive, and data-driven networks.

The main **advantages of using blockchain in supply chain management** include the following:

1. Enhanced efficiency in supply chain operations

By enabling real-time monitoring of each stage in the supply chain, blockchain technology facilitates full visibility into the movement of goods and materials. This level of traceability improves responsiveness to disruptions, delays, and quality issues, empowering stakeholders to act swiftly and decisively. End-to-end tracking fosters greater accountability and ensures compliance with both contractual obligations and regulatory standards.

2. Automation of business processes

The integration of smart contracts—self-executing agreements encoded on the blockchain—streamlines a wide array of administrative and operational procedures. This automation eliminates the need for intermediaries in validating and enforcing agreements, thereby reducing manual labor, mitigating the risk of human error, and accelerating transaction cycles. As a result, logistical processes become more predictable, efficient, and resilient.

3. Improved forecasting and planning capabilities

Coupling blockchain with advanced data analytics and machine learning enables supply chain managers to anticipate demand fluctuations, assess market dynamics, and fine-tune production schedules and inventory strategies. This data-informed decision-making process supports a transition from reactive to proactive logistics management, thereby reducing uncertainty and enhancing strategic agility.

4. Reduction in operational and structural costs

By optimizing logistics networks and minimizing inefficiencies across warehousing, transportation, and inventory control, blockchain contributes to significant cost savings. The removal of redundant intermediaries and manual reconciliation processes reduces overhead expenses. Moreover, streamlined workflows and digitized records enhance operational productivity and reduce the burden of compliance and audits. [7]

Despite its transformative potential and numerous advantages, the implementation of blockchain technology in supply chain management is not without significant challenges and limitations.

These barriers, both technical and organizational in nature, must be critically assessed to ensure realistic expectations and informed decision-making during the adoption process.

1. High Implementation Costs

One of the primary obstacles to the widespread adoption of blockchain solutions lies in the substantial financial investment required for their development and deployment. Establishing a secure and scalable blockchain infrastructure—particularly in complex supply chain environments—necessitates advanced hardware, specialized software development, ongoing system maintenance, and, frequently, the recruitment of highly skilled IT professionals. These upfront and long-term costs can be prohibitively high, especially for small and medium-sized enterprises (SMEs), which may lack the necessary budget or technological capacity to support such innovation. Consequently, the cost factor remains a key deterrent for early-stage adoption in less digitally mature sectors.

2. Complexity of Integration with Existing Systems

Another critical limitation is the technical and operational complexity involved in integrating blockchain platforms with existing enterprise resource planning (ERP), warehouse management systems (WMS), and other legacy IT solutions. Many current logistics and supply systems are not natively compatible with decentralized technologies, and bridging these systems may require significant customization, interoperability protocols, and extended testing cycles. Such complexity not only delays implementation timelines but can also lead to unexpected failures, data synchronization issues, and operational disruptions if not managed properly.

3. Limited Practical Adoption Due to Skill Gaps and Software Availability

While blockchain technology is advancing rapidly, its practical adoption in supply chain contexts is often hindered by a shortage of qualified personnel and limited availability of tailored software solutions. Many organizations, particularly those in traditional manufacturing or logistics sectors, lack internal expertise in distributed ledger technologies. This deficiency creates a dependency on external consultants or vendors, further increasing costs and complicating implementation. Moreover, off-the-shelf blockchain solutions that are specifically designed for logistics operations remain relatively scarce, thereby limiting the technology's applicability and ease of deployment in real-world scenarios.

4. Cybersecurity Risks and Data Privacy Concerns

Although blockchain is frequently praised for its inherent security features, its implementation introduces new vectors for cyber threats, particularly when deployed in conjunction with other technologies such as IoT devices or cloud services. Vulnerabilities may exist at various layers of the technology stack—from poorly coded smart contracts to compromised user interfaces—which can be exploited by malicious actors. Inadequate encryption, authentication mechanisms, or access controls may result in data breaches or manipulation, undermining the trust that blockchain is intended to ensure. Moreover, concerns surrounding the protection of personal and sensitive commercial data—especially in public blockchain environments—necessitate strict compliance with data protection regulations such as the GDPR, which may further complicate implementation.

Figure 1 illustrates a simplified schematic of how blockchain technology operates within the supply chain ecosystem, highlighting the flow of data, verification points, and stages of asset tracking that are made more transparent and secure through distributed ledger systems.

As noted in the study, in 2019, the adoption of blockchain technology increased to 57% among companies with more than 20,000 employees. Blockchain technology has many advantages that make it attractive for use in various industries. One of the key advantages is "transparency". All

transaction data is recorded in blocks that are interconnected and accessible to network participants. This allows you to monitor the process at every stage and eliminates the possibility of changing data without the consent of all participants.

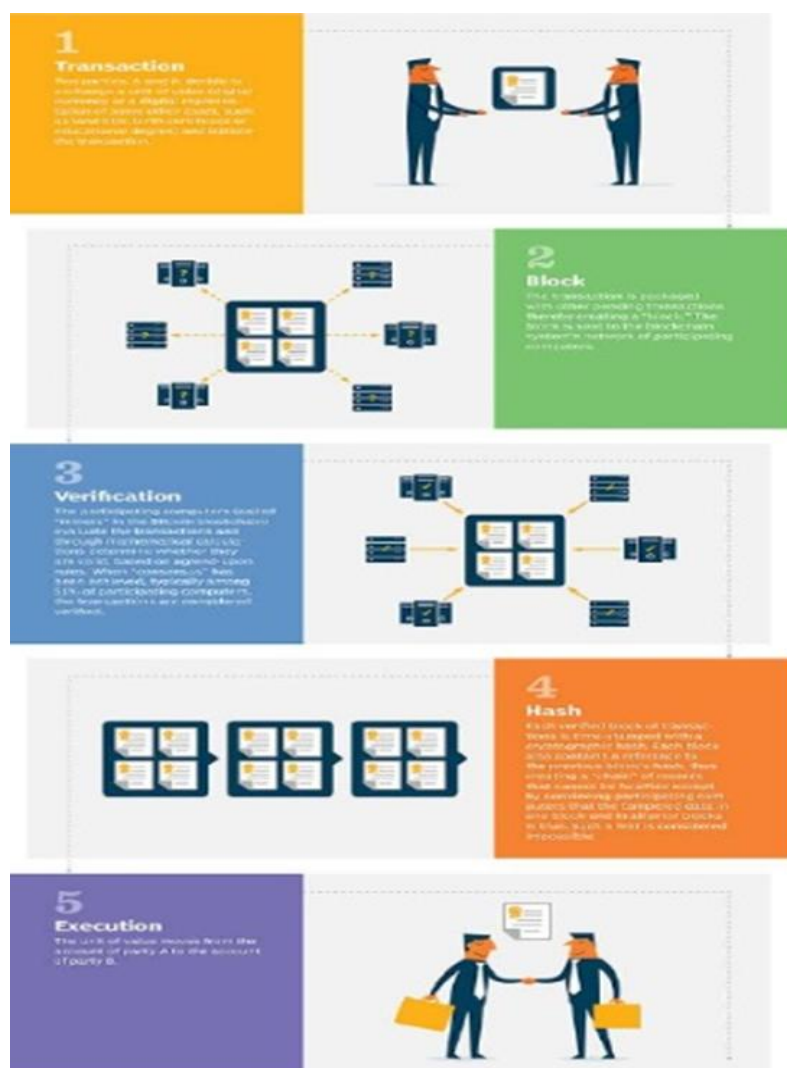


Figure 1. How the blockchain works in the supply chain [7]

Another significant advantage is the "immutability of data". After entering information into the blockchain, it cannot be changed or deleted, which guarantees the safety and accuracy of records. This is especially important for situations where you need to provide an accurate history of all operations or events.

"Data security" is also significantly enhanced through the use of cryptographic security techniques. Blockchain allows you to provide a high level of protection against hacking and unauthorized access, which is especially important for financial and confidential data. Blockchain technology helps to "reduce costs" for operations related to data verification and maintaining centralized systems. By automating and eliminating intermediaries, processes become faster and

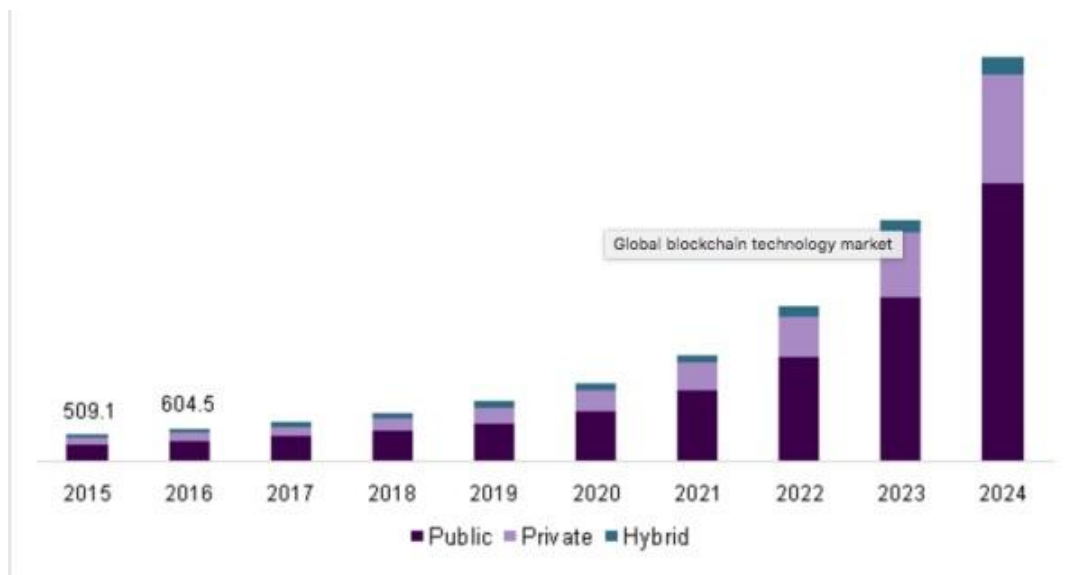
cheaper, which reduces overall costs.

Another important aspect is "decentralization". Unlike traditional systems, where management is concentrated in one center, the blockchain does not have a single point of failure. This makes the system more resistant to attacks and failures, as well as improves its availability and reliability. [8]

Overall, blockchain technology opens up opportunities for increased efficiency, improved security, and transparency, making it useful for many different industries and processes.

The current market for blockchain-based solutions is developing rapidly. The dynamics of the market under consideration can be shown in Figure 1. With the growing demand for greater transparency and reliability of the supply chain in the logistics market, large companies such as IBM are offering large companies operating in various industries to implement development based on blockchain technologies as a trial version.

This technology helps to measure not only the position, but also temperature, humidity and power status in real time.



Note: The results of a worldwide study of patents for blockchain technology

Figure 2. Forecasting the dynamics of the blockchain development market [8]

One of the most striking examples of the use of blockchain technology in international freight transportation was the agreement between the General Bank of Australia (CBA), Wells Fargo, and BRIGHANN Cotton on the supply of cotton from the United States to China. An important feature of this transaction is the use of not only blockchain and smart contracts, but also Internet of Things (IoT) technologies, which allows to increase the efficiency and reliability of the process. This was done as follows: the cotton forwarder left the USA for China, and the GPS sensor tracks the geographical location of the goods. After the container ship arrives at its destination, arrival information is sent via smart contracts uploaded to a private blockchain. This smart contract then starts the transfer process.

One of the most important advantages of this technology is the simultaneous updating of the logistics chain of all participants, so the blockchain helps to combat fraud and delivery errors [9]. Tazhiribe korsetkendey, digital SCM/Logistics-Tags en perspektivaly bagyttardyn biri-Blockchain

technologyasyn koldan. Potentially turde bul technologiya ekonomikalyk kyzmettin barlyk salalaryn kamtidy zhane koptegen kosymshalargaiye. Olardyn ishinde: karzhi zhane economics; materialdyk zhane materialdyk emes activtermen operationalar; memlekettik uyimdar men companyjardagi yesep; logistics zhane zhetkizu tizbegin baskaru (OAU) zhane tagy baskalar.

There are many special applications in the blockchain at the moment. The most popular is Bitcoin, the basis of the cryptocurrency. The virtual registry of Goods (several African countries) or smart contracts (Switzerland) contain blockchain applications. At least, blockchain is the safest and cheapest alternative to the Internet for any company.

In addition, the use of this technology can dramatically change the interaction of companies in the supply chain, as customers have direct information about the products and services of counterparty companies. Investors can finance companies without requiring financial markets. Any information within companies can flow without friction, and behavioral solutions will be fully open. Business models will be radically changed and improved; cost structures will be open, and contracts will be executed seamlessly. Despite the considerable advantages, blockchain technology also poses certain risks and challenges that need to be carefully considered. These include:

- **Complexity of integration:** Integrating blockchain systems with existing IT infrastructure may require significant technical adaptation and retraining of personnel.

- **Data privacy concerns:** Although blockchain offers strong data integrity, ensuring compliance with data protection regulations (such as GDPR) remains a challenge, especially for public blockchains.

- **Cybersecurity threats:** While blockchain is generally secure, vulnerabilities may still exist at the application or smart contract level, making systems susceptible to targeted attacks.

- **Scalability issues:** Public blockchains often face limitations in terms of transaction speed and network capacity, which can hinder their effectiveness in high-volume logistics operations.

To mitigate the high implementation costs associated with blockchain adoption, several strategies can be considered. These include phased integration starting with pilot projects, leveraging open-source blockchain platforms to reduce development expenses, and forming public-private partnerships to share financial and technological resources.

Conclusion

Blockchain technology holds enormous potential to transform the digital economy by offering a secure, transparent, and decentralized infrastructure for data and transactions. Its core features—immutability, decentralization, and automation through smart contracts—enable significant improvements in operational transparency, security, and efficiency across various industries, particularly in logistics and supply chain management.

However, successful large-scale implementation of blockchain requires addressing several key challenges:

- **Scalability of blockchain systems:** Many blockchain platforms face limitations in transaction throughput and network capacity, which can hinder their ability to handle high-volume logistics operations and real-time data processing.

- **Data privacy protection:** Despite the inherent transparency of blockchain, ensuring compliance with data protection regulations and maintaining confidentiality of sensitive information remains complex, especially on public blockchains.

- **Development of technical standards and legal frameworks:** The absence of unified standards and clear legal guidelines creates uncertainty for businesses and slows down adoption.

Regulatory clarity is essential for building trust and encouraging investment.

-Integration with existing legacy systems: Blockchain solutions must seamlessly interact with current IT infrastructures. Technical compatibility and workforce training are crucial to enable smooth integration and operational continuity.

For Kazakhstan, a country actively pursuing digital transformation, the following strategic actions are essential to unlock blockchain's full potential:

-Development of a national regulatory and legal framework to support blockchain innovation, including clear definitions of digital assets, smart contracts, and data governance principles. This will provide a stable environment for businesses and developers to innovate confidently.

-Establishment of comprehensive educational programs aimed at enhancing blockchain literacy and developing specialized skills in the workforce. Collaboration between academic institutions, government, and industry is vital to nurture talent.

-Increased public-private investment in blockchain research, development, and infrastructure, including the creation of state-backed accelerators and innovation hubs to support pilot projects and startups. These initiatives will foster a vibrant ecosystem and facilitate technology scaling.

-Fostering international cooperation to adopt best practices and standards from blockchain-leading countries such as Estonia, Switzerland, and the UAE. Cross-border collaboration will help harmonize regulations and expand market opportunities.

According to recent survey results, 59% of companies in Kazakhstan perceive blockchain as a revolutionary technology, and 52% are prepared to implement it in the near future. This reflects a positive attitude and readiness within the business community, though barriers such as high costs and lack of expertise remain. [10]

With coordinated support from government agencies, the private sector, academia, and international partners, Kazakhstan is well-positioned to leverage blockchain technology to accelerate its digital transformation agenda.

By overcoming current challenges, Kazakhstan can improve transparency, reduce operational costs, and enhance trust across industries, ultimately driving economic growth and strengthening its position in the global digital economy.

Contribution of the authors

Baibusinova M.A. - made a significant contribution to the collection and analysis of literature on continuous robotic manipulators inspired by biological models. His work focuses on the study of the current state of this technology, its application and management issues, which contributes to the development of more flexible and adaptive robotic systems.

Muratbekova G.V. - participated in the development of the concept of work and wrote the text of the article with the presentation of analytical data, ensuring the integrity of all parts of the article.

Amanova M.V. - participated in the critical revision of the content of the article and in the approval of the final version for publication

Mambetalin D.S. - participated in the development of the concept of work and wrote the text of the article with the presentation of analytical data, ensuring the integrity of all parts of the article.

References

1. Yashchenko S. D., Kokhanova V. S. Blockchain technology of the future //Intellectual resources for regional development. - 2018. - No. 1. - pp. 394-396.
2. Bubel A.I. Possibilities of using blockchain and virtual tokens in customs operations // 2016. № 3 (76). Pp. 14-22.
3. Genkin A.S., Mikheev A.A. Blockchain: how it works and what awaits us tomorrow. M.: Alpina Publisher, 2018. 592 p.
4. Strategy "Kazakhstan 2030" [Electronic resource] URL:<https://www.gazeta.uz/ru/2023/09/12/stratery/>. (date of request: 04/20/2024)
5. How blockchain technology will improve transparency and people's access to public services [Electronic resource] URL:<https://www.gazeta.uz/ru/2022/08/26/blockchain/> (date of access: 04/15/2024)
6. Mashchenko P. L., Pilipenko M. O. Blockchain technology and its practical application //Science, technology and education. - 2017. - №. 2 (32). - Pp. 61-64.
7. Blockchain in logistics [Electronic resource] URL: <https://cssrzd.ru/news/blockchein-v-logistike.php>. (date of access: 04/15/2024)
8. M. Kalekeyeva, G. Muratbekova, S. Zhardemky`zy`, A. Albanova. Vnedrenie cifrovyyh tekhnologiy v oblasti passazhirskih i gruzovyh perevozok // Vestnik KazATK №1 (130), 2024. - S. 119-129 / <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-130-1-119-129>
9. How blockchain technology will improve transparency and people's access to public services [Electronic resource] URL: <https://www.gazeta.uz/ru/2022/08/26/blockchain/> (date of access: 04/15/2024)
10. Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

**М.А. Байбусинова¹, Г.В. Муратбекова²,
М.В. Аманова¹, Д.С. Мамбеталин²**

¹*«Халықаралық Көліктік-Гуманитарлық Университеті», Алматы қ., Қазақстан Республикасы*

²*Азаматтық авиация академиясы, Алматы қ., Қазақстан Республикасы*

Қауіпсіздік пен тиімділіктің ашықтығын қамтамасыз етудегі блокчейннің артықшылықтарын зерттеу

Аңдатпа. Соңғы жылдары блокчейн технологиясы әртүрлі үдерістердің ашықтығын, қауіпсіздігін және тиімділігін қамтамасыз ету мүмкіндіктеріне байланысты кең назар аудартуда. Бұл мақалада блокчейнді логистика саласында қолданудың артықшылықтары қарастырылады. Атап айтқанда, операциялық ашықтықты арттыру, деректер қауіпсіздігін күшейту және жабдықтау тізбегіндегі жалпы тиімділікті жақсарту мәселелері талданады. Зерттеуде блокчейн технологиясының негізгі сипаттамалары — децентрализация, жазбалардың өзгермейтіндігі және смарт-келісімшарттарды пайдалану — шығындарды азайту мен қатысушылар арасындағы сенімді арттыруға қалай ықпал ететіні сараланады. Сонымен қатар, мақалада халықаралық тәжірибеге салыстырмалы шолу жасалып, Қазақстанның цифрлық экономикасындағы блокчейнді енгізудің қазіргі жағдайы

бағаланады және масштабталу, жүйелермен біріктіру, құқықтық белгісіздік сияқты негізгі кедергілер көрсетіледі. Блокчейнді дамыту үшін нормативтік-құқықтық базаны әзірлеу, білім беру бастамаларын енгізу және пилоттық жобаларды қолдау сияқты ұсыныстар берілген. Сондай-ақ, логистика саласында блокчейнді енгізуге қатысты нақты жағдайларды (кейстік зерттеулерді) және эмпирикалық бағалауды қамтитын болашақ зерттеу бағыттары ұсынылған.

Түйін сөздер: блокчейн, ашықтық, қауіпсіздік, тиімділік, децентрализация, өнімді бақылау, жеткізу тізбегін басқару, цифрландыру, деректерді қорғау, шығындарды азайту, логистикадағы инновациялар, Қазақстан, смарт-келісімшарттар, цифрлық экономика, нормативтік база, технологияны енгізу.

**М.А. Байбусинова¹, Г.В. Муратбекова², М.В. Аманова¹,
Д.С. Мамбеталин²**

¹*«Международный транспортно-гуманитарный университет, г. Алматы, Казахстан*

²*«Академия гражданской авиации», Алматы, Казахстан*

Исследование преимуществ блокчейна в обеспечении прозрачности безопасности и эффективности

Аннотация. В последние годы технология блокчейн привлекла значительное внимание благодаря своей способности обеспечивать прозрачность, безопасность и эффективность различных процессов. В данной работе рассматриваются преимущества использования блокчейна в логистике, с особым акцентом на повышение прозрачности операций, усиление защиты данных и улучшение общей эффективности процессов в цепочках поставок. В исследовании анализируются основные характеристики технологии блокчейн — такие как децентрализация, неизменяемость записей и использование смарт-контрактов — и их вклад в снижение затрат и укрепление доверия между участниками. Кроме того, представлено сравнительное рассмотрение международного опыта, оценено текущее состояние внедрения блокчейна в цифровую экономику Казахстана, а также выделены основные барьеры, препятствующие его использованию, включая проблемы масштабируемости, сложности интеграции и правовую неопределенность. Предлагаются рекомендации для дальнейшего развития, включая создание нормативной базы, образовательные инициативы и поддержку пилотных проектов. В обзоре также определены перспективные направления для будущих исследований, такие как кейс-стади и эмпирическая оценка применения блокчейна в логистике.

Ключевые слова: блокчейн, прозрачность, безопасность, эффективность, децентрализация, отслеживание продукции, управление цепочками поставок, цифровизация, защита данных, снижение затрат, инновации в логистике, Казахстан, смарт-контракты, цифровая экономика, нормативно-правовая база, внедрение технологий.

References

1. Yashchenko S. D., Kokhanova V. S. Blockchain technology of the future //Intellectual resources for regional development. - 2018. - No. 1. - pp. 394-396.

2. Bubel A.I. Possibilities of using blockchain and virtual tokens in customs operations // 2016. № 3 (76). Pp. 14-22.
3. Genkin A.S., Mikheev A.A. Blockchain: how it works and what awaits us tomorrow. M.: Alpina Publisher, 2018. 592 p.
4. Strategy "Kazakhstan 2030" [Electronic resource] URL: <https://www.gazeta.uz/ru/2023/09/12/strategy/>. (date of request: 04/20/2024)
5. How blockchain technology will improve transparency and people's access to public services [Electronic resource] URL: <https://www.gazeta.uz/ru/2022/08/26/blockchain/> (date of access: 04/15/2024)
6. Mashchenko P. L., Pilipenko M. O. Blockchain technology and its practical application // Science, technology and education. - 2017. - №. 2 (32). - Pp. 61-64.
7. Blockchain in logistics [Electronic resource] URL: <https://cssrzd.ru/news/blockchain-v-logistike.php>. (date of access: 04/15/2024)
8. M. Kalekeyeva, G. Muratbekova, S. Zhardemky`zy`, A. Albanova. Vnedrenie cifrovyyh tekhnologiy v oblasti passazhirskih i gruzovyh perevozok // Vestnik KazATK №1 (130), 2024. - S. 119-129 / <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-130-1-119-129>
9. How blockchain technology will improve transparency and people's access to public services [Electronic resource] URL: <https://www.gazeta.uz/ru/2022/08/26/blockchain/> (date of access: 04/15/2024)
10. Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

Сведения об авторах:

Байбусинова М.А. – магистр наук, «Международный транспортно-гуманитарный университет», мкр. Жетысу-1, 050063, г. Алматы, Республика Казахстан, 8-777-010-00-55, mieruiert.baibusinova@mail.ru

Муратбекова Г.В. – к.т.н., доцент, АО «Академия гражданской авиации», ул. Ахметова 44, 050039, г. Алматы, Республика Казахстан, 8-701-414-04-07, gv170471@mail.ru

Аманова М.В. – к.т.н., доцент, «Международный транспортно-гуманитарный университет», мкр. Жетысу-1, 050063, г. Алматы, Республика Казахстан, 8-777-349-28-44, KUPS_212_kab@mail.ru

Мамбеталин Д.С. – докторант по специальности «Авиационная техника и технологии», АО «Академия гражданской авиации», ул. Ахметова 44, 050039, г. Алматы, Республика Казахстан, 8-777-143-21-87, dk_1187@mail.ru.

Байбусинова М.А. – ғылым магистрі, "Халықаралық Көліктік-Гуманитарлық Университеті" мекемесі, ш / а. Жетісу-1, 050063, Алматы қ., Қазақстан Республикасы,

Муратбекова Г.В. – т.ғ.к., доцент, «Азаматтық авиация академиясы» АҚ, Ахметова көшесі, 44, 050039, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, 8-701-414-04-07, gv170471@mail.ru

Аманова М.В. – т.ғ.к., доцент, "Халықаралық Көліктік-Гуманитарлық Университеті" мекемесі, ш / а. Жетісу-1, 050063, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, 8-777-349-28-44, KUPS_212_kab@mail.ru

Мамбеталин Д.С. – «Авиациялық техника және технологиялар» мамандығының докторанты, «Азаматтық авиация академиясы» АҚ, Ахметова көшесі, 44, 050039, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, 8-777-143-21-87, dk_1187@mail.ru

Baibusinova M.A. – Master of Science, "International Transport and Humanitarian University", md. Zhetysu-1, 050063, Almaty, Kazakhstan, 8-777-010-00-55, mieruiert.baibusinova@mail.ru
Muratbekova G.V. – c.t.s., docent, "Academy of Civil Aviation", st. Akhmetova 44, 050039, Almaty, Republic of Kazakhstan, 8+701-414-04-07, gv170471@mail.ru
Amanova M.V. – c.t.s., docent, "International Transport and Humanitarian University", md. Zhetysu-1, 050063, Almaty, Kazakhstan, 8-777-349-28-44, KUPS_212_kab@mail.ru
Mambetalin D.S. – doctoral student in the specialty "Aviation Engineering and Technology", JSC "Academy of Civil Aviation", st. Akhmetova 44, 050039, Almaty, Kazakhstan, 8-777-143-21-87, dk_1187@mail.ru



Copyright: © 2025 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/>).



МРНТИ 67.01.11

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-79-98>

Научная статья

Особенности адаптивной перестройки зданий и их возможности для новых функций (на примере культовых зданий и сооружений)

Б. Ж. Карпсеитова , С.Ш. Садыкова 

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

E mail: karpseit@gmail.com

Аннотация. В статье проведён анализ адаптивной перестройки культовых зданий и сооружений с учётом их новых функциональных возможностей на примере международного опыта. Основная цель и концепция исследования сосредоточены на анализе реализованных проектов адаптации культовых сооружений, выполненных современными архитекторами и инженерами. Работы и подходы, приведенные в статье, могут быть использованы архитекторами, инженерами, реставраторами и градостроителями при планировании проектов реставрации, реконструкции и перепрофилирования культовых зданий и сооружений. В процессе исследования были приведены примеры адаптации христианских церковных объектов в таких странах, как США, Канада, Великобритания, Франция, Нидерланды и другие. Исследование демонстрирует, как исторические сооружения могут быть успешно адаптированы для современных нужд, сохраняя их историческое и культурное наследие, что немаловажно для устойчивого развития городов. Приспособление церковных пространств для новых функций (музеи, выставочные залы, концертные залы, библиотеки и т.д.) предоставляет возможность для социального взаимодействия, культурного обмена и экономического развития. Исследование позволяет углубить понимание трансформации сакральных пространств и их интеграции в повседневную жизнь, расширяя границы архитектурной теории.

Ключевые слова: адаптация, реконструкция, культовые здания и сооружения, церковь, функциональное назначение, экономический фактор, международный опыт.

Введение

В настоящее время формирование процессов адаптации исторических зданий под новые функции является одной из актуальных областей современной архитектурной деятельности. Особенно ярко этот процесс проявляется в среде религиозно-культовых сооружений, практически по всему миру. Церковные здания и сооружения более двух тысяч лет являются неотъемлемой частью христианской религии и веры. На всем протяжении своего развития архитектура культовых сооружений показывала свою незыблемость и устойчивость с точки зрения своего главного функционального назначения, но с начала XX века революционные изменения, произошедшие в социальном и экономическом развитии общества, привели к процессам трансформации их назначения и адаптации к новым функциям. Сегодня история развития архитектуры культовых сооружений очень часто отражает эти процессы. Например, одним из таких объектов является церковь Святого Петра, расположенная на юге Турции, в городе Антакья. Церковь является пещерной, так как находится в скале горы Стариус. Глубина помещения церкви 13 м, ширина 9,5 м, а высота 7 м. По одной из версий, этой пещерой пользовались первые христиане, и она является одной из старейших христианских церквей. Самые старые, сохранившиеся части церковного комплекса датируются IV-м или V-м веком. К ним относятся некоторые фрагменты напольной мозаики и следы фресок на правой стороне алтаря. Существует подземный туннель, выходящий на горный склон, который служил христианам для эвакуации церкви в случае внезапных набегов и нападений. Вода, которая просачивается из близлежащих скал, собиралась внутри, чтобы пить и использовать для крещения; прихожане, посещавшие этот храм, собирали эту воду для больных (полагая, что она целебная), поток уменьшился в результате частых землетрясений. С тех пор данная церковь претерпела ряд функциональных адаптаций от мест погребения до музея. В настоящее время данная церковь является музеем, однако здесь возможно выполнить церковные обряды под наблюдением музейных работников, получив предварительно разрешение от администрации муниципалитета [1].

Процессы функционального переформатирования религиозно-культовых сооружений имеют под собой объективные корни и имеют тенденцию роста. По сведениям Christian Research ситуация с посещаемостью и ростом прихожан постоянно колеблется, что ведёт к значительному сокращению и не использованию зданий церквей. А значит и к дальнейшему закрытию данных зданий [2]. Согласно исследованию The Guardian [3], в Англии около 20 церквей каждый год закрываются для богослужений. Схожая ситуация сложилась и в Германии, где с 1990 по 2010 год Евангелическая церковь Германии закрыла 340 церквей, из которых 46 были разрушены. Оставшиеся здания были переоборудованы в различные объекты, включая культурные центры, спортивные залы, а также мечети. Финансовый руководитель этой организации отметил, что в будущем Евангелической церкви Германии, возможно, придётся закрыть около 1000 зданий. Подобная тенденция сокращения числа религиозных учреждений наблюдается также в Нидерландах, Бельгии, Дании, Швеции и других странах [4]. Тенденция закрытия церквей наблюдается не только в Европейских странах, но и в Северной Америке [5.] В США в 2019 году закрылось около 4500 протестантских церквей, но вместе с этим, по данным Lifeway Research, открылось около 3000 новых [6], [7]. Анализ многочисленных аспектов, влияющих на изменения функционального содержания сооружений культового назначения, позволил выделить

основные пять факторов, влияющих на данную тенденцию. Среди них - большой спектр социально-экономических причин, например, таких, как: снижение религиозной активности, высокие затраты на содержание религиозных зданий, снижение интереса к религиозным традициям и т.п. (Рисунок 1):



Рисунок 1. Факторы, влияющие на закрытие церквей. (Схема автора)

Данные факторы заставляют задуматься, что же делать с пустующими зданиями церквей? Эти вопросы поднимают местная городская администрация, жители, проживающие в данной местности, благотворительные организации по защите памятников истории и архитектуры. Единственным рациональным решением является адаптация данных зданий и сооружений под новые функциональные нужды, с акцентом на обеспечение их экономической рентабельности. Помимо общественного решения, стоит обратиться к официальным религиозным документам и заявлениям, регламентирующим допустимость использования церковных зданий в иных целях. Так, например, согласно Кодексу Канонического Права Ватикана, книга IV. «Функция церкви», Канон 1222, §1: «Если церковь более не может использоваться никаким образом для богослужений и нет возможности её восстановить, епархиальный епископ может передать её для мирского, но не уничижительного (не постыдного) использования».

Тут же в следующем параграфе §2 пишется: Если существуют другие серьёзные причины, по которым церковь больше не должна использоваться для богослужения, епархиальный епископ, выслушав совет пресвитеров, может передать её для мирского, но не уничижительного использования - при условии согласия тех, кто законно обладает правами на эту церковь, и при условии, что от этого не пострадает духовное благо верующих [8]. Действующие канонические нормы Англиканской церкви изложены в «Акте о миссии и пастырском устройении 2011 года», также допускается возможность изменения функционального назначения церковных зданий. Данная процедура регламентируется рядом положений, в частности, параграфами §61 и §62, в которых определены условия и ограничения, обеспечивающие уважительное отношение к сакральному статусу объектов [9]. Что касается лютеранских, пресвитерианских и ряда других христианских конфессий,

то их подход к изменению функционального назначения церковных зданий отличается большей прагматичностью и гибкостью.

Либеральный подход церковных властей к возможности изменения функционального назначения церковных зданий способствует формированию положительного восприятия данной тенденции среди местного населения. Также стоит отметить, что в условиях устойчивой политики европейских стран, направленной на модернизацию застроенной среды с целью снижения энергопотребления и выбросов, практика повторного использования неэксплуатируемых или заброшенных объектов приобретает особую актуальность и подтверждает свою эффективность в рамках экологического и экономического развития.

Теоретической базой данного исследования послужила информация из следующих источников: важность сохранения историко-культурного наследия в процессе адаптации культовых сооружений отражены в работах Gerry Stacey, 2018, Harriet Sherwood, 2021. [2], [3]. Примеры преобразования церквей в спортивные залы, музеи, библиотеки, концертные и выставочные залы в работах архитекторов Mackenzie Goldberg, 2019; David Barbaix, 2013; Michael Hsu, 2022; David McManus, 2013. [10], [12], [18], [19]. Примеры адаптации из США, Великобритании, Германии и Нидерландов демонстрируют разнообразие подходов и решений, применяемых архитекторами и реставраторами для сохранения исторической ценности объектов при их функциональной трансформации. Анализ работ современных архитекторов, таких, как Jouin Manku, Bolles-Wilson, Julia Bolles-Wilson, Peter Wilson, Michael Hsu и других, показывает, что успешная адаптация требует сочетания инженерных инноваций и уважения к оригинальной существующей структуре зданий [17], [18], [20]. Исследования также акцентируют внимание на экономических аспектах адаптации, поскольку многие проекты направлены на создание устойчивых и самокупаемых объектов: это труды Mackenzie Goldberg, 2019; David Barbaix, 2013; Dominic Martin, 2016. [10], [12], [27]. Таким образом, обзор существующих исследований и практических работ демонстрирует, что адаптация культовых сооружений требует комплексного подхода, включающего культурные, экономические и социальные аспекты. В данной статье проводится анализ ключевых проектов адаптивной перестройки культовых зданий, отражающих международный опыт и инновационные практики, применяемые в современных условиях.

Методология

Методика данного исследования основывается на комплексном подходе к изучению адаптивной архитектуры зданий, отраженной на примерах религиозно-культовых сооружений.

В качестве методов исследования использовались:

- изучение и систематизация литературных и интернет-источников по данной тематике;
- анализ и поиск причин, побуждающие к закрытиям церквей;
- анализ исторической ценности и влияние на социальный аспект;
- анализ церквей, адаптированных под новые функциональные возможности с учётом современных требований и возможностей. Исследование позволило выявить ключевые тренды и особенности эволюции культовой архитектуры, а также оценить потенциал ее

адаптации для новых функциональных задач.

Результаты и обсуждения

Адаптация и реконструкция церквей - это вынужденная практика для многих Европейских стран. Деконсекреация церквей приводит в упадок некогда величественные по своей архитектуре здания и сооружения, и для современных архитекторов главной целью остается сохранить это наследие для следующих поколений. Адаптация и перестройка зданий - это постоянно развивающаяся область в архитектурной практике. Как в развитых, так и в развивающихся городах изменения функционального назначения здания определяются, исходя из многих причин, но основополагающими среди них являются социальные-экономические трансформации. С течением времени многие здания требуют переосмысления с учётом современных потребностей города, и основная цель адаптации - это соответствовать современным требованиям эксплуатации. А если говорить о церквях, то тут основная цель - это сохранить культурное и историческое наследие. Церкви с древних времен являлись неотъемлемой частью развития городской среды и оказывали влияние на экономическую, социальную, культурную, психологическую и эстетическую сферы жизни христианского мира. Изучая международный опыт адаптации и реконструкции религиозно-культовых зданий и сооружений, можно прийти к выводу, что было сформировано несколько путей решения этой задачи, например, музеефикация, сохранение уникального оборудования, приспособление под жилые и общественные нужды и т.п. (Рисунок 2).



Рисунок 2. Пути решения адаптации культовых зданий и сооружений.

Церковные исторические здания всегда внушают благоговение, даже когда они заброшены, покинуты и полуразрушены. Часть из церквей, что закрыты давно и не пригодны для восстановления, к сожалению, сносятся. Другие преобразуются, часто местными органами управления или частными владельцами. То, насколько сохранится их религиозный колорит, зависит от состояния, в котором они находятся, подхода

архитектора и потребностей нового частного владельца. Исследование этого вопроса выявляет много инновационных способов перепрофилирования церквей по всему миру. Один из нетрадиционных подходов к адаптации служит Епископальная протестантская церковь Богоявления, расположенная в Чикаго, США. Церковь адаптирована под «храм баскетбола», и не только, в бывшем здании церкви функционирует реабилитационный центр для наркозависимых людей, также там проводятся культурные мероприятия, концерты, выставки, частные вечеринки, банкеты и прочее. (Рисунок 3). Здание церкви Богоявления была построено в 1895 году архитектором Фрэнсис Мередит Уайтхаусом (1848-1938) из чикагской фирмы Burling and Whitehouse. Церковь была построена в романском стиле.

Церковь Богоявления в Чикаго функционировала в своём первичном назначении до 2011 года. Когда количество прихожан значительно сократилось, это привело к решению о закрытии прихода.

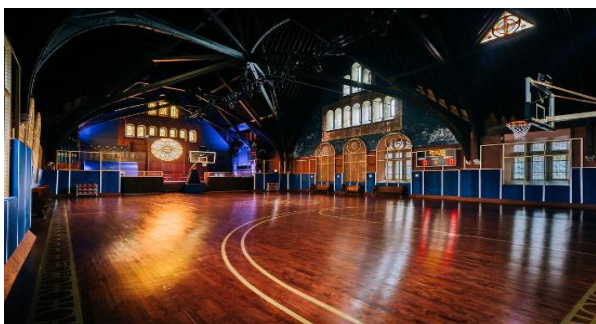


Рисунок 3. Баскетбольный центр, Чикаго, США. (Фото: Mo Daoud) [10,11]

Период запустения здания оказался недолгим: в 2018 году оно было преобразовано благодаря инновационной инициативе компании Nike. Интерьер нового спортивного зала органично сочетает современный дизайн с историческими элементами здания, где витражи и высокие стрельчатые своды потолка удивительно гармонируют с баскетбольными кольцами и стеллажами для мячей. Во внешнем облике церкви особых изменений не произошло, что позволило сохранить исторический облик культового сооружения. Вместе с этим следует отметить, что данный пример адаптации отражает крайнюю степень функциональной переориентации религиозно-культового сооружения. [10] [11].

Следующий пример, демонстрирующий современные методы адаптации, это одна из старых церквей в городе Зволле, Нидерланды. (Рисунок 4). Доминиканская церковь была построена в 1466 году. Однако, несмотря на свою многовековую историю, в течение последних 30 лет, начиная с 1982 года, здание оставалось без присмотра и постепенно разрушалось. В 2007 году здание церкви было продано с целью открытия внутри книжного магазина, так здание получило вторую жизнь. Это инновационная концепция книжного магазина. Следует отметить, что площадь церкви была значительной, что способствовало созданию масштабного магазина. Проект был реализован архитектурным бюро ВК Architecten. Архитекторам удалось сохранить аутентичную архитектуру здания, сохранить встроенный действующий орган. Витражи были восстановлены норвежским мастером

Кьеллом Нупеном. Помимо продаж книг, просторное пространство также используется для проведения концертов и общественно-культурных мероприятий. Таким образом, здесь мы наблюдаем увеличение функциональных возможностей бывшей церкви. Открыл свои двери для широкой публики книжный магазин «Waanders In de Broeren» в 2013 году. Согласно проекта реконструкции здания церкви было решено добавить 700 кв.м. торговых этажей.



Рисунок 4. Книжный магазин, Зволле, Нидерланды. (Фото Joop van Putten, Hans Westerink) [12]

Эти дополнительных 3 этажа разместили в боковом крыле церкви между оригинальными колоннами, снаружи центрального каркаса. Конструкция этих этажей не связана с церковью, поэтому в будущем есть возможность убрать надстроенные этажи, не снося здание. [12]. Анализ адаптационного переустройства бывшей церкви в городе Зволле показывает пример бережного отношения к интерьерам культового здания, позволившим сохранить историческую стилистику архитектурного памятника. Новые интерьеры книжного магазина полностью сохранили великолепную аркаду бывшего молебного пространства церкви.



Рисунок 5. Пивоварня, ресторан, Питтсбург, США. (Фото www.churchbrew.com) [13]

Исследование римско-католической церкви Святого Иоанна Крестителя в Питтсбурге, штат Пенсильвания, США, показывает пример адаптации религиозного здания под пивоварню с рестораном. (Рисунок 5). Здание религиозно-культового сооружения было построено в 1902 году и использовалось как церковь до 1993 года. Закрытие церкви было объявлено епархией Питтсбурга в 1993 году, а двери нового адаптированного здания открылись только 2006 году. Закрытие данной церкви и монастыря было обусловлено экономическим кризисом, начавшимся в регионе во второй половине XX века. В силу того, что данное сооружение является объектом культурного наследия, любые изменения в его

внешнем облике и интерьере были строго запрещены. Тем не менее интерьер остался в аутентичном церковном оформлении, что позволяет посетителям наслаждаться ужином в исторической атмосфере. Эта инициатива вызвала негативную реакцию в епархии, что привело к принятию законодательных мер, обязывающих владельцев согласовывать проекты с представителями церкви даже после приобретения религиозного здания. Однако данное нововведение не затронуло функционирование ресторана и пивоварни Brew Works [13].

Одним из интересных примеров адаптации культовых сооружений под новые функции является здание часовни, построенное в 1872 году и внесенное в список объектов культурного наследия города Лимбург, Бельгия. Теперь это архитектурная студия, офис и место для проведения общественных мероприятий архитектурной фирмы Klaarchitectuur. Когда архитектурная фирма взялась за проект, часовня была в аварийном состоянии, и они оставили большую часть экстерьеров здания такими, какими они были до реконструкции (Рисунок 6).

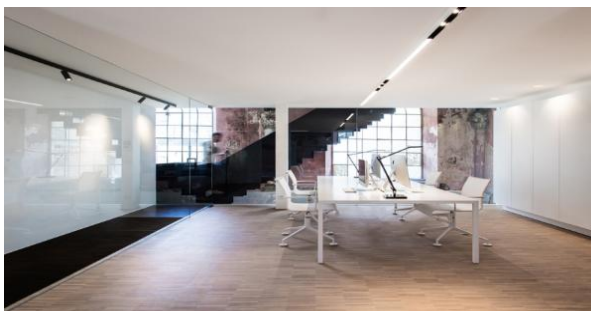


Рисунок 6. Архитектурная студия компании Klaarchitectuur, Лимбург, Бельгия. (Фото: Toon Grobets, Marc Scheepers, Flos&Beeldpunt) [14, 15]

Бельгийское архитектурное бюро Klaarchitectuur завершило проект реконструкции «The Waterdog», в рамках которого историческая часовня в Бельгии была преобразована в совместное офисное пространство. Проект включает общественные пространства и многоярусные объёмы с рабочими местами, открывая историческое здание для широкой публики с целью проведения различных мероприятий. Стратегия дизайна включала сохранение большого открытого пространства в центре старой часовни. Хотя здание, в первую очередь, является офисным помещением для архитекторов из Klaarchitectuur, интеграция общественных зон позволяет общественности взаимодействовать с частью исторической архитектуры города. Из-за статуса часовни как памятника архитектуры проект реконструкции был связан рядом ограничений. Klaarchitectuur постарались сохранить исторический облик здания, возведя совершенно новую конструкцию с нуля, полностью отдельную от исторического здания. Новая конструкция резко контрастирует со старой, гарантируя, что прошлое будет ярко выражено по сравнению с новым дизайном. Офисы расположены на разных уровнях, создавая разнообразие пространств для разных отделов компании. Благодаря размещению рабочих помещений в объёмах внутри старой часовни освободилось большое открытое пространство, где изысканные и современные материалы определяют интерьер внутреннего пространства. [14], [15]. В итоге анализ формирования адаптационных принципов в здании бывшей часовни в Лимбурге, выявляет

более смелые архитектурные подходы, когда в исторический контекст здания вплетаются ультрасовременные элементы – нависающая объемная консоль над входом и белоснежные интерьеры в стиле хай-тек.

Иной подход выполнен при адаптации монастырского комплекса Приорат Сен-Лазар в долине реки Луары. (Рисунок 7). Комплекс является частью реконструкции аббатства Фонтевро и четырёх окружающих его приорств, которые составляют монастырский комплекс, датируемый средними веками. Агентство Jouin Manku преобразовало интерьер приората Сен-Лазар в отель и ресторан. Дизайнеры представили изготовленную на заказ отдельно стоящую мебель для разделения пространства в часовне, доме капитула и трапезной, а последняя теперь является банкетным залом с обеденным столом длиной 8 м.

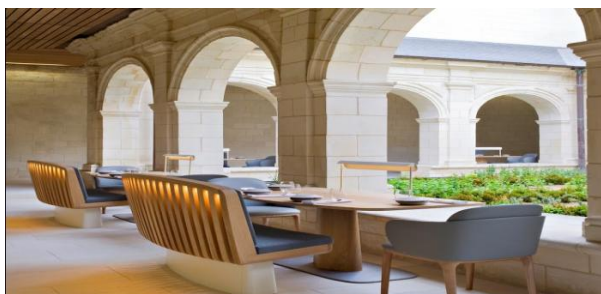


Рисунок 7. Отель и ресторан в долине Луары. Франция. (Фото: Николя Матеус) [16,17]

Основанное в 1101 году Робертом Д'Арбрисселем, харизматичным и иконоборческим проповедником, аббатство на протяжении семи столетий служило местом обитания необычной монашеской общины. В начале XIX века Наполеон приказал превратить аббатство в тюрьму. В 1963 году тюрьма была закрыта, и началась серьёзная реставрация зданий комплекса. В 1975 году Королевское аббатство Фонтевро открылось для публики, положив конец девяти векам жизни за закрытыми дверями и открыв путь в «идеальный город». Он полностью включает в себя различные элементы: от культурной активности до устойчивости и цифровых инноваций. Проект реконструкции монастыря Сен-Лазар, одобренный Комиссией по историческим памятникам, начался в 2012 году под руководством архитектора-шефа по историческим памятникам Габора Местера де Параджа и Жуэна Манку. В течение двух лет они изобретательно преобразовывали здание, являющееся объектом культурного наследия, в отель-ресторан, не меняя его первоначальную оболочку. Были сделаны значительные дополнения, такие, как реконструкция контрфорсов и башни, а также реставрация отсутствующих элементов, таких, как кельи общежития Бурдонне с их планировкой 1504 года. Также были внесены изменения в планировке помещений, чтобы обеспечить бесперебойный поток движения посетителей и обслуживающего персонала [16], [17]. Возможность для адаптации получило и здание церкви, построенное в 1940-х годах в Хьюстоне, штат Техас (Рисунок 8).

Ресторан и коптильня Logo - это сеть азиатских коптильных, известных как Smoke house. Главный фасад отделан красным кирпичом, с подоконниками из тёсаного камня и высокой скатной крышей. Дизайн фирмы «отдаёт дань обширному пространству святилища и сохраняет существующие деревянные фермы», - говорит архитектор Майкл Сю.

Новые окна и световые люки в крышах приносят больше естественного света в ранее

тёмный интерьер.



Рисунок 8. Ресторан в Хьюстоне, США. (Фото: Чейз Дэниел) [18]

Архитектурное бюро Michael Hsu Office of Architecture курировало адаптацию и реконструкцию данного здания. В ходе этой работе были сохранены многие из его оригинальных особенностей, включая открытые деревянные стропила и конструктивные фронтоны, один из которых был подчеркнут облицовкой из красного кедра и деревянным решетчатым покрытием. Здание, имеющее в плане форму буквы L, состоит из фронтонных объёмов, расположенных вокруг открытого пространства. Оригинальные элементы сохранены, включали святилище со сводчатым потолком и открытыми деревянными фермами. Архитектор хотел отдать дань уважения истории здания, в то же время включив элементы, соответствующие стилю и характеру бренда ресторана Logo. Учитывая эти факторы, архитекторы переосмыслили внешний вид и интерьер здания [18].



Рисунок 9. Детский сад, Мюнстер, Германия (фото: Markus Hauschild, Ahlbrand-Dornseif + Wakonigg, Christian Richters) [19]

Примером адаптации религиозно-культового сооружения в детское дошкольное учреждение является церковь Святого Себастьяна, построенная в 1962 г. в городе Мюнстер, Германия. Церковь просуществовала в своем изначальном виде до 2008 года, позже адаптацией и перестройкой церкви занималось архитектурное бюро «BOLLES+WILSON Architects». Когда церковь было секуляризирована, было принято инвестиционное решение сделать из данной церкви детский сад (Рисунок 9). Детский сад с тремя групповыми комнатами на первом этаже и двумя группами на втором этаже. Пространство от перекрытия первых этажей становятся игровыми площадками — внутри бывшего

церковного пространство. Существующий фасад перфорирован сеткой из отверстий 50 x 50 см, которые большую часть времени остаются открытыми, обеспечивая постоянную и здоровую вентиляцию через эту внутреннюю/внешнюю «игровую комнату». Помещение прохладно зимой, умеренно теплое летом, что позволяет проводить игры детей «на улице», оставаясь при этом в помещении. Первоначальная крыша была переделана, там установили промышленные световые люки, которые заливают внутреннюю игровую площадку естественным освещением. В сумерках уличные фонари освещают эту игровую площадку и создают впечатление общественного пространства [19], [20]. Данный пример демонстрирует адаптацию более новой постройки, в отличие от исторических памятников культовой архитектуры, тем не менее функциональное назначение потеряло свое значение, в связи с чем здание было трансформировано под новые функции.

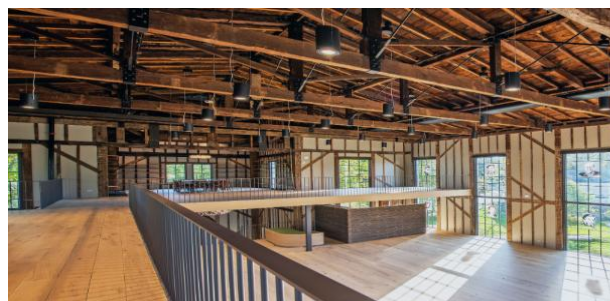


Рисунок 10. Центр искусств в Саг-Харборе в Хэмптоне, США. (Фото: с сайта центра) [21, 22]

Совершенно необычный подход был применен для методистской церкви 1844 года в Саг-Харборе в Хэмптонсе, штат Нью-Йорк, которое было построено в итальянском стиле и переоборудовано в Центр искусств. Здание было заброшено и несколько раз продано, начиная с 2007 года (Рисунок 10). Для выполнения проекта реконструкции и адаптации была выбрана фирма Skolnick Architecture&Design, и руководящим принципом всех было установление гармонии между «каркасом» оригинального здания и современными элементами, внедренных в процессе модернизации, таких, как большие стеклянные витражи и стеклянный лифт. Дизайнер Ли Сколник спроектировал новые окна с прекрасными пропорциями, оставив место для вдохновенных портретов Эрика Фишла. Сейчас в окнах вставлены портреты писателей, художников, изобретателей, архитекторов и других людей, которые как-то повлияли на развитие и были связаны с городком Саг-Харбором. Мезонин церкви — это новое дополнение к зданию. На мезонине вы также найдёте местную библиотеку, доступную для общего просмотра, предлагающую книги, пожертвованные спонсорами. Снаружи имеется небольшой сад, он спроектирован для многоцелевого использования. Архитекторы надеялись, что люди будут пользоваться данным садом и наслаждаться зелеными насаждениями и оригинальной садово-парковой мебелью [21], [22]. Примером перевоплощения в дом высокой моды *Maria Fiorello* является церковь Святого Дара Сан-Лоренцо-ин-Лючина. Это неосвященное молельное здание в Риме, в районе Кампо Марцио, на улице Виа Бельсиана (Рисунок 11). Церковь была построена в 1578 году при Григории XIII братством Святого Причастия. Изначально строилась как молельня, пристроенная к дому братства Святого Причастия Сан-Лоренцо-

ин-Лючина. С конца 19-го до начала 20-го века здесь проходили концерты музыки в стиле барокко.



Рисунок 11. Дом высокой моды, Рим, Италия (фото Maria Fiorello) [23,24]

Деконсекрация церкви произошла в 1970 году, когда она стала общественным местом, а дом братства, расположенный позади церкви, используется в гражданских целях. Данная церковь узнаваема по внешнему виду и надписи, относящейся к Архибратству Святого Причастия Сан-Лоренцо-ин-Лючина, называемая «Оратория Дель Сантиссимо Сакраменто». Внутри церкви находился алтарь с полотном, изображающим мученичество Сан-Лоренцо. С конца XIX века он стал местом встреч различных ассоциаций, помещением для музыкальной деятельности, а с 1971 года окончательно продан частным лицам. В настоящее время церковь трансформирована в ателье «*Maria Fiorello*». Анализ интерьерного решения показывает, что архитекторы стремились сохранить исторический колорит здания, выполненного в стиле итальянского классицизма. Например, сохранена роспись потолка восемнадцатого века [23], [24].

Следующий пример - это церковь Святого Сен-Дени-дю-Плато, замечательное творение покойного архитектора Жана-Мари Руа, построенное в 1964 году. (Рисунок 12). Преобразование и расширение такого красноречивого примера современного архитектурного наследия Квебека - очень деликатная адаптация.

Церковь Святого Сен-Дени-дю-Плато заслуживает особого внимания из-за своего необычного, динамичного объёма, напоминающего огромную палатку, надутую ветром и прикреплённую к земле натяжителями. В нефе церкви расположены общественные помещения библиотеки с полками, рабочими зонами и зонами для чтения, а в пристройке расположены администрация и общественный зал. Такое разделение функций означает, что общественный зал может оставаться открытым вне часов работы библиотеки, при этом впечатляющий и монументальный объём нефа сохраняется, поскольку архитектурная концепция состоит в том, чтобы превратить пространство в модель пространственного присвоения как новую интерпретацию интерьера. Чтобы подчеркнуть плавность этого объёма, сплошной потолок над окном был заменён стеклянной панелью, которая позволяет каждой балке визуально плавно скользить по её внешнему стальному основанию, что демонстрирует визуальную непрерывность. Объём, заменяющий пресвитерий и общественный зал, занимает ту же площадь и выполнен из прозрачных

панелей из цветного стекла с шелкографией. От библиотеки она отделена пустотой, обозначающей переход от старого к новому.



Рисунок 12. Библиотека в Квебеке, Канада (Фото: Стефан Гроло) [25,26]

Спереди, расширяя структуру хора и навеса, аварийная лестница, требуемая нормами, размещена в ограждении из цветного стекла, сигнализируя о новом месте, доминируя над новым парком, изменённым с помощью уличной мебели, деревьев и другой зелени. Опираясь на прозрачность и отражение, архитекторы сделали яркое заявление с помощью цвета на концах здания, намекая на яркие, смелые цвета 1960-х годов, которые контрастируют с белизной и блеском, недавно отражёнными в замечательной форме оригинальной церкви [25], [26].



Рисунок 13. Центр скалолазания Vertige Escalade в Квебеке, Канада. (Фото: Чарльз Дион), [27]

Рассмотрим еще одну архитектурную адаптацию церкви Христа-Руха, построенной в городе Шербрук, Квебек, в 1940-х годах по проекту инженера-строителя Альфонса Беланже. Это пример перепрофилирования религиозно-культовой функции церкви в спортивную. Последняя месса была отслужена в 2006 году, а церковь закрылась и была продана. Компания Vertige Escalade Inc теперь управляет ею как скалодромом. В проекте архитектурной фирмы Carlo Rondina скалодромы расположены по периметру в обширном центральном блоке бывшей церкви. Религиозные элементы были удалены, церковные росписи на стенах были заменены изображениями разных видов спорта. Нижние арочные витражи заменены на прозрачное стекло для увеличения естественного освещения.

Алтарь удалять не стали, его скрыли за скалодромом. (Рисунок 13). Сводчатые потолки бывшего собора в стиле неоготики высокие и обеспечивают хороший угол для искусственной стены для скалолазания. Витражные окна могут создать сюрреалистический спектр света, внутрь которого можно проникнуть. Впечатляет также отсутствие колонн, поддерживающих корпус церкви из железобетона, в то время как мы повсюду видим обрамление итальянским мрамором, неф и алтарь также были выполнены из мрамора. В задней части церкви на деревянном навесе находится большая мозаика, изображающая Христа на кресте в окружении земных и небесных элементов. Хотя изначально не все окна были украшены витражами, в период с 1996 по 2000 год они были преобразованы и отреставрированы священником Жан-Полем Фортье и консьержем Франсуа Флери [27].

Другой пример адаптации культового сооружения в спортивное - это церковь, переоборудованная под скейтпарк. Когда скейтбордисты пытаются выполнить воздушный трюк в северном испанском городе Льянера, они сталкиваются с фресками, которые редко можно увидеть в церкви неороманского плана с неоготическими деталями. Но это вековое здание, построенное в 1912 году теперь известно, как Las Iglesia Skate. (Рисунок 14).



Рисунок 14. Скейтпарк Las Iglesia в Льянере, Испания (фото: Getty Images) [28]

Католический храм, не видевший прихожан с 1939 года, стоял разрушенный. Скейтеры объединились и несколько лет договаривались с властями, а потом с помощью онлайн-сбора средств и поддержки спонсора спасли здание, превратив его в одно из самых современных мест для катания. Рампа идеально вписалась между стенами церкви. Сейчас La Iglesia Skate - место паломничества поклонников скейт-культуры и любителей современного искусства, желающих стать свидетелями уникального завоевания классической церкви городским искусством. Город приобрёл вместо ветхого и пустого здания спортивную достопримечательность. Испанский художник Окуда Сан Мигель визуализировал дух новой La Iglesia Skate (скейт-церкви) – он расписал высокие своды яркими граффити. Так разрушенная церковь превратилась в храм уличного искусства. Здание, снаружи холодное, как туманное астурийское утро, а внутри тёплое, как объятия. Где, просто ступив ногой внутрь, его цвета наполняют ваше сердце, и вы начинаете вдыхать хорошие вибрации. Пространство, которое стало мечтой для группы молодых людей,

которые усилиями и трудом воплотили её в жизнь [28], [29].

Заключение

Церкви обладают уникальной архитектурной ценностью. Эти сооружения представляют собой пример высокого мастерства строительных технологий своего времени, служат источником вдохновения для современных архитекторов и инженеров. Анализ адаптации культовых зданий под новые функции на примере христианских церквей демонстрирует тенденцию к сохранению их первоначальных архитектурных форм и масштабов.

При этом наблюдается значительная эволюция внутренней планировки, обусловленная изменяющимися функциональными требованиями. Несмотря на модификации, центральное пространство, традиционно предназначенное для собраний общины, продолжает играть ключевую роль в архитектурной композиции. Современные технологии успешно интегрируются в существующую архитектурную среду, не нарушая ее исторической целостности. Особого внимания заслуживает синтез традиционных строительных материалов, характерных для эпохи возведения этих церквей, с современными материалами и технологиями. Такое сочетание позволяет не только сохранить историческую аутентичность зданий, но и обеспечить их долговечность и функциональность в современных условиях. Применение инновационных решений способствует рациональному использованию ресурсов и снижению экологической нагрузки. Таким образом, реставрация культовых зданий становится примером успешного сочетания традиций и инноваций, способствующего сохранению культурного наследия и устойчивого развития местности.

Вклад авторов:

Карпсеитова Б. Ж. – концепция, идея, модель и дизайн исследования, сбор и анализ данных, написание текста, критический пересмотр его содержания, утверждение окончательной версии.

Садыкова С.Ш. – критический обзор и пересмотр содержания, написание текста, утверждение окончательной версии.

Список литературы

1. Clyde E. Fant, Mitchell G. Reddish, A Guide to Biblical Sites in Greece and Turkey, (Oxford University Press, США, 2003 г.)
2. Gerry Stacey, Christian Research. (2018), доступ по адресу: <https://www.christian-research.org/reports/archives-and-statistics/uk-church-overview/>. (дата обращения: 15.11. 2024 г.)
3. Harriet Sherwood. Вопросам культуры и искусства, (2021), доступ по адресу: <https://www.theguardian.com/world/2021/jan/05/c-of-e-bishop-warns-of-church-closures-due-to-covid-financial-losses>. (дата обращения: 15.11. 2024 г.)
4. О. Поздняк, Европа избавляется от церквей, (2017), доступ по адресу: https://www.ng.ru/ng_religii/. (дата обращения: 28.11. 2024 г.)
5. Scott Neuman, Верующие видят одновременно кризис и возможности в закрытии церквей по всей стране (2023), доступ по адресу: <https://www.npr.org/2023/05/17/1175452002/church-closings-religious-affiliation>, (дата обращения: 15.11.2024 г.)

6. Y. Bonesteele, Когда закрывается одна церковная дверь, (Lifeway Christian Resources, 2021), доступ по адресу: <https://research.lifeway.com/2021/06/11/when-one-church-door-closes/>, (дата обращения: 11.11.2024 г.)
7. Aaron Earls, В США закрытие протестантских церквей опережает число открытий, (2021), доступ по адресу: <https://research.lifeway.com/2021/05/25/protestant-church-closures-outpace-openings-in-u-s/>, (дата обращения: 19.11.2024 г.)
8. Канон Ватикана, Code of Canon Law Vatican - Book IV - Function of the Church: Part III: Sacred places and times (Cann. 1205-1243), доступ по адресу: www.vatican.va/archive/cod-iuris-cononici/eng/documents/cic_lib4-cann1205-1243_en_§1,2.
9. Канон англиканской церкви, Mission and Pastoral Measure, (2011), доступ по адресу: <https://savetheparish.com/wp-content/uploads/2023/09/Mission-and-Pastoral-Measure-2011.pdf>, §61, 62
10. Mackenzie Goldberg, Nike превращает историческую чикагскую церковь в баскетбольную площадку для юных баскетболистов, (2019), доступ по адресу: <https://archinect.com/news/article/150087054/nike-transforms-historic-chicago-church-into-basketball-court-for-young-hoopers>. (дата обращения 19.11.2024 г.)
11. Сайт церкви Epiphanychi, доступ по адресу: <https://epiphanychi.com>
12. David Barbaix, Waanders In de Broeren / BK. architecten, (2013), Журнал Archdaily, доступ по адресу: <https://www.archdaily.com/422678/waanders-in-de-broeren-bk-architecten>, ISSN 0719-8884, (дата обращения 19.11.2024 г.)
13. Сайт ресторана Church Brew, History, доступ по адресу: <http://www.churchbrew.com>
14. Бюро «Klaarchitectuur», доступ по адресу: <https://www.klaarchitectuur.be>.
15. Archdaily The Waterdog / Klaarchitectuur, доступ по адресу: <https://www.archdaily.com/883767/the-waterdog-klaarchitectuur>, (дата обращения: 11.11.2024 г.)
16. Сайт отеля Fontevrauds, доступ по адресу: <https://www.fontevraud.fr>
17. Patrick Jouin, Sanjit Manku, доступ по адресу: <https://www.jouinmanku.com/en/projects/abbaye-de-fontevraud-1281.html>, (дата обращения 11.11.2024 г.)
18. Michael Hsu, Architecture, (2018), доступ по адресу: <https://hsuoffice.com/catalogue/loro-houston/>, (дата обращения 11.11.2024 г.)
19. David McManus, Kindergarten in Münster, доступ по адресу: <https://www.e-architect.com/germany/kindergarten-muenster>, (дата обращения 16.11.2024 г.)
20. Julia Bolles-Wilson, Peter Wilson, Детский сад Святого Себастьяна, доступ по адресу: <https://www.archdaily.com/392652/st-sebastian-kindergarten-bolles-wilson>, (дата обращения 16.11.2024 г.)
21. Sara Hart, Lee H. Skolnick, Церковь в Саг Хаборе, (2023), доступ по адресу: <https://www.architecturalrecord.com/articles/14903-the-church-by-lee-h-skolnick-architecture-design-partnership>https, (дата обращения 11.11.2024 г.)
22. Lee H. Skolnick, Lee H. Skolnick Architecture&Design, доступ по адресу: <https://www.skolnick.com/the-church>
23. Cristina Cumbo, Церкви больше не церкви: повторное использование некоторых культовых сооружений в Риме, (Рим, Италия, 2022), доступ по адресу:

- <https://latpc.altervista.org/chiese-non-piu-chiese-riutilizzo-di-alcuni-luoghi-di-culto-nella-citta-di-roma/> (дата обращения 16.11.2024 г.)
25. C. Rendina, Le chiese di Roma, (Рим, Италия, 2007), s.v. Trifone, San, pp. 361-362. C. Rendina, Le chiese di Roma, Roma 2007, s.v. Sacramento di San Lorenzo in Lucina, Santissimo, p. 331.
26. Archdaily, Monique Corriveau Library, доступ по адресу: <https://www.archdaily.com/486814/monique-corriveau-library-dan-hanganu-cote-leahy-cardas-architects>, (дата обращения 11.11.2024 г.)
27. Dan Hanganu, Côté Leahy Cardas, (2013), доступ по адресу: <https://architizer.com/projects/monique-corriveau-library/> (дата обращения 19.11.2024 г.)
28. Dominic Martin, Église Christ-Roy – маленькая история великих церквей, (2016), доступ по адресу: <https://www.chemindescantons.qc.ca/blogue/eglise-christ-roy-la-petite-histoire/>, (дата обращения 19.11.2024 г.)
29. C. Carla, Скейт Церковь, храм городского искусства в Астурии, (2017), доступ по адресу: <https://lamaletadecarla.com/iglesia-skate-okuda-llanera-asturias>. (дата обращения 11.11.2024 г.)
30. Сайт скейтпарка Laiglesiaskate, доступ по адресу: <https://laiglesiaskate.com>

Б. Ж. Карпсеитова, С.Ш. Садықова

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Ғимараттарды бейімдеп қайта құру және олардың жаңа функцияларға мүмкіндіктері (Діни ғимараттар мен құрылыстар мысалында)

Аңдатпа. Мақалада діни ғимараттар мен құрылыстардың жаңа функционалдық мүмкіндіктерін ескере отырып, олардың бейімделуіне талдау жасалады. Зерттеу жұмысының негізгі мақсаты мен концепциясы заманауи архитекторлар мен инженерлер жүзеге асырған діни ғимараттарды бейімдеу жобаларын талдауға бағытталған. Мақалада келтірілген жұмыстар мен тәсілдер архитекторлар, инженерлер, реставраторлар және қала құрылысшыларына діни ғимараттар мен құрылыстарды реставрациялау, реконструкциялау және қайта мақсаттау жобаларын жоспарлауда қолдануға болады. Зерттеу барысында АҚШ, Канада, Ұлыбритания, Франция, Нидерланды және басқа да елдердегі христиан шіркеулері ғимараттарының бейімделу мысалдары келтірілген. Зерттеу тарихи ғимараттардың қазіргі заманғы қажеттіліктерге сәтті бейімделе алатынын көрсетеді, сонымен қатар олардың тарихи және мәдени мұрасын сақтай отырып, бұл қала дамуының тұрақтылығына маңызды әсер етеді. Шіркеу ғимараттарын жаңа функциялар үшін (мұражайлар, көрме залдары, концерт залдары, кітапханалар және т.б.) бейімдеу әлеуметтік өзара әрекеттесу, мәдени алмасу және экономикалық дамуға мүмкіндік береді. Зерттеу сакральды кеңістіктердің трансформациясын және олардың күнделікті өмірге интеграциялануын терең түсінуге көмектеседі, архитектуралық теорияның шекараларын кеңейтеді.

Түйін сөздер: бейімдеу, реконструкция, діни ғимараттар мен құрылыстар, шіркеу, функционалдық тағайындалуы, экономикалық фактор, халықаралық тәжірибе.

B. Zh. Karpseitova, S. Sh. Sadykova

L.N. Gumilyov Eurasian National University

Peculiarities of Adaptive Reconstruction of Buildings and Their Potential for New Functions (Using Religious Buildings and Structures as a Case Study)

Abstract. This article presents an analysis of the adaptive restructuring of religious buildings and structures, taking into account their new functional capabilities, with examples drawn from international experience. The main objective and concept of the study are focused on analyzing completed projects of the adaptation of religious buildings carried out by contemporary architects and engineers. The works and approaches discussed in this article can be utilized by architects, engineers, restorers, and urban planners when planning projects for the restoration, reconstruction, and repurposing of religious buildings and structures. The study includes examples of the adaptation of Christian church buildings in countries such as the United States, Canada, the United Kingdom, France, the Netherlands, and others. The research demonstrates how historic buildings can be successfully adapted to meet contemporary needs while preserving their historical and cultural heritage, which is crucial for the sustainable development of cities. The adaptation of church spaces for new functions (such as museums, exhibition halls, concert halls, libraries, etc.) provides opportunities for social interaction, cultural exchange, and economic development. The study deepens the understanding of the transformation of sacred spaces and their integration into everyday life, thus expanding the boundaries of architectural theory.

Keywords: adaptation, reconstruction, religious buildings and structures, church, functional purpose, economic factor, international experience.

References

1. Clyde E. Fant, Mitchell G. Reddish, *A Guide to Biblical Sites in Greece and Turkey*, (Oxford University Press, USA, 2003)
2. Gerry Stacey, *Christian Research*. (2018), available at: <https://www.christian-research.org/reports/archives-and-statistics/uk-church-overview/>. (date of access: November, 15, 2024)
3. Harriet Sherwood. *Arts and Culture Issues*, (2021), available at: <https://www.theguardian.com/world/2021/jan/05/c-of-e-bishop-warns-of-church-closures-due-to-covid-financial-losses>. (date of access: October 15, 2024)
4. O. Pozdnyak, *Europe is getting rid of churches*, (2017), available at: https://www.ng.ru/ng_religii/. (date of access: November 28, 2024)
5. Scott Neuman, *Believers See Both Crisis and Opportunity in Church Closings Across the Country* (2023), available at: <https://www.npr.org/2023/05/17/1175452002/church-closings-religious-affiliation>, (date of access: October 15, 2024)
6. Y. Bonesteele, *When One Church Door Closes*, (Lifeway Christian Resources, 2021), available at: <https://research.lifeway.com/2021/06/11/when-one-church-door-closes/>, (date of access: November 11, 2024)
7. Aaron Earls, *Protestant Church Closings Outpace Openings in the U.S.* (2021), available at: <https://research.lifeway.com/2021/05/25/protestant-church-closures-outpace->

- openings-in-u-s/, (date of access: 19.11.2024)
8. Vatican Canon, *Code of Canon Law Vatican - Book IV - Function of the Church: Part III: Sacred places and times* (Cann. 1205-1243), available at: www.vatican.va/archive/cod-iuris-cononici/eng/documents/cic_lib4-cann1205-1243_en. §1,2.
 9. Canon of the Church of England, *Mission and Pastoral Measure*, (2011), available at: <https://savetheparish.com/wp-content/uploads/2023/09/Mission-and-Pastoral-Measure-2011.pdf>, §61, 62
 10. Mackenzie Goldberg, *Nike Transforms Historic Chicago Church into Basketball Court for Young Hoopers*, (2019), available at: <https://archinect.com/news/article/150087054/nike-transforms-historic-chicago-church-into-basketball-court-for-young-hoopers>. (date of access: 19.11.2024)
 11. Epiphanychi Church website, available at: <https://epiphanychi.com>
 12. David Barbaix, *Waanders In de Broeren / BK. architecten*, (2013), Archdaily Magazine, available at: <https://www.archdaily.com/422678/waanders-in-de-broeren-bk-architecten>, ISSN 0719-8884, (date of access: 19.11.2024)
 13. Church Brew Restaurant website, *History*, available at: <http://www.churchbrew.com>
 14. Klaarchitectuur, available at: <https://www.klaarchitectuur.be>.
 15. Archdaily *The Waterdog / Klaarchitectuur*, available at: <https://www.archdaily.com/883767/the-waterdog-klaarchitectuur>, (date of access: 11.11.2024)
 16. Fontevrauds Hotel website, available at: <https://www.fontevraud.fr>
 17. Patrick Jouin, Sanjit Manku, available at: <https://www.jouinmanku.com/en/projects/abbaye-de-fontevraud-1281.html>, (date of access: 11.11.2024)
 18. Michael Hsu, *Architecture*, (2018), available at: <https://hsuoffice.com/catalogue/loro-houston/>, (date of access: 11.11.2024)
 19. David McManus, *Kindergarten in Münster*, available at: <https://www.e-architect.com/germany/kindergarten-muenster>, (date of access: 16.11.2024)
 20. Julia Bolles-Wilson, Peter Wilson, *St. Sebastian Kindergarten*, available at: <https://www.archdaily.com/392652/st-sebastian-kindergarten-bolles-wilson>, (date of access: 16.11.2024)
 21. Sara Hart, Lee H. Skolnick, *The Church in Sag Harbor*, (2023), available at: <https://www.architecturalrecord.com/articles/14903-the-church-by-lee-h-skolnick-architecture-design-partnership>, (date of access: 11.11.2024)
 22. Lee H. Skolnick, *Lee H. Skolnick Architecture & Design*, available at: <https://www.skolnick.com/the-church>
 23. Cristina Cumbo, *Churches No Longer Churches: The Reuse of Some Religious Buildings in Rome*, (Rome, Italy, 2022), available at: <https://latpc.altervista.org/chiese-non-piu-chiese-riutilizzo-di-alcuni-luoghi-di-culto-nella-citta-di-roma/> (date of access: 16.11. 2024)
 24. C. Rendina, *Le chiese di Roma*, (Rome, Italy, 2007), s.v. Trifone, San, pp. 361-362. Sacramento di San Lorenzo in Lucina, Santissimo, p. 331.
 25. Archdaily, *Monique Corriveau Library*, available at: <https://www.archdaily.com/486814/monique-corriveau-library-dan-hanganu-cote-leahy-cardas-architects>, (date of access: 11.11.2024)

26. Dan Hanganu, *Côté Leahy Cardas*, (2013), available at:
<https://architizer.com/projects/monique-corriveau-library/> (date of access: 19.11.2024)
27. Dominic Martin, *Église Christ-Roy- A Little History of Great Churches*, (2016), available at:
<https://www.chemindescantons.qc.ca/blogue/eglise-christ-roy-la-petite-histoire/>, (date of access: 19.11.2024)
28. S. Carla, *Skate Church, Temple of Urban Art in Asturias*, (2017), available at:
<https://lamaletadecarla.com/iglesia-skate-okuda-llanera-asturias>. (date of access: 11.10.2024)
29. Laiglesiaskate skatepark website, access at: <https://laiglesiaskate.com>

Сведения об авторах

Б. Ж. Карпсеитова – магистрант 1 курса, архитектурно-строительный факультет, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан. Ведущий архитектор ТОО «MX Engineering» телефон: +77017292715, e-mail. karpseit@gmail.com

С. Ш. Садыкова – кандидат архитектуры, ассоциированный профессор кафедры «Архитектура», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, г. Астана, Казахстан, телефон: +77015663093, e-mail. sara.arch@mail.ru

Б. Ж. Карпсеитова – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің сәулет-құрылыс факультетінің 1 курс магистранты., көш. Сәтбаева 2, Астана, Қазақстан. «MX Engineering» ЖШС, Жетекші сәулетшісі, телефон: +77017292715, e-mail. karpseit@gmail.com

С. Ш. Садыкова – сәулет ғылымдарының кандидаты, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Сәулет» кафедрасының доценті., көш. Сәтбаева 2, Астана, Қазақстан, телефон: +77015663093, e-mail. sara.arch@mail.ru

B. Zh. Karpseitova – 1st year Master's student, Faculty of Architecture and Civil Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, st. Kazhymukhana 13, Astana, Kazakhstan. Leading Architect «MX Engineering» LLP, phone: +77017292715, e-mail. karpseit@gmail.com

S. Sh. Sadykova – Candidate of Architecture, Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Civil Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana. Kazakhstan, st. Kazhymukhana, 13, phone: +77015663093, e-mail: sara.arch@mail.ru



Copyright: © 2025 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/>).



МРНТИ 55.47.29

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-99-109>

Экспериментальное исследование бесколлекторных двигателей и МРU6050 с применением ПИД-регулятора

К.Т.Ахметов ¹, А.Б. Болатова *¹, Е.Макажанов ²,
Г.К. Саменов ¹

¹ ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

² Общественный фонд "Неправительственный экологический фонд им. В.И. Вернадского в Республике Казахстан"

E mail: bolatova_ainash@mail.ru

Аннотация. В данной научной статье рассматриваются аспекты практической реализации ПИД-регулятора на базе микроконтроллера Atmega328. Для его внедрения был разработан одноосевой экспериментальный стенд с соответствующей аппаратной частью. Создана методика проведения экспериментов, а также алгоритм работы программы с использованием ПИД-регулятора. В ходе экспериментов впервые были зафиксированы широтно-импульсные модуляции (ШИМ) сигналы, передаваемые микроконтроллером к двигателям в зависимости от управляющего сигнала, сформированного ПИД-регулятором. Установлено, что при отклонении штанги на -30 градусов активируется правый двигатель с ШИМ-сигналом в диапазоне 1300...1500 мкс. При наклоне в противоположную сторону аналогичным образом изменяется сигнал на другом двигателе, достигая значений от 1300 до 1500 мкс. Использование ПИД-регулятора обеспечило автоматическое выравнивание и поддержание на заданный угол 0 градусов штанги, что способствовало стабилизации системы при работе двух бесколлекторных двигателей.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, ШИМ-сигнал, микроконтроллер Atmega328, бесколлекторный двигатель, модуль МРU6050.

Поступила 11.03.2025. Доработана 17.03.2025. Одобрена 13.05.2025. Доступна онлайн 30.09.2025

* автор для корреспонденции

Введение

Пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (далее – ПИД-регулятор) широко используются в инженерии, в частности, для стабилизации полёта летательных аппаратов путём регулировки дроссельной заслонки, тангажа, крена и рыскания с целью исправления отклонений от желаемой ориентации [1]. ПИД-регуляторы применяются в системах круиз-контроля автомобилей для поддержания скорости транспортного средства путём регулировки входного сигнала дроссельной заслонки на основе отклонений скорости [2]. Помимо этого, ПИД-регуляторы широко используются в робототехнике для управления двигателями, приводами или роботизированными руками. Контроллер регулирует скорость двигателя для достижения заданного положения или скорости, обеспечивая точное и плавное движение [3]. В станках с ЧПУ ПИД-регуляторы управляют положением двигателей, контролирующих движение деталей машины, что гарантирует точную траекторию движения режущего инструмента и обеспечивает высокую точность производства [4]. Также ПИД-регуляторы применяются в управленческих процессах, например, при регулировании температуры в промышленных печах и системах отопления. При регулировании давления на химических заводах, электростанциях и трубопроводах эти регуляторы используются для поддержания постоянного давления путём управления потоком жидкостей или газов [5]. Кроме того, они находят применение в автоматизированных производственных линиях и конвейерах для поддержания скорости ленты. Регулируя скорость двигателя на основе входного сигнала, ПИД-регулятор обеспечивает обработку или перемещение материалов с заданной скоростью [6]. Таким образом, ПИД-регулятор играет важную роль в процессах автоматического регулирования систем, в частности, в летательных аппаратах, где рассматривается связка программного алгоритма, микроконтроллера и бесколлекторных двигателей.

Целью данной статьи является исследование стабилизации работы двух двигателей бесколлекторного типа с датчиком MPU-5060 за счет применения ПИД-регулятора. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- 1) разработка конструкции лабораторной установки;
- 2) подключение аппаратной части, программирование микроконтроллера;
- 3) экспериментальное исследование ПИД-регулятора.

Методология.

Для того, чтобы исследовать процесс поведения работы ПИД-регулятора, необходимо, в первую очередь, сконструировать лабораторную установку, которая представлена на рисунке 1.

Данная установка состоит из двух основных частей. Первая – это конструкционная, вторая – аппаратная часть. Конструкционная часть состоит из штанги (2), длиной 800 мм, по краям которой крепятся подставки штанги (5), то есть упоры, чтобы не повредить пропеллеры в процессе работы двигателей, установленных в раме крыла (1). В центре штанги устанавливается подставка для аппаратной части (4), выполненной из PLA-пластика. Она предназначена для установки аппаратной части, которая будет рассматриваться далее. В торцевых сторонах штанги прикрепляются цапфы, на которые насаживаются шариковые подшипники марки 608-RSH (6). Наружные стороны подшипников насаживаются на боковине (7), которые упираются на стойку (8).

Вся конструкция испытательного стенда упирается на поддоны (9).

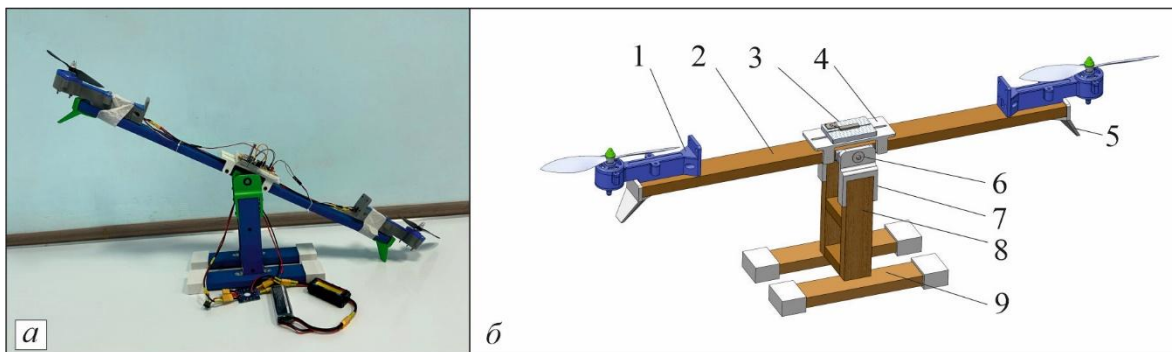


Рисунок 1. Экспериментальный стенд для настройки ПИД-регулятора: (а) – общий вид; (б) – конструкция установки: 1 – рама крыла; 2 – штанга; 3 – аппаратная часть; 4 – подставка для аппаратной части; 5 – подставка штанги; 6 – шариковый подшипник; 7 – боковина; 8 – стойка; 9 – поддон.

Аппаратная часть представляет собой комплекс силовых линий, снабжаемых от источника питания ион-полимерного аккумулятора (5), программатора FTDI (7), служащего для загрузки программы в микроконтроллер Atmega328 (10), модуля MPU-6050 (6) и исполняющих механизмов – два бесколлекторных двигателя модели A2213 (2) с регуляторами скорости (3) и пропеллерами (1) диаметром 255 мм. Подробное подключение данного типа двигателя, а также их испытания на тягу, измерение количества оборотов и потребляемой мощности было опубликовано в работе [7]. По поводу подключения модуля MPU-6050 с микроконтроллером и определения взаимосвязи модуля с бесколлекторным двигателем было исследовано в работе [8].

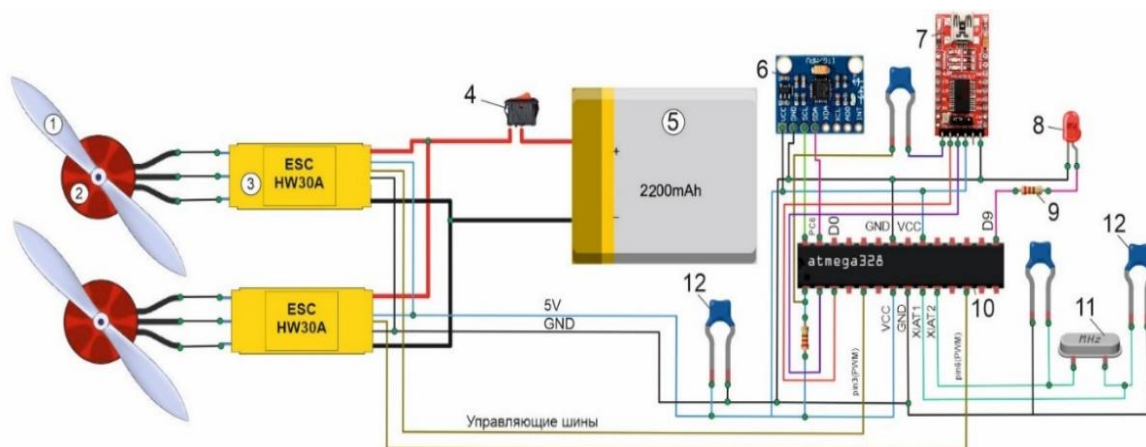


Рисунок 2. Аппаратная часть реализации ПИД-регулятора: 1 – пропеллер; 2 – бесколлекторный двигатель; 3 – регулятор скорости; 4 – выключатель; 5 – аккумулятор; 6 – датчик MPU-6050; 7 – программатор FTDI; 8 – светодиод; 9 – резистор; 10 – микроконтроллер Atmega328; 11 – кварцевый резонатор; 12 – конденсатор.

В данной работе подробно рассмотрен способ подключения модуля и выявлены зависимости широтно-импульсной модуляции, исходящей от микроконтроллера от угла поворота модуля. В этой связи ограничимся описанием данной схемы.

Отличительной особенностью данной схемы, представленной на рисунке 2, является дополнение еще одного бесколлекторного двигателя, расположенных друг против друга и вращающихся в противоположных направлениях – правый двигатель по часовой стрелки, левый против часовой. Также данная схема позволяет применить ПИД-регулятор.

Для выявления процесса автоматического контроля и поддержки уровня штанги равновесия применяется специальный алгоритм, написанный на языке программирования, называемым ПИД-регулятор. Главным его назначением является формирование управляющего сигнала, состоящего из трех составляющих: пропорциональная, интегральная и дифференциальная [9,10].

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad 1$$

В данной формуле пропорциональная составляющая P представляет собой произведение коэффициента усиления пропорциональной составляющей K_p на текущую ошибку между текущим значением и желаемым значением $e(t)$. Чем больше будет ошибка, тем сильнее реагирует регулятор.

Интегральная составляющая I состоит из коэффициента усиления пропорциональной составляющей K_i , умноженной на интеграл $e(t)dt$. Она используется для учета накопленного опыта работы регулятора, что со временем делает управление все более точным. Регулятор суммирует предыдущие значения ошибки регулирования и вносит соответствующие коррективы. Когда система достигает заданного состояния, ошибка регулирования становится минимальной, и влияние интегральной части постепенно снижается. Проще говоря, интегральная составляющая корректирует ошибки, возникшие в предыдущие моменты времени.

Дифференциальная составляющая D состоит из коэффициента усиления дифференциальной составляющей K_d , умноженная на производную от ошибки (учет скорости изменения ошибки) de/dt . Эта составляющая вычисляет производную от измеряемой величины. Производная отражает скорость изменения физической величины. Например, чем быстрее растёт или падает давление в системе, тем выше соответствующее значение производной. Дифференциальная составляющая позволяет регулятору по-разному реагировать на резкие и плавные изменения регулируемой величины, что позволяет устранять резкие колебательные процессы в системе.

Сумма всех трех составляющих представляет собой управляющую переменную $u(t)$, которая характеризуется как ПИД-регулятор. Таким образом, основная задача ПИД-регулятора заключается в автоматическом поддержании заданного уровня параметров системы, таких, как температура в резервуаре или давление в цистерне, без вмешательства человека. В данном случае ПИД-регулятор используется для управления двумя двигателями, что позволяет стабилизировать полет винтового БПЛА.

В автоматизированных системах любой ПИД-регулятор функционирует на основе принципа обратной связи (рис. 3, а). В данном случае обратная связь обеспечивается тягой, создаваемой обоими двигателями. Если возникает разница в тяге между двигателями, ось штанги наклоняется в одну из сторон. Акселерометр-гироскоп измеряет текущий угол и передает его в регулятор (точнее, в микроконтроллер для обработки данных). Регулятор

сравнивает полученное значение с заданным и вносит корректировки, стремясь минимизировать ошибку. По мере изменения ошибки изменяется и выходной ШИМ-сигнал от микроконтроллера, который управляет двигателями. Угол наклона будет равен 0 градусам, если ШИМ-сигналы, подаваемые на оба двигателя, будут одинаковыми, что обеспечит равные обороты двигателей и, соответственно, одинаковую тягу пропеллеров.

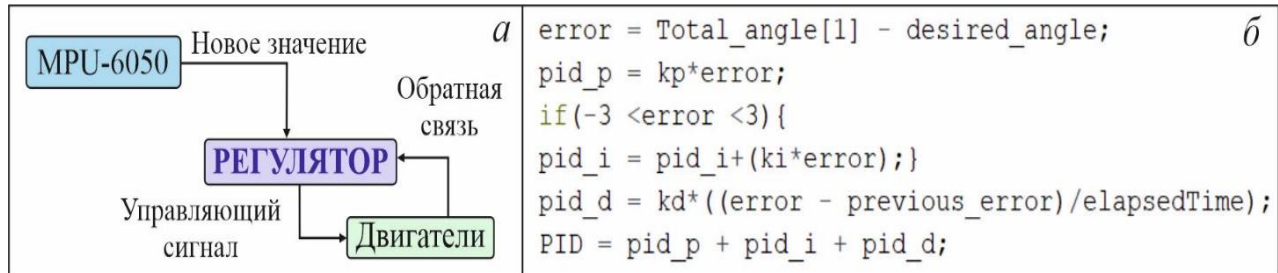


Рисунок 3. Схема действия ПИД-регулятора (а) и его код программы (б).

Процесс работы ПИД-регулятора в программном коде включает несколько этапов (рис. 3, б). На первом этапе происходит считывание данных с модуля MPU-6050, которые представляют собой углы, измеренные по всем трём осям в декартовой системе координат [8]. В данном случае используется только угол Y, так как в испытательном стенде наклоняется штанга только по одной оси (см. рис. 1). После получения данных об угле на втором этапе выполняется расчет ПИД-регулятора, включающий поэтапное вычисление всех трёх составляющих.

Сначала определяется ошибка (error) измерения, которая представляет собой разницу между желаемым значением (desired_angle), равным 0 градусам, и фактическим измеренным значением (total_angle[1]), полученным с модуля MPU-6050. В данном случае угол Y хранится в массиве под индексом 1. Затем значение ошибки умножается на коэффициент усиления пропорциональной составляющей (kp). Этот коэффициент подбирается вручную при настройке регулятора: чем больше его значение, тем сильнее управляющий сигнал на выходе, и наоборот. Когда ошибка пропорциональной составляющей приближается к заданному диапазону от -3 до 3, начинает обрабатываться интегральная составляющая: $pid_i = pid_i + (k_i \times error)$. Она накапливает ошибки во времени, способствуя устранению статического отклонения.

Дифференциальная составляющая вычисляется как произведение коэффициента kd на разницу между текущей и предыдущей ошибками, деленную на промежуток времени: $kd \times (error - previous) / elapsedTime$. Благодаря этому дифференциальная составляющая сглаживает резкие изменения управления, учитывая скорость изменения ошибки. В результате объединения трех составляющих формируется управляющий сигнал ПИД-регулятора, который представлен в виде ШИМ-сигнала. На третьем этапе процесса после формирования управляющего сигнала необходимо задать диапазон ограничений для ПИД-регулятора, чтобы компенсировать возможные случайные колебания процесса, вызванные внешними факторами.

Этот диапазон устанавливается в пределах -1000...1000 мкс (рис. 4, а). Бесколлекторные двигатели типа A2213 работают в интервале от 800 до 2300 мкс. В этой связи в программном коде задается диапазон ограничений начальных и конечных

значений, в случае их выхода за пределы (рис.4, б). Переменная *throttle*, которая задается значением 1000, служит для равномерной работы обоих двигателей при $PID \rightarrow 0$. Равномерность работы двигателей характеризуется формулами $pwmLeft = throttle + PID$ и $pwmRight = throttle - PID$. Даже при $PID \sim 0$, $pwmLeft = 1000$ и $pwmRight = 1000$, что способствуют работе двигателей на умеренном ходу.

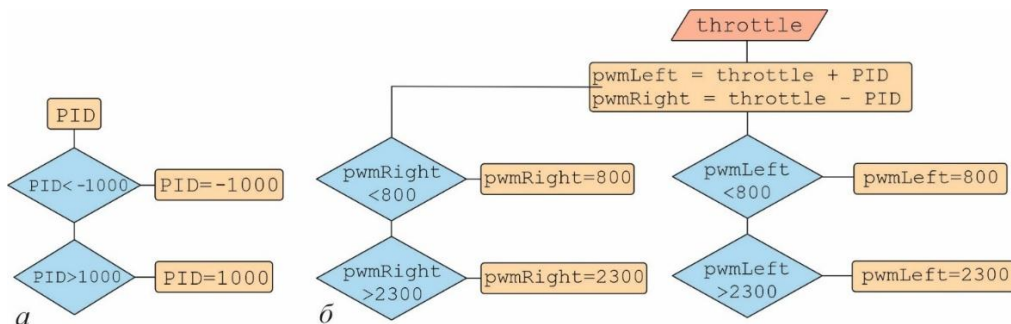


Рисунок 4. Программная реализация PID-регулятора: (а) – граничное ограничение ШИМ-сигнала управления $u(t)$; (б) – верхние и нижние пределы ШИМ правого и левого двигателей с учетом ПИД-контроля.

Результаты и обсуждение.

Графики, полученные в режиме реального времени при считывании данных с COM-порта, отображают линии ШИМ-сигнала, передаваемого микроконтроллером к правому (1) и левому (2) двигателям, заданный угол (3), а также управляющий сигнал (4). По полученным результатам экспериментальных данных следует, что при ручном отклонении штанги на угол -30 градусов уменьшается управляющий сигнал (4).

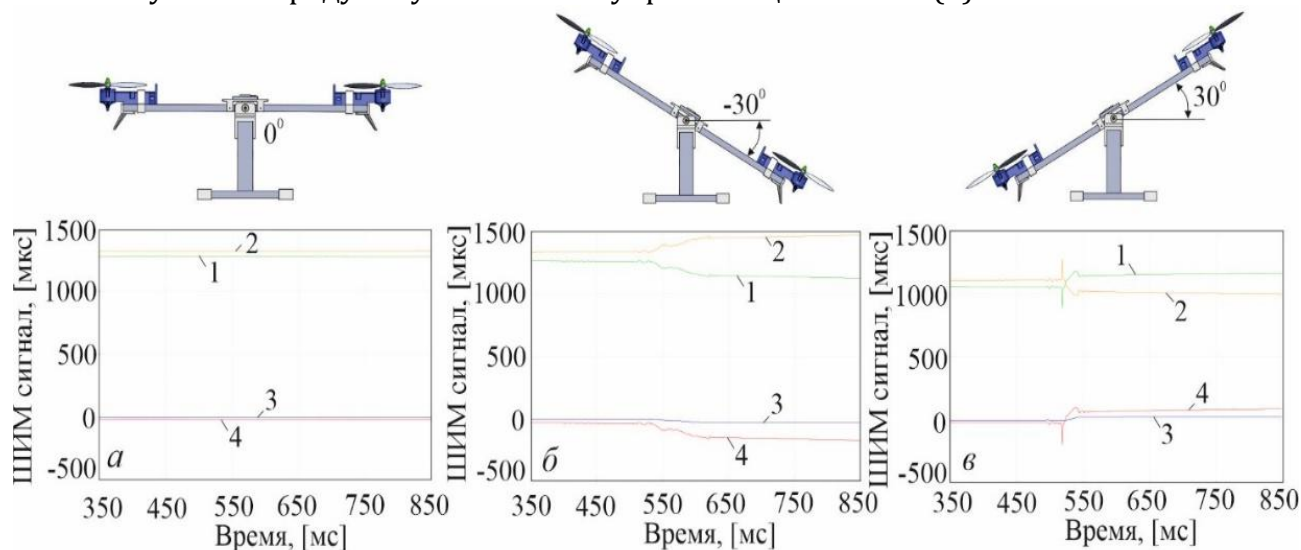


Рисунок 5. Результаты измерения PID-регулятора: (1) – ШИМ-сигнал правого двигателя; (2) – ШИМ-сигнал левого двигателя; (3) – желаемый угол, на которую будет стремиться сигнал управления; (4) – сигнал управления (ПИД-регулятор).

Данный сигнал способствует увеличению правого двигателя (2) на величину 1500 мкс и выше. Это приводит к увеличению мощности двигателя, а следовательно, и число оборотов двигателя, способствуя поднятию правой части штанги (рис.5, б).

При отклонении левой части штанги на 30 градусов вручную, где расположен второй двигатель, управляющий сигнал (4) увеличивается в положительном направлении (рис. 5, в). В результате этого возрастает ШИМ-сигнал правого двигателя (1), что приводит к увеличению его тяги. Повышенная тяга способствует подъему правой стороны, сопровождающемуся снижением ШИМ-сигнала. В конечном итоге система приходит в состояние равновесия (рис. 5, а). Данный диапазон, как показаны на двух графиках, не конечны (рис. 5, а и б), они с истечением времени достигаются в конечные значения до 2300 мкс при максимальном угле поворота до 90 градусов. В связи с тем, что данный стенд является экспериментальным и имеет ограничение по наклону, измерить ШИМ-сигналы с обоих двигателей не удавалось.

Таким образом, для винтообразного БПЛА с четырьмя винтами и тремя степенями свободы вращения относительно собственного центра масс необходим принципиально иной подход к разработке алгоритмов управления и применению ПИД-регулятора для стабилизации полета. На наш взгляд, эта задача является достаточно сложной и будет рассмотрена в дальнейших исследованиях.

Заключение.

В соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи: разработана конструкция испытательного стенда с аппаратной частью; проведено исследование работы ПИД-регулятора в режиме реального времени в зависимости от угла наклона установки, что позволило выявить изменения величин ШИМ-сигнала, потребляемых обоими двигателями.

Таким образом, данное экспериментальное исследование создаёт основу для дальнейшей разработки ПИД-регулятора для трёхосевой установки с четырьмя бесколлекторными двигателями, что позволит глубже изучить процессы стабилизации полёта БПЛА.

Работа выполняется при поддержке грантового финансирования Комитета науки Министерства и высшего образования Республики Казахстан (проект №AP195077/0225).

Вклад авторов:

К.Т. Ахметов: разработал концепцию исследования, методологию статьи.

А.Б. Болатова: провела алгоритмизацию и программирование данных.

Е.Макажанов- провел литературный обзор, исследовал состояние проблемы.

Г.К. Саменов: провел эксперименты и снятия показаний с данных.

Список литературы

1. Ang K.H. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol.13. No.4. p. 559-576. – материалы конференции на англ. языке.
2. Karl J. Pid Controllers /– Pub: Isa, 1995. – p.343. – книга на англ. языке.

3. Wen Yu. PID Control with Intelligent Compensation for Exoskeleton Robots // – Publisher: Academic Press, 2018. – p. 219. – книга на англ. языке.
4. Зыкин П.В. Синтез следящей ПИД-системы управления шероховатостью при токарной обработке / Известия Тульского государственного университета. Технические науки, – №4. – 2023. – С.507-510. – научная статья.
5. Karl J. Automatic Tuning of Pid Controllers/ Pub: Isa, 1988. – p.141. – книга на англ. языке
6. He, Y., Ma, A., Wang, Y. et al. FOPID controller design for pneumatic control valves with ultra-low overshoot, rapid response and enhanced robustness. Sci Rep 15, 4541 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89316-2> – статья на англ. языке.
7. Ахметов К.Т., Болатова А.Б., Байжуман К.М., Саги А.А. Проблемы машиностроения: современные технологии обработки, материалы, машины, агрегаты. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции. 11-12 октября 2024 г., г. Махачкала: ДГТУ, 2024. - 223 с. – материалы конференции.
8. К.Т. Ахметов, К.М. Байжуман, А.Б. Болатова, У.Т. Касымов. Экспериментальное исследование управления бесколлекторным двигателем с помощью MPU6050 / Вестник ЕНУ. – № 4 (2024) – С.244-255. – Научный журнал.
9. ПИД-регулятор [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ ПИД-регулятор](https://ru.wikipedia.org/wiki/ПИД-регулятор). (Дата обращения: 03.03.2024). - электронный ресурс.
10. ПИД-регулятор: принцип работы и схема подключения [Электронный ресурс]. URL: <https://drives.ru/stati/pid-regulyator>. (Дата обращения: 03.03.2024). - электронный ресурс.

**К.Т.Ахметов¹, А.Б. Болатова¹, Е. Макажанов²,
Г.К. Саменов¹.**

¹Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

*²«Қазақстан Республикасындағы В. И. Вернадский атындағы үкіметтік емес экологиялық
қоғамдық қоры»*

PID реттегішін қолдана отырып, коллекторсыз қозғалтқыштар мен MPU6050 эксперименттік зерттеу

Аңдатпа. Бұл ғылыми мақалада Atmega328 микроконтроллері негізінде жүзеге асырылған PID-регулятордың практикалық іске асырылу аспектілері қарастырылды. Оны енгізу үшін сәйкес аппараттық бөлігі бар бір осьті эксперименттік стенд әзірленді. Эксперименттерді жүргізу әдістемесі және PID-регуляторды қолданатын бағдарламаның жұмыс алгоритмі жасалды. Эксперименттер барысында микроконтроллерден қозғалтқыштарға жіберілетін басқарушы сигналға байланысты алғаш рет ені-импульстік модуляция (ЕИМ) сигналдары тіркелді. Зерттеулер нәтижесінде штанганың -30 градусқа ауытқуы кезінде оң жақ қозғалтқыштың 1300...1500 мкс диапазонында ЕИМ-сигналы іске қосылатыны анықталды. Қарсы бағытқа еңкею кезінде екінші қозғалтқыштағы сигнал ұқсас түрде өзгеріп, 1300-ден 1500 мкс-қа дейін жетті. PID-регуляторды қолдану штанганың 0 градус бұрышта автоматты түрде теңестірілуін және ұстап тұруын қамтамасыз етті. Бұл екі коллекторсыз қозғалтқышпен жұмыс істеу кезінде жүйенің

тұрақтануына ықпал етті.

Түйін сөздер: PID-регулятор, ЕИМ сигналі, Atmega328 микроконтроллері, коллекторсыз қозғалтқыш, MPU6050 модулі.

**K.T.Akhmetov¹, A.B.Bolatova^{1*}, Y. Makazhanov²,
G.K. Samenov¹**

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²"Non-governmental Environmental Public Foundation named after V. I. Vernadsky in the Republic of Kazakhstan"

Experimental study of brushless motors and MPU6050 using a PID controller

Abstract. This scientific article discusses aspects of the practical implementation of a PID controller based on the Atmega328 microcontroller. For its implementation, a single-axis experimental stand with the appropriate hardware was developed. A methodology for conducting experiments has been created, as well as an algorithm for the program using a PID controller. During the experiments, pulse width modulation (PWM) signals transmitted by the microcontroller to the motors were recorded for the first time, depending on the control signal generated by the PID controller. It was found that when the rod is deflected by -30 degrees, the right motor is activated with a PWM signal in the range of 1300...1500 microseconds. When tilted in the opposite direction, the signal on the other engine changes in a similar way, reaching values from 1300 to 1500 microseconds. The use of a PID controller ensured automatic alignment and maintenance of the rod at a set angle of 0 degrees, which contributed to the stabilization of the system when operating two brushless motors.

Keywords: PID controller, PWM signal, Atmega328 microcontroller, brushless motor, MPU6050 module.

References

1. Ang K.H. PID control system analysis, design, and technology / IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol.13. No.4. p. 559-576. [in english]
2. Karl J. Pid Controllers / – Pub: Isa, 1995. – p.343. [in english].
3. Wen Yu. PID Control with Intelligent Compensation for Exoskeleton Robots // – Publisher: Academic Press, 2018. – p. 219. – [in english].
4. Zykin P.V. Sintez sledyashchey PID-sistemy upravleniya serohovatostyu pri tokar-noi obrabotke / – jurnal Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnich-eskie nauki, – №4. – 2023. – 507-510 s. [in russian].
5. Karl J. Automatic Tuning of Pid Controllers/ Pub: Isa, 1988. – p.141. [in english].
6. He, Y., Ma, A., Wang, Y. et al. FOPID controller design for pneumatic control valves with ultra-low overshoot, rapid response and enhanced robustness. Sci Rep 15, 4541 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89316-2> [in english].
7. Ahmetov K.T., Bolatova A.B., Baijuman K.M., Sagi A.A. Problemy ma-shinostroeniya: sovremennye tehnologii obrabotki, materialy, mashiny, agregaty. Sbornik statei po

- materialam Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi kon-ferentsii. 11-12 oktyabrya 2024, g. Mahachkala: DGTU, 2024. -223 s. – materialy konferentsii. [in ressiian].
8. K.T. Ahmetov, K.M. Baijuman, A.B. Bolatova, U.T. Kasymov. Eksperi-mentalnoe issledovanie upravleniya beskollektornym dvigatelem s pomosh'yu MPU6050 / Vestnik ENU. – № 4 (2024) – 244-255 s. – Nauchnyi jurnal [in ressiian]..
 9. PiD-regulyator [Elektronnyi resurs]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ PiD-regulyator](https://ru.wikipedia.org/wiki/PiD-regulyator). (Data obra-sheniya: 03.03.2024). - elektronnyi resurs [in ressiian]..
 10. PiD regulyator eto: printsip raboty i shema podklyucheniya [Elektronnyi resurs]. URL: <https://drives.ru/stati/pid-regulyator>. (Data obra-sheniya: 03.03.2024). - elektronnyi resurs [in ressiian].

Сведения об авторах

Ахметов К.Т. – автор для корреспонденции, кандидат технических наук, доктор философии (PhD), старший преподаватель кафедры космической техники и технологии Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан.

Болатова А.Б. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортная техника и технологии» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Макажанов Е - Общественный фонд "Неправительственный экологический фонд им. В.И. Вернадского в Республике Казахстан", научный руководитель Саменов Г.К. – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Транспортная техника и технологии» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Akhmetov K.T. – corresponding author, candidate of technical sciences, doctor of PhD, senior lecturer of the department of space engineering and technology, L.N. Gumilyov Eurasian national university, Kazymukan street 11, 010000, Asta-na, Kazakhstan.

Bolatova A.B. – candidate of technical sciences, associate professor of the de-partment of transport engineering and technology, L.N. Gumilyov Eurasian na-tional university, Kazymukan street 13, 010000, Astana, Kazakhstan.

Makazhanov Y. - "Public Foundation 'Non-governmental Environmental Foun-dation named after V. I. Vernadsky in the Republic of Kazakhstan', Scientific Su-pervisor"

Samenov G.K. - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Eurasian National University named after L.N. Gomilev, Kazymukan street 11, 010000, Astana, Kazakhstan.

Ахметов К.Т. – хат-хабар авторы, техника ғылымдарының кандидаты, PhD докторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің ғарыш техникасы және технологиялары кафедрасының аға оқытушысы, Қажымұқан көшесі, 11, 010000, Астана, Қазақстан.

Болатова. А.Б. – техника ғылымдарының кандидаты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің көлік техникасы және технологиялары кафедрасының доценті, Қажымұқан көшесі, 13, 010000, Астана, Қазақстан.

Макажанов Е. – «Қазақстан Республикасындағы В. И. Вернадский атындағы үкіметтік емес экологиялық қоғамдық қоры», ғылыми жетекші

Сәменов Г.Қ. – техника ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Л.Н.Гумилев атындағы

Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі, 2, 10000, Қажымұқан көшесі, 13, 010000,
Астана, Қазақстан.



Copyright: © 2025 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/>).



МРНТИ 28.17.33

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-110-121>

Современные подходы к изучению поведения человека в критической ситуации: интеграция 3D-агентов в виртуальную реальность

Р.М. Садвакасов*^{}, К.Ж. Садвакасова^{}

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

E mail:sadvakasov.rm@gmail.com

Аннотация. В современных условиях моделирование поведения человека в критических ситуациях, таких, как пожар, приобретает особую актуальность для повышения безопасности и эффективности эвакуационных процессов. Развитие технологий виртуальной реальности (VR) открывает новые возможности для исследования и анализа таких ситуаций. Цель исследования – разработка имитационной 3D-модели агентов, которая позволяет анализировать их поведение в критических ситуациях и прогнозировать эвакуационные маршруты. Основные направления работы включают построение математической модели движения агентов, реализацию алгоритмов эвакуации в виртуальной среде и интеграцию результатов в игровые движки для визуализации и анализа. Научная значимость исследования заключается в разработке алгоритмов, которые учитывают особенности взаимодействия людей в сложных архитектурных условиях и позволяют анализировать поведение агентов в различных сценариях. В результате исследования предложен подход к моделированию, позволяющий прогнозировать движение людей при пожаре, оценивать эффективность эвакуационных маршрутов и анализировать влияние различных факторов на процесс эвакуации. Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях по безопасности, разработке тренажеров для экстренных служб и совершенствовании архитектурных решений.

Ключевые слова: виртуальная реальность, Unreal Engine, агент, критическая ситуация, имитационное моделирование.

Введение

Изучение поведения человека в критических ситуациях представляет собой важную междисциплинарную задачу, имеющую как теоретическое, так и прикладное значение. В современных исследованиях особое внимание уделяется моделированию эвакуационных процессов в условиях чрезвычайных ситуаций, таких, как пожары и стихийные бедствия. В этом контексте технологии виртуальной реальности (VR) становятся эффективным инструментом для анализа поведения людей и оптимизации эвакуационных маршрутов. Современные исследования подтверждают эффективность VR-методов для изучения эвакуационного поведения, где авторы Yan Feng и др. [1] продемонстрировали, что использование виртуальной реальности позволяет исследовать выбор выходов при эвакуации и оценивать влияние различных факторов, таких, как знаки выхода и поведение окружающих. Так, исследователи Yukun Guo и др. [2, 3] предложили метод VR-симуляции для моделирования массовых эвакуаций в условиях пожара, улучшая реализм эвакуационных сценариев. В свою очередь, Juřík V и др [4] рассмотрели применение данных VR для калибровки агентных моделей эвакуации, подтверждая их значимость для предсказания реального поведения людей. Кроме того, исследование de Lama C и др. [5, 6] подтвердило, что виртуальные среды позволяют безопасно моделировать поведение людей в условиях пожара, учитывая уровень тревожности и реакции пользователей. Также значительный вклад внесли Muhamad S. B. S., Bahrin M. H. [7], которые представили симуляцию в виртуальной среде для оценки безопасности в исследовательских реакторах, демонстрируя потенциал VR для подготовки персонала. Также Muñoz J. E. и др. [8] рассмотрели психофизиологические аспекты VR-обучения, показывая влияние виртуальных сценариев на уровень стресса и принятие решений в критических ситуациях.

Целью данной работы является разработка имитационной 3D-модели поведения агентов, которая позволит анализировать их действия в критических ситуациях и прогнозировать эвакуационные маршруты. В ходе исследования планируется построение математической модели движения агентов, реализация алгоритмов эвакуации в виртуальной среде и интеграция результатов в игровые движки для визуализации и анализа. Полученные результаты могут быть использованы для обучения персонала, тестирования планов эвакуации и совершенствования проектирования зданий с точки зрения безопасности. Методология исследования включает математическое моделирование поведения агентов, применение алгоритмов оптимизации для расчета маршрутов эвакуации, а также интеграцию модели в виртуальную среду с использованием движка Unreal Engine (UE) [9, 10]. Таким образом, использование современных технологий позволяет не только изучать поведение людей в критических ситуациях, но и разрабатывать более эффективные стратегии эвакуации.

Методология

Для изучения поведения человека в критических ситуациях необходимо создать его имитационную модель и интегрировать её в виртуальную среду. Это позволяет не только моделировать различные сценарии поведения агентов, но и визуализировать их в динамике. Формальное описание модели представляет собой систематизацию и определение всех основных элементов и параметров, которые будут использоваться для анализа и моделирования. В данном случае рассматривается модель поведения агентов в

помещении в условиях критической ситуации, такой, как пожар. Описание пространства основано на 3D-координатном пространстве, что позволяет учитывать не только перемещение агентов в плоскости (x, y), но и их движение в вертикальном направлении (z), что особенно важно для моделирования многоуровневых пространств, таких, как здания, лестничные пролёты и различные этажи.

На рисунке 1 представлена трехмерная диаграмма движения агентов в декартовой системе координат. Начальные положения агентов обозначены синими крестами, конечные — красными. Направление движения агентов к выходам или безопасным зонам показано черными стрелками. Выходы обозначены зелеными квадратами. Координатные оси X, Y и Z представляют трехмерное пространство моделирования.

Декартова система координат с агентами

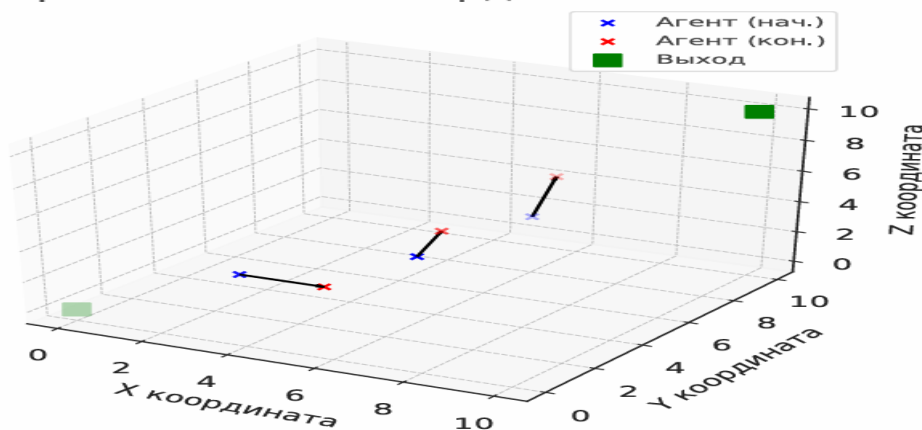


Рисунок 1. Трехмерная траектория движения агентов в процессе эвакуации

Итак, границы помещения определяются следующим соотношением:

$$L * W * H = V \quad (1)$$

где:

L - длина, W - ширина помещения, H - высота.

V - общий объём пространства, доступного для моделирования.

Для описания координат внутри помещения, где находятся агенты, можно использовать следующие ограничения:

$$0 \leq x \leq L, \quad 0 \leq y \leq W, \quad 0 \leq z \leq H \quad (2)$$

Далее плотность агентов ρ определяется как количество агентов n на единицу площади:

$$\rho = n / (L * W * H) \quad (3)$$

Теперь рассмотрим положение агентов в пространстве. Пусть координаты i -го агента обозначаются как:

$$A_i = (x_i, y_i, z_i)$$

где $i=1, 2, \dots, n$ и n - общее число агентов.

Каждая координата агента должна удовлетворять условиям:

$$0 \leq x_i \leq L, \quad 0 \leq y_i \leq W, \quad 0 \leq z_i \leq H \quad (4)$$

Таким образом, формула для описания пространства, где находятся агенты, будет следующей:

$$(x_i, y_i), \text{ "где" } 0 \leq x_i \leq L, \quad 0 \leq y_i \leq W, \text{ "при" } L \times W = 100 \quad (5)$$

Когда агенты сталкиваются с угрозой, например, пожаром, их поведение определяется их положением и возможным направлением движения. В этом случае пространство остается тем же, но добавляется динамика принятия решений. Пусть $dA_i(t)$ обозначает изменение позиции агента i в момент времени t :

$$A_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t)) \quad (6)$$

Движение агентов зависит от различных факторов, таких, как направление к ближайшему выходу, плотность дыма, наличие других агентов и т.д. Для упрощения используем модель на основе скорости и направления движения:

$$\begin{aligned} (dx_i)/dt &= v_i \cos[\theta_i] \cos[\varphi_i] \\ (dy_i)/dt &= v_i \sin[\theta_i] \cos[\varphi_i] \\ v_i \sin[\varphi_i] \end{aligned} \quad (7)$$

где:

v_i - скорость движения агента;

θ_i - угол направления его движения;

φ_i - угол движения в вертикальном направлении.

Исходя из этого, агенты могут принимать решения на основе различных алгоритмов.

Один из таких алгоритмов – движение в сторону ближайшего выхода, что описывается формулой:

$$D = \sqrt{((x_{\text{"exit"}} - x_i)^2 + (y_{\text{"exit"}} - y_i)^2 + (z_{\text{"exit"}} - z_i)^2)} \quad (8)$$

Другой важный аспект – избегание препятствий, где агенты корректируют траекторию, чтобы минимизировать столкновения с другими агентами или объектами на пути.

Данные формулы описывают начальное распределение агентов в пространстве до их движения, что важно для моделирования дальнейших действий. В дальнейшем эти формулы могут быть использованы для оценки плотности агентов в разных частях помещения, прогнозирования маршрутов эвакуации и анализа взаимного влияния агентов при движении в условиях ограниченного пространства. При пожаре взаимодействие может играть важную роль. Например, агент может учитывать действия других людей в процессе принятия решения о действиях [11].

На графике (см. рис.2) представлена зависимость времени эвакуации от количества агентов в помещении. Видно, что с увеличением количества агентов эвакуационное время

возрастает. Это объясняется увеличением плотности агентов ρ , определяемой по формуле (3), что приводит к более сложному взаимодействию между ними и увеличению времени выхода. Также на графике показаны интервалы погрешности, учитывающие вариативность в моделируемом процессе. Этот результат соответствует математическому описанию движения агентов (формулы 6 и 7), согласно которым их перемещение зависит от скорости v_i , направления движения θ_i , φ_i и возможных препятствий, включая других агентов. Таким образом, увеличение количества агентов в фиксированном объеме V приводит к более интенсивному взаимодействию и, следовательно, увеличению времени эвакуации.

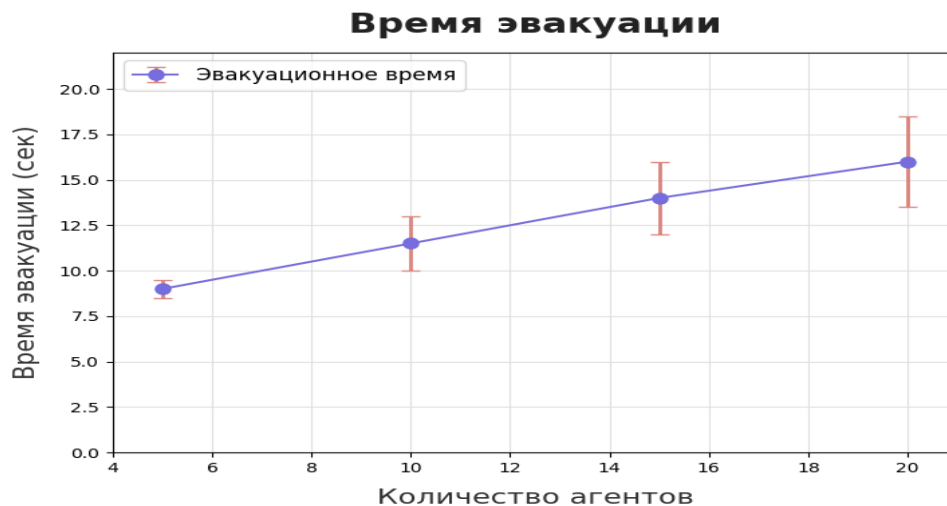


Рисунок 2. Время эвакуации в зависимости от плотности агентов

Имитационное моделирование в виртуальной среде

Взаимодействие агентов с виртуальной средой строится на основе декартовой системы координат, представленной на рисунке 1. Формулы движения агентов в 3D (включая перемещение по оси Z) адаптируются к VR, что позволяет учитывать движение по лестницам, наклонным поверхностям и в условиях ограниченной видимости. При этом основными параметрами является позиция агента (x_i, y_i, z_i) , которые обновляются в реальном времени с учетом условий среды. Учитывается скорость v_i и направление (θ_i, φ_i) , зависящие от наличия препятствий, видимости и уровня паники. Для определения оптимального маршрута эвакуации дистанция до ближайшего выхода D рассчитывается по формуле (8). Моделирование движения агентов в декартовой системе координат служит основой для интеграции с технологиями виртуальной реальности (VR), что позволяет детализировано исследовать поведение человека в условиях пожара. В VR-окружении симулируются различные сценарии критических ситуаций, включая распространение огня, задымление и динамическое изменение условий эвакуации. UE помогает интегрировать с 3D-средой и VR путем программирования агентов с помощью встроенных инструментов, таких как Blueprints (визуальное программирование) и C++ (классическое программирование). Учитывая, что UE предназначен для создания детализированных и интерактивных симуляций критических ситуаций, можно создать сцены поведения

агентов, которые будут взаимодействовать с виртуальной средой и друг с другом. Поэтому алгоритмы, заложенные в реализованных нами математических формулах, являются основой для создания сцены с агентами и препятствиями в UE.

Таким образом, реализация каждого шага потребует использования специфических инструментов и методов, предоставляемых UE, таких, как Blueprints или программирование на C++.

Рисунки 3 и 4 демонстрируют фрагменты Blueprint-кода, реализующего механизмы падения агента при контакте с огнём. На Рисунке 3 представлен скрипт, отвечающий за падение при взаимодействии с огнём, тогда как на Рисунке 4 показана симуляция этого процесса при столкновении агента с огнём.

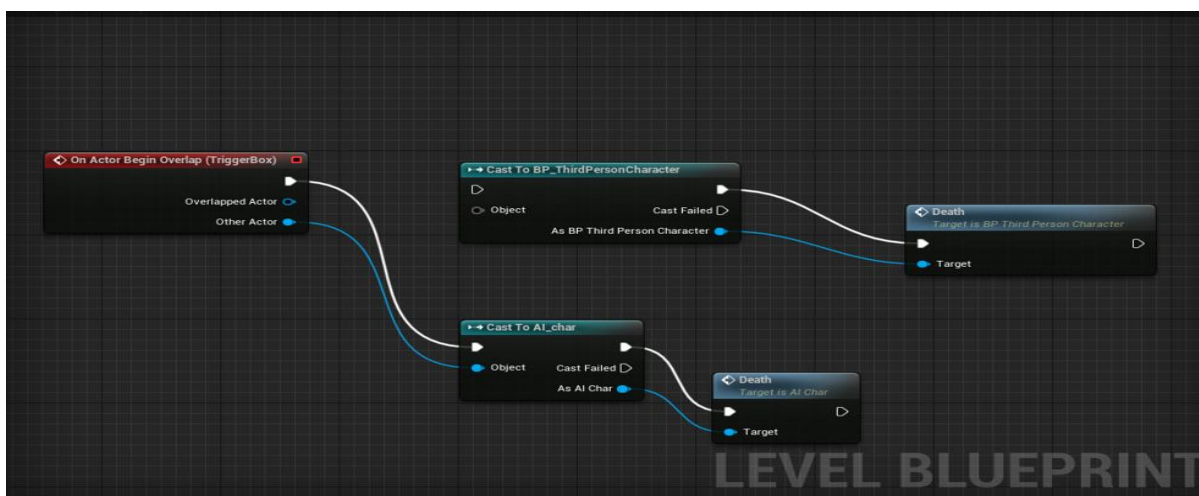


Рисунок 3. Фрагмент Blueprint скрипта – передачи данных AI агенту

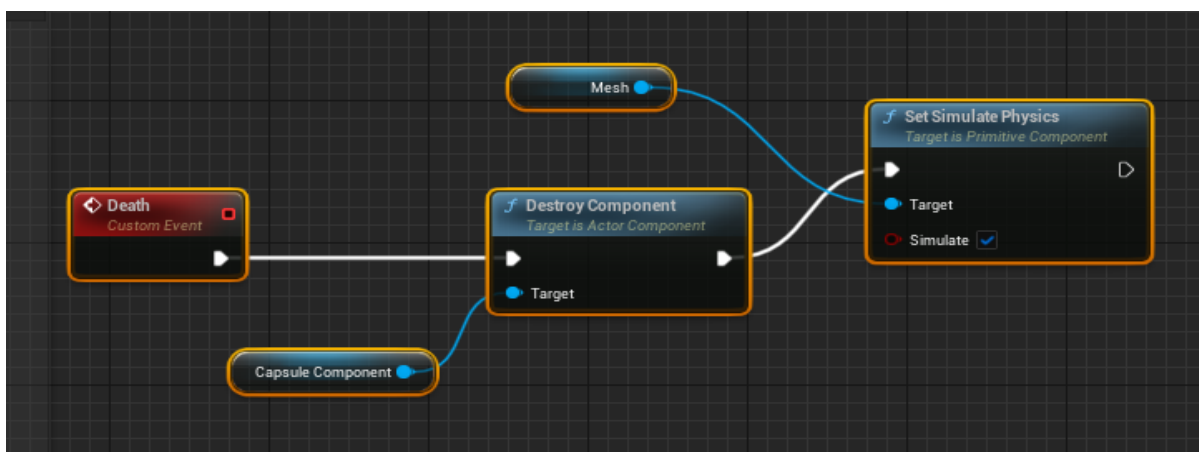


Рисунок 4. Фрагмент Blueprint скрипта, симуляции падения при столкновении с огнём

На рисунке 5 и 6 представлены симуляция взаимодействия агентов (людей) в помещении при пожаре в VR-среде. Продемонстрированы примеры работы AI-агентов в

Unreal Engine 5, использующих Nav Mesh, Target Point, систему EQS и Crowd Controller AI для определения оптимального маршрута эвакуации.

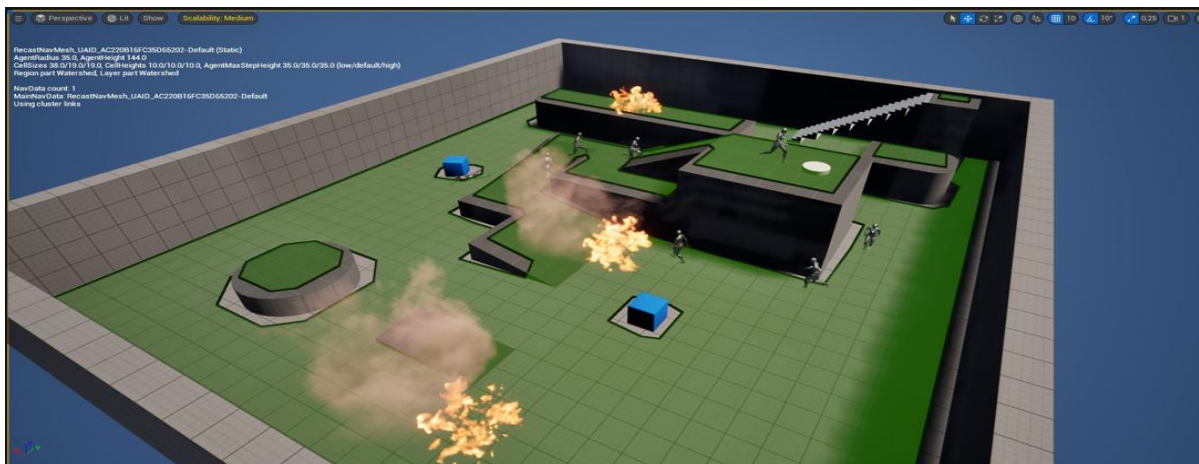


Рисунок 5. Симуляция эвакуации агентов в VR-среде при пожаре. Визуализация использования AI-агентов в Unreal Engine 5 для поиска оптимального маршрута эвакуации с применением Nav Mesh, Target Points, EQS-системы и Crowd Controller AI



Рисунок 6. Поведение AI-агентов в условиях пожара. Визуализация реакции агентов на распространение огня в VR-среде, моделирующей процесс эвакуации. Принятие решений для поиска безопасного маршрута

Результаты и Обсуждение

Разработанная модель агентов включает параметры их координат (x, y, z), скорости движения и алгоритмов принятия решений. Агенты ориентируются в пространстве, учитывая минимальное расстояние до выхода и избегая препятствий. Представлены формулы расчета плотности агентов, описания границ помещения и уравнения движения в трехмерной системе координат. В VR-среде реализована визуализация движения агентов с учетом факторов задымленности, паники и изменения обстановки.

Программная реализация модели выполнена в UE с применением Blueprints и C++. В ходе исследования подтверждена возможность точного моделирования поведения агентов при пожаре в 3D-пространстве. Использование VR позволяет анализировать поведение пользователей в стрессовых ситуациях и корректировать математические модели эвакуации [12]. Внедрение алгоритмов избегания препятствий и адаптивных маршрутов повышает точность предсказания движения агентов. Интеграция в UE демонстрирует перспективность дальнейшего развития VR-моделирования для изучения поведения человека в чрезвычайных ситуациях.

Заключение

Разработанная имитационная модель поведения человека в критической ситуации позволяет анализировать эвакуационные процессы и выявлять факторы, влияющие на успешность эвакуации. Интеграция с VR и движком UE делает возможным создание детализированных и интерактивных симуляций, полезных для обучения персонала и разработки эффективных стратегий эвакуации. Дальнейшие исследования направлены на расширение функционала модели, включая учет психологических факторов и взаимодействие агентов в группах.

Вклад авторов:

Р.М. Садвакасов – сбор данных, анализ, моделирование, визуализация, экспериментальная часть, заключение.

К.Ж. Садвакасова - концепция, методология, анализ литературы, помощь с экспериментом, написание, редактирование.

Список литературы

1. Feng Y., Duives D. C., Hoogendoorn S. P., Using virtual reality to study pedestrian exit choices during evacuation, *Safety Science*, 2021, Vol. 137, P. 105158, DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105158. – статья
2. Guo Y., Zhu J., Wang Y. et al., A Virtual Reality Simulation Method for Crowd Evacuation in a Multiexit Indoor Fire Environment, *International Journal of Geo-Information*, 2020, Vol. 9, No. 12, P. 750, DOI: 10.3390/ijgi9120750. – статья
3. Marín-Morales J., Llinares C., Guixeres J., Alcañiz M., Emotion Recognition in Immersive Virtual Reality: From Statistics to Affective Computing, *Sensors*, 2020, Vol. 20, P. 5163, DOI: 10.3390/s20185163. – статья
4. Juřík V., Uhlík O., Snopková D. et al., Analysis of the Use of Behavioral Data from Virtual Reality for Calibration of Agent-Based Evacuation Models, *Heliyon*, 2023, Vol. 9, e14275, DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14275. – статья
5. de Lama C., González-Gaya C., Sánchez-Lite A., An Experimental Test Proposal to Study Human Behaviour in Fires Using Virtual Environments, *Sensors*, 2020, Vol. 20, P. 3607, DOI: 10.3390/s20123607. – статья
6. Ahmed I., Harjunen V. J., Jacucci G., Ravaja N., Ruotsalo T., Spapé M. M., Touching Virtual Humans: Haptic Responses Reveal the Emotional Impact of Affective Agents, *IEEE*

- Transactions on Affective Computing, 2023, Vol. 14, No. 1, P. 331–345, DOI: 10.1109/TAFFC.2020.3038137. – статья
7. Muhamad S. B. S., Bahrin M. H., Virtual Environments Simulation in Research Reactor, AIP Conference Proceedings, 2017, Vol. 1799, No. 1, P. 050007, DOI: 10.1063/1.4972941. – труды конференции
 8. Muñoz J. E., Lavoie J. A., Pope A. T., Psychophysiological Insights and User Perspectives: Enhancing Police De-Escalation Skills through Full-Body VR Training, Frontiers in Psychology, 2024, Vol. 15, P. 1390677, DOI: 10.3389/fpsyg.2024.1390677. – статья
 9. Al Lawati H. A. J., The Path of UNITY or the Path of UNREAL? A Comparative Study on Suitability for Game Development, Journal of Student Research, Fourth Middle East College Student Research Conference, Muscat, Sultanate of Oman, 2025. – труды конференции
 10. Brookes J., Warburton M., Alghadier M. et al., Studying Human Behavior with Virtual Reality: The Unity Experiment Framework, Behavior Research Methods, 2020, Vol. 52, P. 455–463, DOI: 10.3758/s13428-019-01242-0. – статья
 11. Merkuriev Y., The Modelling and Simulation of Complex Systems: Methodology and Practice, Information Technology and Management Science, 2012, Vol. 15, P. 32–41, DOI: 10.2478/v10313-012-0005-8. – статья
 12. Joo J. H., Lee H., Lee S. et al., Immersive Emotion Analysis in VR Environments: A Sensor Data Fusion Approach, Electronics, 2024, Vol. 13, No. 8, P. 1494, DOI: 10.3390/electronics13081494. – статья

Р.М. Сәдуақасов*, Қ.Ж.Сәдуақасова

Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Сыни жағдайдағы адам мінезін зерттеудің қазіргі тәсілдері: 3D агенттерді virtual realitya интеграциялау

Аңдатпа. Қазіргі жағдайда өрт сияқты сыни жағдайларда адамның мінез-құлқын модельдеу эвакуациялық процестердің қауіпсіздігі мен тиімділігін арттыру үшін ерекше өзектілікке ие болады. Виртуалды шындық (VR) технологияларының дамуы осындай жағдайларды зерттеуге және талдауға жаңа мүмкіндіктер ашады. Зерттеудің мақсаты-қиын жағдайларда олардың мінез-құлқын талдауға және эвакуациялық маршруттарды болжауға мүмкіндік беретін агенттердің Имитациялық 3D моделін жасау. Жұмыстың негізгі бағыттары агенттердің қозғалысының математикалық моделін құруды, виртуалды ортада эвакуация алгоритмдерін енгізуді және нәтижелерді визуализация мен талдау үшін ойын қозғалтқыштарына біріктіруді қамтиды. Зерттеудің ғылыми маңыздылығы күрделі архитектуралық жағдайларда адамдардың өзара әрекеттесу ерекшеліктерін ескеретін және әртүрлі сценарийлерде агенттердің мінез-құлқын талдауға мүмкіндік беретін алгоритмдерді әзірлеу болып табылады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы мынада: құрылған модель қызметкерлерді оқыту, эвакуация жоспарларын сынау және қауіпсіздік тұрғысынан ғимараттарды жобалауды жақсарту үшін пайдаланылуы мүмкін. Зерттеу әдістемесі агенттердің мінез-құлқын математикалық модельдеуді, эвакуация маршруттарын есептеу үшін оңтайландыру алгоритмдерін қолдануды, сондай-ақ Unreal

Engine (UE) көмегімен модельді виртуалды ортаға біріктіруді қамтиды. Зерттеу нәтижесінде өрт кезінде адамдардың қозғалысын болжауға, эвакуациялық маршруттардың тиімділігін бағалауға және эвакуация процесіне әртүрлі факторлардың әсерін талдауға мүмкіндік беретін модельдеу тәсілі ұсынылды. Алынған нәтижелер қауіпсіздік зерттеулерінде, Төтенше жағдайлар машиналарын әзірлеуде және архитектуралық шешімдерді жетілдіруде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: виртуалды шындық, Unreal Engine, агент, сыни жағдай, Имитациялық модельдеу

R.M. Sadvakassov*, K.Zh. Sadvakassova

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

Modern approaches to studying human behavior in a critical situation: integration of 3D agents into virtual reality

Abstract. In modern conditions, modeling human behavior in critical situations, such as fire, is becoming particularly relevant to improve the safety and effectiveness of evacuation processes. The development of virtual reality (VR) technologies opens up new opportunities for research and analysis of such situations. The aim of the research is to develop a 3D simulation model of agents that allows analyzing their behavior in critical situations and predicting evacuation routes. The main areas of work include building a mathematical model of agent movement, implementing evacuation algorithms in a virtual environment, and integrating the results into game engines for visualization and analysis. The scientific significance of the research lies in the development of algorithms that take into account the peculiarities of human interaction in complex architectural conditions and allow analyzing the behavior of agents in various scenarios. The practical significance of the work lies in the fact that the created model can be used for staff training, testing evacuation plans and improving the design of buildings in terms of safety. The research methodology includes mathematical modeling of agent behavior, the use of optimization algorithms to calculate evacuation routes, as well as the integration of the model into a virtual environment using the Unreal Engine (UE). As a result of the research, an approach to modeling is proposed that allows predicting the movement of people in a fire, evaluating the effectiveness of evacuation routes and analyzing the influence of various factors on the evacuation process. The results obtained can be used in safety research, the development of simulators for emergency services and the improvement of architectural solutions.

Keywords: virtual reality, Unreal Engine, agent, critical situation, simulation.

References

1. Feng Y., Duives D. C., Hoogendoorn S. P., Using virtual reality to study pedestrian exit choices during evacuation, *Safety Science*, 2021, Vol. 137, P. 105158, DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105158. – article
2. Guo Y., Zhu J., Wang Y. et al., A Virtual Reality Simulation Method for Crowd Evacuation in a Multiexit Indoor Fire Environment, *International Journal of Geo-Information*, 2020, Vol.

- 9, No. 12, P. 750, DOI: 10.3390/ijgi9120750. – article
3. Marín-Morales J., Llinares C., Guixeres J., Alcañiz M., Emotion Recognition in Immersive Virtual Reality: From Statistics to Affective Computing, *Sensors*, 2020, Vol. 20, P. 5163, DOI: 10.3390/s20185163. – article
 4. Juřík V., Uhlík O., Snopková D. et al., Analysis of the Use of Behavioral Data from Virtual Reality for Calibration of Agent-Based Evacuation Models, *Heliyon*, 2023, Vol. 9, e14275, DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14275. – article
 5. de Lama C., González-Gaya C., Sánchez-Lite A., An Experimental Test Proposal to Study Human Behaviour in Fires Using Virtual Environments, *Sensors*, 2020, Vol. 20, P. 3607, DOI: 10.3390/s20123607. – article
 6. Ahmed I., Harjunen V. J., Jacucci G., Ravaja N., Ruotsalo T., Spapé M. M., Touching Virtual Humans: Haptic Responses Reveal the Emotional Impact of Affective Agents, *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2023, Vol. 14, No. 1, P. 331–345, DOI: 10.1109/TAFFC.2020.3038137. – article
 7. Muhamad S. B. S., Bahrin M. H., Virtual Environments Simulation in Research Reactor, *AIP Conference Proceedings*, 2017, Vol. 1799, No. 1, P. 050007, DOI: 10.1063/1.4972941. – conference proceedings
 8. Muñoz J. E., Lavoie J. A., Pope A. T., Psychophysiological Insights and User Perspectives: Enhancing Police De-Escalation Skills through Full-Body VR Training, *Frontiers in Psychology*, 2024, Vol. 15, P. 1390677, DOI: 10.3389/fpsyg.2024.1390677. – article
 9. Al Lawati H. A. J., The Path of UNITY or the Path of UNREAL? A Comparative Study on Suitability for Game Development, *Journal of Student Research, Fourth Middle East College Student Research Conference, Muscat, Sultanate of Oman*, 2025. – conference proceedings
 10. Brookes J., Warburton M., Alghadier M. et al., Studying Human Behavior with Virtual Reality: The Unity Experiment Framework, *Behavior Research Methods*, 2020, Vol. 52, P. 455–463, DOI: 10.3758/s13428-019-01242-0. – article
 11. Merkuriev Y., The Modelling and Simulation of Complex Systems: Methodology and Practice, *Information Technology and Management Science*, 2012, Vol. 15, P. 32–41, DOI: 10.2478/v10313-012-0005-8. – article
 12. Joo J. H., Lee H., Lee S. et al., Immersive Emotion Analysis in VR Environments: A Sensor Data Fusion Approach, *Electronics*, 2024, Vol. 13, No. 8, P. 1494, DOI: 10.3390/electronics13081494. – article

Сведения об авторах:

Р.М. Садвакасов - автор для корреспонденции, магистр технических наук по специальности «Вычислительная техника и программное обеспечение», преподаватель кафедры «Технологии искусственного интеллекта», Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, ул. Сатпаева, 2, 010000, Астана, Казахстан.

К.Ж. Садвакасова – кандидат педагогических наук., и.о. доцент кафедры «Компьютерная и программная инженерия», Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, ул. Сатпаева, 2, 010000, Астана, Казахстан.

Р.М.Сәдуақасов - «Есептеу техникасы және бағдарламалық қамтамасыз ету» мамандығы бойынша техникалық ғылымдар магистрі, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Жасанды интеллект технологиялары» кафедрасының оқытушысы, Сәтбаева көшесі, 2, 010000, Астана, Қазақстан

Қ.Ж. Сәдуақасова – педагогика ғылымдарының кандидаты, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Компьютер және бағдарламалық қамтамасыз ету инженериясы» кафедрасының доцент м.а., Сәтбаева көшесі, 2, 010000, Астана, Қазақстан.

RM. Sadvakassov - Master of Technical Sciences in the specialty «Computer Science and Software», teacher of the department «Artificial Intelligence Technologies», at the L.N. Gumilyov Eurasian National University, located at 2 Satpayeva Streed, 010000, Astana, Kazakhstan.

K.Zh. Sadvakassova – Candidate of Pedagogical Sciences, Acting Associate Professor of the Department of «Computer and Software Engineering», at the L.N. Gumilyov Eurasian National University, located at 2 Satpayeva Streed, 010000, Astana, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 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/>)



IRSTI 55.09.43

Review

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-122-136>

Modern composite armor materials

Zh.M. Ramazanova¹ *, G.A. Kokaeva* ², A.E. Zhakupova ¹,
O.K. Abdirashev ¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan

²S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan

E mail: zhanat2005@yandex.kz

Abstract. Currently, composite armored vehicles based on a ceramic layer, polymer and natural fibers are of great interest. This work is a review article and includes scientific works over the past 18 years. The aim of the work is to generalize literary data on research on the creation of armored vehicles. Camamosetosite armor based on various brands of Kevlar is a promising material. At the same time, natural materials in their ballistic properties are not inferior to polymeric materials. Widespread use in this field of research and nanomaterials. The use of carbon nanotubes that differ in unique strength properties can significantly reduce the mass of body armor. When using nanomaterials for body armor can reduce its thickness by 15-35 times. Promising are also multilayer metal armored vehicles obtained by explosion welding by explosion. Light metals as aluminum and titanium are used as metal materials. As a result of heat treatment in the structure of composite material, intermetallic layers of TiAl₃ with a thickness of 90-100 microns are formed. It is known that intermetallic compounds are characterized by high physical and mechanical properties. In this work, various composite materials are considered for anti-ocal resistance and resistance to high-speed impact.

Keywords: armor materials, individual protection, damaging elements, fragments, composite materials, ceramics

Received 17.03.2025. Revised 17.05.2025. Accepted 29.08.2025. Available online 30.09.2025

*the corresponding author

Introduction

Modern military conflicts, particularly in localized wars and armed engagements, highlight the crucial need to protect soldiers from various types of weaponry. The likelihood of soldiers being wounded by high-speed bullets is significantly higher in such conflicts. Consequently, the demand for advanced composite materials with superior protective properties has increased. While modern body armor effectively intercepts projectiles, the residual energy from bullets or fragments can still cause severe internal injuries, behind-armor trauma, and even fatalities. The development of these materials prioritizes reducing weight, ensuring that the surface density remains within the optimal range of 50-80 kg/m².

To counter low-energy threats, textile armor made from high-modulus and high-strength polyaramid and polyethylene fibers is commonly employed. In contrast, protection against high-energy threats necessitates composite materials featuring a rigid ceramic layer (screen) combined with a laminated organoplastic backing (substrate) [1]. Thus, the primary challenge lies not only in fragmenting the incoming projectile but also in effectively decelerating or halting the resulting fragments to minimize secondary damage. In view of this, work is devoted to reviewing publications from open sources that focus on the research and development of composite armor materials with superior protective capabilities.

The methodology

This article is a literary review of scientific works over the past 18 years. When writing the article, SCOPUS, ELIBRARY, CROSSREF, SPRINGER for the above keywords were used. When writing this article, scientific publications were used, containing an evidence-based experimental approach to the subject under study.

Findings/Discussion

One of the most significant advancements in armor material development is the creation of ceramic composite armor [1]. Compared to steel armor, ceramic composite armor offers several advantages, including lower surface density (weight per 1 m²).

The test results are given in Table 1.

Table 1. Results of firing oxide ceramic-based ammunition with increased penetration 7H39 (1, 2) and 7H13 (3) from a distance of 10 m [1].

Armor type	Armor thickness, mm	Substrate thickness, mm	Layers of substrate broken through, %	Surface density, kg/m ²
Standard with fabric	19	9,5	45	46
With flat-oriented substrate	14	4	12	40,8
With flat-oriented substrate and a thin screen	13	4	18	36,7

To improve the mass-dimensional parameters of armor consisting of a ceramic layer and an organoplastic layer (substrate), the substrate was improved in [1]. A composite substrate with a flat-oriented protective structure is proposed, where untwisted threads are laid orthogonally. As can be seen from Table 1, the use of a new substrate allows for a significant reduction in armor

thickness. This results in the armor panel becoming lighter and more effective. When considering the use of composite materials in bulletproof vests, Kevlar occupies a special place [2, 3]. Kevlar fabric has a tensile strength of 3620 MPa and a low relative density of 1.44 [2].

These properties are important when protecting people from high-impact bullets [2, 3]. The properties of some Kevlar grades are given in Figure 1.

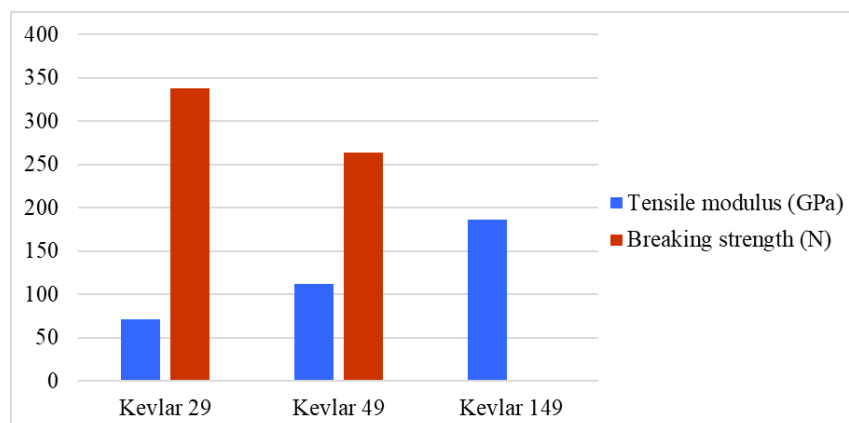


Figure 1. Comparison of tensile modulus and breaking strength of Kevlar 29, 49 and 149 [2]

The relative elongation of these materials is shown in Figure 2 [4, 5].

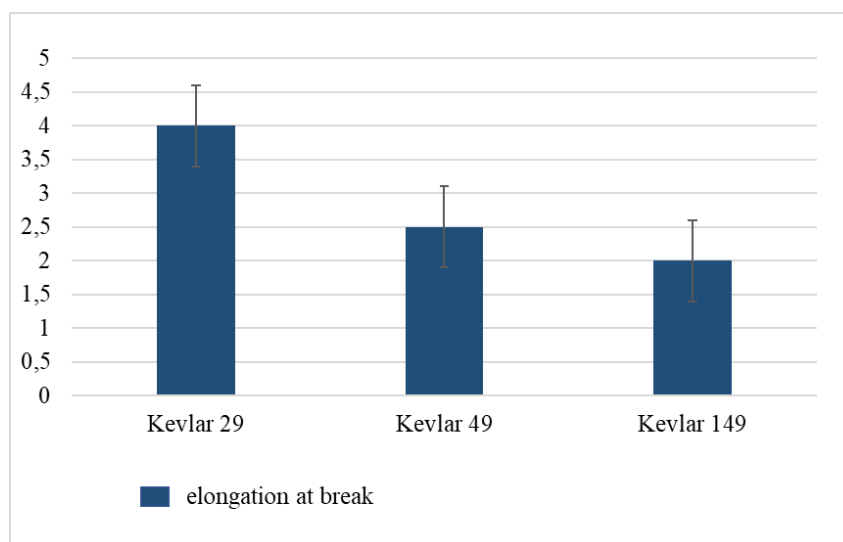


Figure 2. Comparison of the percent elongation of different grades of Kevlar

Studies on the impact behavior of Kevlar/epoxy composite plates with varying thicknesses and layup sequences showed satisfactory results [6]. The effect of thickness and layup sequence on energy absorption capacity was investigated under high-velocity impact conditions. The plates were placed at a distance of 10 meters from the muzzle of a pistol, and a Parabellum 9×19 mm bullet was fired at a velocity of 390 ± 10 m/s. The authors demonstrated that the 0/90 layup sequence is the most effective for impact resistance. In work [7], S-2 glass fibers are used as a

composite armor material. These fibers have a composition of SiO₂ 65 wt.%, Al₂O₃ 25 wt.%, and MgO 10 wt.%. This material exhibits higher deformation before failure and a greater modulus of elasticity than conventional weakly alkaline alumino-borosilicate fibers, which have a composition of SiO₂ 54 wt.%, Al₂O₃ 14 wt.%, CaO + MgO 22 wt.%, and B₂O₃ 10 wt.%. Recently, strong organic fibers such as poly (p-phenylene benzobisoxazole) (PBO) and poly-{2,6-diimidazo[4,5-b:4',5'-e] pyridinylen-1,4(2,5-dihydroxy) phenylene} (PIPD, known as M5 fiber) have been used in composite materials for flexible armor. Flexible composite armor is primarily used for individual protection.

Kevlar fabrics, which are widely used in protection systems, contribute to environmental pollution during disposal and have a negative impact on the ecosystem. Researchers are increasingly proposing the use of environmentally friendly, natural materials [8-10]. For example, in study [8], an eco-friendly lightweight material is used instead of Kevlar fabric. The proposed material exhibits excellent properties for absorbing and dissipating kinetic energy. Table 2 presents comparative ballistic characteristics of soft and hard armor made from natural fibers [8]. The experimental conditions are described in the study [8].

Table 2. Ballistic characteristics of materials

Nº	Fiber	Matrix	Energy absorption (J)	Ballistic limit (m/s)	References
1	Kenaf/Kevlar (30/70)	Epoxy	148	-	[11]
2	Kenaf/Kevlar (Vf6/Vf 47)	Epoxy	175	590	[12]
3	Coconut sheath/Kevlar (wt% 5/25)	Epoxy	240	-	[13]
4	Curaua fiber (30 Vf)/epoxy composites	Epoxy	197	-	[14]
5	Kevlar/Basalt (50/50)	Polypropylene	112	-	[15]
6	Piassava fiber (10 vf)	Epoxy	272 ± 19	236 ± 8	[16]
7	Fique fiber	Polyester	155 ± 7	-	[17]
8	Fique fabric	Polyester	154 ± 5	-	[8]

As seen in Table 2, composite materials based on natural fibers are comparable in properties to Kevlar-based composite materials.

In study [18], a technological principle for manufacturing combined armor with a ceramic layer was developed. The ceramic material produced exhibits key characteristics that are not inferior to those of commercially manufactured armor ceramics. The work also developed a highly elastic polymer binder using the urethane elastomer SKU-PFL. Diamet X was used for curing. It was shown that to ensure the quality of poly-ceramic armor, the polymer binder content in the composite substrate should be maintained at 40%. The composite based on the developed binder significantly outperforms the epoxy-based composite: by 20% in terms of anti-fragmentation resistance and by four times in delamination strength [18]. The utilization of nanotube-based composite materials presents remarkable opportunities [19]. The properties of the developed ceramic material are presented in Table 3. The application of carbon nanotubes is linked to their unique properties, such as high mechanical strength, with a Young's modulus reaching approximately 7000 GPa. In contrast, steel, titanium, and iridium alloys used for manufacturing military-grade body armor

have a modulus value ranging from 200 to 520 GPa.

Table 3. Physical and mechanical characteristics of armor ceramics [18]

Material	Density, g/cm ³	Hardness, GPa	Bending strength, MPa	Fracture toughness, MPa√m	Modulus of elasticity, GPa	Stiglitz criterion, (GPa ² ·m ³)/kg
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	3,9	12-16	250-350	2,5-3,4	200-300	0,6-1,2
Reaction-sintered silicon carbide (SiC)	3,1	18-20	260-320	2,2-3,5	360-380	2,1-2,5
Boron carbide (B ₄ C)	2,5	28-34	320-400	3,3	360-400	4,0-5,4
Developed carbide ceramics	2,7	25-28	280-380	2,0-2,5	380-400	3,5-4,1

The deformation force is given by:

$$F=S \cdot E \cdot |\xi| \quad (1)$$

where S is the area of the deformable surface, E is Young's modulus, $|\xi|$ is the relative deformation.

From the formula, the relative deformation will be equal to

$$|\xi|=F/(S \cdot E) \quad (2)$$

With equal F and S, the deformation of body armor made from ceramics and carbon nanotubes under bullet impact will be 15-35 times lower compared to body armor made from steel, titanium, and other alloys. As a result, the thickness of body armor can be reduced by 15-35 times, significantly decreasing the overall weight of the product [19]. The use of fibers based on nanostructured materials makes it possible to create highly efficient armored materials [20]. Nanotubes such as SiO₂, Al₂O₃, SiC, inorganic fullerenes, MoS₂ nanostructures, WS₂ can be used as nanomaterials. The use of nanomaterials leads to a significant improvement in mechanical strength, tensile strength, modulus of elasticity of armored materials. Nanomaterials also contribute to energy absorption. When reinforcing with nanomaterials, it is necessary to pay attention to such parameters as size, morphology, distribution of nanomaterials in the polymer matrix. Control and regulation of the above parameters affects ballistic protection and energy absorption by tissue nanocomposites. By optimizing the parameters of filling with nanomaterials, it is possible to obtain ultra-strong armor material [20].

The requirements for enhanced armor reactivity include improved nanoscale properties of composite materials, such as reduced weight, high strength, increased durability, enhanced reactivity, and the ability to modify or adjust specific characteristics [20]. To protect heavy machine guns from fire, structural features of composite armor are proposed [21]. The design proposed by the authors for both small-caliber and large-caliber bullets consists of a crushing-deflecting layer made of a superhard ceramic material. Ceramic elements are made in form of cylinders with hexagonal belt. The presence of a hexagonal belt prevents the penetration of small-diameter armor-piercing bullets through this layer. Ceramic elements are assembled in one row

and fixed with polymer material. The retarding layer can be made of various fibers, a polymer matrix. The main outer layer is made of durable fabric using Ruslan thread. When creating composite armor material, the outer layer is immediately installed after the polymer fills the upper surface of the ceramic elements. Good adhesion of the outer layer to the polymer matrix is achieved. Other designs of armored materials are also given in the work, as well as their advantages and disadvantages are described.

Various composite materials for shatter resistance and impact resistance have been studied in [22]. It is known that when creating a composite material, the property of the product is significantly influenced by the polymer matrix. In this work, three types of matrices were studied: ED-20 epoxy resin and an amine-type hardener; polyurethane polymer; polyolefin thermoplastic. A Ruslan (58.8 tex) aramid yarn fabric was used as filler for all three composites. In the shatter resistance test V50, a positive result was obtained on a composite based on a thermoplastic matrix. V50 (m/s) of the composite under study was 538, using a plain weave fabric of Ruslan thread as a reinforcing material. But the main disadvantage of this polymer material is its destruction under the influence of heat, oxygen, ionizing radiation. As a result of these effects, the composite material becomes brittle over time. This inevitably leads to a reduction in the life of the article made of this composite. An intermediate result of V50 (m/s) was obtained for the composite based on the polyurethane matrix of 457, which is also not bad. A low result was obtained with a composite where epoxy resin was used as binder (V50 (m/s) = 391). However, when modifying the epoxy resin, it is possible to change the structure of the matrix and significantly increase the impact resistance of the composite [22].

One of the promising areas is the production of multilayer metal armor materials using light metals [23]. These materials are characterized by high bullet resistance and structural strength along with low specific gravity. The authors of the development produced a metal composite using explosion welding technology. In this case, permanent metal connections are formed at the interatomic level. To obtain a composite material of the composition B95+VT1-0+B95+VT1-0+B95, a plane-parallel explosion welding scheme was used. An aluminum alloy was used as a matrix. In order to improve the tactical and technical characteristics, an intermetallic layer was formed in the structure of the composite material due to heat treatment. The thickness of the highly hard intermetallic TiAl₃ layer was 90-100 μm. The intermetallic layer was formed at a temperature of 6250C for 300 hours. Ballistic tests of the developed material showed high results, which demonstrates the prospects of the composite material. In work [24], an additional intermediate third layer is proposed for the well-known armored protection design described in work [1]. This layer has a ceramic-polymer composition. The ceramic filler consists of boron carbide powder, silicon carbide, or hollow ceramic spheres. To reduce the mass of the intermediate layer and the overall weight of the armor material, hollow spheres were primarily used. Polymer substances were employed as binders. To maintain a consistent thickness of the intermediate layer, polymer honeycomb structures were utilized. The proposed design with an intermediate layer improves ballistic performance. Particular attention should be given to the work of the authors in [25], who developed the third-generation Rusar-C fiber. This fiber exhibits high physical and mechanical properties. According to [25], the developed fiber surpasses the well-known Kevlar fiber in terms of specific breaking load (cN/tex). The tensile strength of Rusar-C fibers in microplastic (kg/mm²) is 530–600, compared to Kevlar's 380–400. The superior performance of Rusar-C fibers is achieved through advancements in technological processes during fiber production. The dry-wet spinning method was used in this study. The developed fibers are used to manufacture threads with linear

densities of 29.4, 58.8, and 100 tex for special-purpose fabrics.

Tests on products made from Rusar-C fibers for anti-fragmentation resistance in general-purpose body armor, compared to similar products made from Ruslan fiber, showed a 2% improvement. When incorporated into a composite material with a polyurethane binder, the developed fiber demonstrated a 10% increase in anti-fragmentation resistance (m/s), a 25% increase in flexural strength (MPa), and a 25% increase in tensile strength (MPa) compared to Ruslan fiber.

To provide military personnel with bulletproof vests with improved injury safety properties, the authors of the work [26] propose to provide bulletproof vests with shock-absorbing support. The developed body armor has pockets with armored panels with shock-absorbing properties. Shock-absorbing support consists of rollers forming chambers made of polyvinyl chloride. Outside, the roller is covered with a flock fabric, the inner part is covered with a polymer film of carbon nanomaterial. A feature of the design is that each roller is filled with microspheres together with a viscoelastic foam damper. The solution of the injury safety problem is achieved due to a certain height of the shock-absorbing support, increased shock-absorbing properties of the support, the presence of an internal coating made of a polymer film. This polymer film should contain at least two layers of carbon elements, which include carbon nanotubes, graphenes and other nanomaterials. Microspheres can have different diameters $20 \cdot 10^3 \text{ nm}$ - $150 \cdot 10^3 \text{ nm}$.

The authors [27] have developed a method for obtaining a unique ceramic based on aluminum oxynitride, which can be used for armored materials. To obtain said ceramic material, the starting components are mixed in isopropyl alcohol medium. The initial components are used in the form of powders of aluminum nitride and aluminum hydroxide (grade - chemically pure). Next, the drying process is carried out, then the homogenization of the powders. The formation of aluminum oxynitride takes place at 18500C temperature in a nitrogen atmosphere for 15 minutes. The subsequent step consists in hot pressing at a temperature of 18500C, pressing time of 30 minutes at a pressure of 30 MPa. The first step forms directly the formation of a chemical compound of aluminum oxynitride for 15 minutes. A subsequent operation using a pressure of 30 MPa results in compaction of the material and the production of a dense single-phase homogeneous ceramic. In this method, a simple technology is used, which proceeds in one step. The selected 18500C temperature significantly reduces the time of ceramic formation. Tests of ceramics showed the following results: bending strength 255 MPa; Vickers microhardness 19.9 GPa.

Currently, research in the field of creating "liquid" armor is of wide interest. Earlier in this work, the use of nanomaterials was indicated, which lead to an improvement in the ballistic characteristics of body armor systems. The main component in the creation of "liquid" armor is non-Newtonian liquid [28]. This liquid (STF), when subjected to its shock load or high speed, shows an increase in viscosity and becomes solid. STF exerts great resistance to deformation in ballistic strikes by distributing the force of impact over a larger area of armor. This significantly reduces the likelihood of injury. STFs were introduced into such high-strength materials as Kevlar.

The authors of [28] STF impregnated natural fabrics that were used in body armor. Sisal fabric with simple weaving was used as a natural fabric. During the studies, an STF liquid was prepared at various concentrations of nanosilica in ethyl spiret: 10%, 20%, 30%. Mixing was carried out in a magnetic stirrer and sonicated for 20 minutes. The homogeneous mixture was then placed in an oven for 3-4 hours for baking at 1600C. When baking, personal ethanol evaporated. To impregnate the natural fabric, the previously prepared STF mixture was further mixed with ethyl alcohol in a ratio of 1:2. The resulting mixture was impregnated into the fabric by immersion.

After the complete impregnation process, the fabric was placed in an oven to dry at 900C for one hour. The STF-impregnated fabrics were then collected in a stack of 10 layers and stitched into a diamond throughout the web. Analysis of the EDS of impregnated fabrics showed that at a silica content of 10%, the impregnated fabric contained 1% silica, 80% carbon, and 18.6% oxygen. The 20% silica impregnated fabric assay contained 3.2% silica and the 30% silica impregnated fabric from 3.2% to 4.6%. Ballistic tests of 3 batches of impregnated fabrics (10%, 20%, 30%) showed the highest percentage of energy absorption (54.75%) in fabric impregnated with 30% STF. For fabric impregnated with 10% STF - 38.66%; for 20% STF tissue - 51.29%. It has been found that after the stress is removed, the viscosity of the STF returns to its original state. Research in this area continues worldwide. This area of research is clearly promising.

Conclusion

An analysis of the scientific and technical literature showed that individual protection against small arms is not always effective when the internal organs of a soldier are hit by fragments and the residual energy of a bullet. The use of ceramic composite armor, consisting of two layers: ceramic and advanced organoplastic, is promising. Kevlars of various brands have proven themselves well as composite materials in body armor. However, when using composite materials, there are disposal problems, in view of which some environmental damage is caused. The use of natural materials instead of Kevlar fabric is also a promising area. Natural materials in their ballistic characteristics are not inferior to the properties of Kevlar-based composite materials. Natural materials have good breathability, easy to recycle, environmentally friendly. The use of composite materials based on nanotubes is associated with their unique properties as high mechanical strength. The use of nanotubes in composite materials for body armor will significantly reduce their weight. A promising area is research on the creation of "liquid" armor. The use of STFs also results in reduced body armor weight.

The contribution of the authors

Zh.M. Ramazanova - significant contribution to the concept of the work; collection, interpretation of the results of the work, consent to be responsible for all aspects of the work, writing a text;

G.A. Kokaeva - writing a text, critically reviewing its content,

A.E. Zhakupova - analysis or interpretation of the results of the work,

O.K. Abdirashev - collection, analysis or interpretation of the results of the work

References

1. Harchenko E.F., Novaya modifikaciya vysokoeffektivnyh kompozitnyh materialov, Izvestiya Rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk 2, 125-129 (2022) – article Journal article
2. Anand Narayanan Nair, Santhosh Sundharesan, Issa Saif Mohammed Al Tubi., Kevlar-based Composite Material and its Applications in Body Armour: A Short Literature Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering on October, 2020, pp.1-9. – proceedings of the conference Proceedings of the conferences
3. Riaan Stopforth, Sarp Adali., Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles, Defence Technology15(2), 186-192 (2019) – article Journal article

4. Aamir M, Yu M., Correlating Structure Property Relationship of Kevlars by Scattering and Birefringence, International Journal of Scientific and Research Publications 5(9), 2250–3153 (2015) – article Journal article
5. Manigandan S., Computational Investigation of High Velocity Ballistic Impact Test on Kevlar 149, Applied Mechanics and Materials 766-767, 1133–1138 (2015) – article Journal article
6. Sikarwar R S, Velmurugan R, Madhu V., Experimental and analytical study of high velocity impact on Kevlar/Epoxy composite plates, Central European Journal of Engineering 2(4), 638–649 (2012) – article Journal article
7. Paul J. Hogg., Composites in Armor, Materials Science: Composites 314, 1100-1101 (2006) – article Journal article
8. J. Naveen, K. Jayakrishna, Mohamed Thariq Bin Hameed Sultan, Siti Madiha Muhammad Amir., Ballistic Performance of Natural Fiber Based Soft and Hard Body Armour- A Mini Review, Frontiers in Materials 7, 1-6 (2020) – article Journal article
9. Fernanda Santos da Luz, Fabio da Costa Garcia Filho, Michelle Souza Oliveira, Lucio Fabio Cassiano Nascimento, Sergio Neves Monteiro., Composites with Natural Fibers and Conventional Materials Applied in a Hard Armor: A Comparison, Polymers 12, 1920 (2020) – article Journal article
10. N. M. Nurazzi, M. R. M. Asyraf, A. Khalina, N. Abdullah, H. A. Aisyah, S. Ayu Rafiqah, F. A. Sabaruddin, S. H. Kamarudin, M. N. F. Norrrahim, R. A. Ilyas, S. M. Sapuan., A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite for Bullet Proof and Ballistic Applications, Polymers 13, 646 (2021) – article Journal article
11. Jambari, S., Yahya, M. Y., Abdullah, M. R., and Jawaid, M. Woven Kenaf, Kevlar hybrid yarn as potential fiber reinforced for anti-ballistic composite material, Fibers Polym. 18 (3), 563–568 (2017) – article Journal article
12. Yahaya, R., Sapuan, S., Jawaid, M., Leman, Z., and Zainudin, E., Investigating ballistic impact properties of woven kenaf-aramid hybrid composites, Fibers Polym. 17(2), 275–281 (2016) – article Journal article
13. Naveen, J., Jawaid, M., Zainudin, E., Sultan, M. T., and Yahaya, R., Evaluation of ballistic performance of hybrid Kevlar /Cocos nucifera sheath reinforced epoxy composites, J. Textil. Inst. 110(8), 1–11 (2018) – article Journal article
14. de Oliveira Braga, F., Bolzan, L. T., Lima, É. P., Jr., and Monteiro, S. N., Performance of natural curaua fiber-reinforced polyester composites under 7.62 mm bullet impact as a stand-alone ballistic armor, J. Mater. Res. Technol. 6(4), 323–328 (2017) – article Journal article
15. Bandaru, A. K., Patel, S., Sachan, Y., Alagirusamy, R., Bhatnagar, N., and Ahmad, S., Low velocity impact response of 3D angle-interlock Kevlar/basalt reinforced polypropylene composites, Mater. Des. 105, 323–332 (2016) – article Journal article
16. Garcia Filho, F. D. C., Oliveira, M. S., Pereira, A. C., Nascimento, L. F. C., Matheus, J. R. G., and Monteiro, S. N., Ballistic behavior of epoxy matrix composites reinforced with piassava fiber against high energy ammunition, J. Mater. Res. Technol. 9(2), 1734–1741 (2020) – article Journal article
17. Pereira, A. C., Assis, F. S. d., Garcia Filho, F. d. C., Oliveira, M. S., Lima, E. S., Lopera, H. A. C., et al., Evaluation of the projectile's loss of energy in polyester composite reinforced with fique fiber and fabric, Mater. Res. 22 (2019) – article Journal article

18. Aniskovich V.A., Ermolenko A.F., Kul'kov A.A., Kompleksnyj nauchno-tekhnologicheskij podhod k sozdaniyu legkoj polimerkeramicheskoy broni, Aviacionnye materialy i tekhnologii 4(53), 45-54 (2018) – article Journal article
19. Azad Agalar ogly Bajramov, El'shan Giyas ogly Gashimov, Aziz Mashallah ogly Talybov, Arif Gasan ogly Gasanov., Kompozitnye materialy na osnove uglerodnyh nanotrubok i primeneniye ih v voennyh celyah, Metallar fizikiasinin müasir problemləri on November, 2016, pp.292-296 – proceedings of the conference Proceedings of the conferences
20. Mohamed S. Selim, Sherif A. El-Safty, Mohamed A. Shenashen, Ahmed Elmarakbi., Advances in polymer/inorganic nanocomposite fabrics for lightweight and high-strength armor and ballistic-proof materials, Chemical Engineering Journal 493, 152-422 (2024) – article Journal article
21. Kulakov N.A., Lyubin A.N., Osobennosti konstrukcii kompozitnoj broni povyshennoj zhivuchesti, Izvestiya MGTU «MAMI» 1(11), 46-51 (2011) – article Journal article
22. Morozova T.V., Dvorcevaya A.M., Zajceva L.V., Osipchik V.S., Svoystva kompozitnyh materialov, ispol'zuemyh v sredstvakh bronezashchity, Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii 6, 94-96 (2018) – article Journal article
23. Kryukov D. B., Aspekty polucheniya legkih bronevyh kompozicionnyh materialov s mekhanizmom lokalizatsii hrupkih treshchin v strukture pri ballisticheskom vozdejstvii, Vestnik PGTU 1(25), 20-28 (2023) – article Journal article
24. A. Smelik, D. F. Bachinin, D. V. Matushkin., Legkie keramicheskie kompozitnie bronesistemi, Vestnik voennogo innovatsionnogo texnopolisa «Era» 4(1), 99-105 (2023) – article Journal article
25. T.V.Morozova, A.M.Dvorsevaya, E.V.Kupriyanova, V.S.Osipchik., Issledovanie perspektivnix aramidnix volokon Rusar-S v sredstvax individualnoy bronezashiti, Uspexi v ximii i ximicheskoy texnologii 6, 65-67 (2019) – article Journal article
26. Patent 212462 Rossijskaya Federaciya, MPK F41H 1/02. Bronezhilet s amortizatsionnym podporom: 2021133547: 17.11.2021: 22.07.2022. Kotosov A.A., Kotosov K.A., Oshkin A.A., Milyaev A.V., ZHukov I.E., Curikov S.G. – p.13 - patent
27. Patent 2794376 Rossijskaya Federaciya, MPK C04B 35/581, C04B 35/645. Sposob polucheniya keramiki na osnove oksinitrida alyuminiya: 2022121864: 11.08.2022: 17.04.2023. Lysenkov A.S., Frolova M.G., Kargin YU.F., Kim K.A., Ahmadullina N.S., Mel'nikov M.D., Ivicheva S.N. – p.5 - patent
28. . Anand Biradar, Jayakrishna Kandasamy, Arulvel S., J. Naveen, Sanjay Mavinkere Rangappa, Suchart Siengchin., Ballistic impact behavior of shear thickening fluid impregnated sisal fabrics, Journal of Materials Research and Technology 32, 4006-4018 (2024) – article Journal article

Ж.М. Рамазанова *1, Г.А. Кокаева*2, А.Е. Жакупова¹, О.К. Абдирашев¹

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ.,
Қазақстан Республикасы

²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ.,
Қазақстан Республикасы

Заманауи композициялық құрыш материалдары

Аңдатпа. Қазіргі уақытта керамикалық қабат, полимер және табиғи талшықтарға

негізделген композициялық бронды материалдар үлкен қызығушылық тудырады. Бұл жұмыс шолу мақаласы болып табылады және соңғы 18 жылдағы ғылыми жұмыстарды қамтиды. Жұмыстың мақсаты-бронды материалдарды жасау бойынша зерттеулер туралы әдеби деректерді жалпылау. Кевлардың әртүрлі маркаларына негізделген керамикалық композиттік бронь перспективалы материалдар болып табылады. Сонымен қатар, табиғи материалдар баллистикалық қасиеттері бойынша полимерлі материалдардан кем түспейді. Зерттеу және наноматериалдар осы салада кеңінен қолданылады. Бірегей беріктік қасиеттерімен ерекшеленетін көміртекті нанотүтікшелерді қолдану броньды кеудешелердің массасын айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді. Денеге арналған наноматериалдарды қолданған кезде оның қалыңдығы 15-35 есе төмендеуі мүмкін. Жарылыспен дәнекерлеу арқылы алынған көп қабатты металл броньды материалдар да перспективалы болып табылады. Металл материалдар ретінде алюминий және титан сияқты жеңіл металдар қолданылады. Термиялық өңдеу нәтижесінде композициялық материалдың құрылымында қалыңдығы 90-100 мкм болатын TiAl3 интерметалл қабаттары пайда болады. Металларалық қосылыстар жоғары физика-механикалық қасиеттерімен сипатталатыны белгілі. Бұл жұмыста сынықтарға және жоғары жылдамдықты соққыға төзімділікке арналған әртүрлі композициялық материалдар қарастырылған.

Түйін сөздер: бронды материалдар, жеке қорғаныс, зақымдайтын элементтер, сынықтар, композициялық материалдар, керамика

Ж.М. Рамазанова*¹, Г.А. Кокаева*², А.Е. Жакупова¹, О.К. Абдирашев¹

¹*Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан*

²*Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан*

Современные композитные бронематериалы

Аннотация. В настоящее время композитные бронематериалы на основе керамического слоя, полимерных и натуральных волокон представляют большой интерес. Данная работа является обзорной статьей и включает в себя научные работы за последние 18 лет. Целью работы является обобщение литературных данных об исследованиях по созданию бронематериалов. Керамокомпозитная броня на основе различных марок кевлара является перспективным материалом. При этом натуральные материалы по своим баллистическим свойствам не уступают полимерным материалам. Широкое применение находит в данной области исследования и наноматериалы. Применение углеродистых нанотрубок, которые отличаются уникальными прочностными свойствами, позволяют значительно снизить массу бронежилетов. При использовании наноматериалов для бронежилетов может уменьшиться его толщину в 15-35 раз. Перспективными также являются многослойные металлические бронематериалы, полученные методом сварки взрывом. В качестве металлических материалов используются легкие металлы как алюминий и титан. В результате термической обработки в структуре композитного материала образуются интерметаллические слои TiAl3 толщиной 90-100 мкм. Известно,

что интерметаллические соединения характеризуются высоким физико-механическими свойствами. В настоящей работе рассмотрены различные композитные материалы на противоосколочную стойкость и стойкость к высокоскоростному удару.

Ключевые слова: бронематериалы, индивидуальная защита, поражающие элементы, осколки, композитные материалы, керамика.

References

1. Харченко Е.Ф., Новая модификация высокоэффективных композитных материалов, Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук 2, 125-129 (2022) - статья
2. Anand Narayanan Nair, Santhosh Sundharesan, Issa Saif Mohammed Al Tubi, Kevlar-based Composite Material and its Applications in Body Armour: A Short Literature Review, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering октябрь 2020 г., с.1-9. – труды конференции
3. Riaan Stopforth, Sarp Adali, Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles, Defence Technology 15(2), 186-192 (2019) – статья
4. Aamir M, Yu M., Correlating Structure Property Relationship of Kevlars by Scattering and Birefringence, International Journal of Scientific and Research Publications 5(9), 2250–3153 (2015) - статья
5. Manigandan S., Computational Investigation of High Velocity Ballistic Impact Test on Kevlar 149, Applied Mechanics and Materials 766-767, 1133–1138 (2015) - статья
6. Sikarwar R S, Velmurugan R, Madhu V., Experimental and analytical study of high velocity impact on Kevlar/Epoxy composite plates, Central European Journal of Engineering 2(4), 638–649 (2012) – статья
7. Paul J. Hogg., Composites in Armor, Materials Science: Composites 314, 1100-1101 (2006) - статья
8. J. Naveen, K. Jayakrishna, Mohamed Thariq Bin Hameed Sultan, Siti Madiha Muhammad Amir., Ballistic Performance of Natural Fiber Based Soft and Hard Body Armour- A Mini Review, Frontiers in Materials 7, 1-6 (2020) – статья
9. Fernanda Santos da Luz, Fabio da Costa Garcia Filho, Michelle Souza Oliveira, Lucio Fabio Cassiano Nascimento, Sergio Neves Monteiro., Composites with Natural Fibers and Conventional Materials Applied in a Hard Armor: A Comparison, Polymers 12, 1920 (2020) – статья
10. N. M. Nurazzi, M. R. M. Asyraf, A. Khalina, N. Abdullah, H. A. Aisyah, S. Ayu Rafiqah, F. A. Sabaruddin, S. H. Kamarudin, M. N. F. Norrrahim, R. A. Ilyas, S. M. Sapuan., A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite for Bullet Proof and Ballistic Applications, Polymers 13, 646 (2021) – статья
11. Jambari, S., Yahya, M. Y., Abdullah, M. R., and Jawaid, M. Woven Kenaf, Kevlar hybrid yarn as potential fiber reinforced for anti-ballistic composite material, Fibers Polym. 18 (3), 563–568 (2017) – статья
12. Yahaya, R., Sapuan, S., Jawaid, M., Leman, Z., and Zainudin, E., Investigating ballistic impact properties of woven kenaf-aramid hybrid composites, Fibers Polym. 17(2), 275–281 (2016) – статья
13. Naveen, J., Jawaid, M., Zainudin, E., Sultan, M. T., and Yahaya, R., Evaluation of ballistic

- performance of hybrid Kevlar, Cocos nucifera sheath reinforced epoxy composites, J. Textil. Inst. 110(8), 1–11 (2018) - статья
14. de Oliveira Braga, F., Bolzan, L. T., Lima, É. P., Jr., and Monteiro, S. N., Performance of natural curaua fiber-reinforced polyester composites under 7.62 mm bullet impact as a stand-alone ballistic armor, J. Mater. Res. Technol. 6(4), 323–328 (2017) – статья
 15. Bandaru, A. K., Patel, S., Sachan, Y., Alagirusamy, R., Bhatnagar, N., and Ahmad, S., Low velocity impact response of 3D angle-interlock Kevlar/basalt reinforced polypropylene composites, Mater. Des. 105, 323–332 (2016) – статья
 16. Garcia Filho, F. D. C., Oliveira, M. S., Pereira, A. C., Nascimento, L. F. C., Matheus, J. R. G., and Monteiro, S. N., Ballistic behavior of epoxy matrix composites reinforced with piassava fiber against high energy ammunition, J. Mater. Res. Technol. 9(2), 1734–1741 (2020) – статья
 17. Pereira, A. C., Assis, F. S. d., Garcia Filho, F. d. C., Oliveira, M. S., Lima, E. S., Lopera, H. A. C., et al., Evaluation of the projectile's loss of energy in polyester composite reinforced with fique fiber and fabric, Mater. Res. 22 (2019) – статья
 18. Анискович В.А., Ермоленко А.Ф., Кульков А.А., Комплексный научно-технологический подход к созданию легкой полимеркерамической брони, Авиационные материалы и технологии 4(53), 45-54 (2018) - статья
 19. Азад Агалар оглы Байрамов, Эльшан Гияс оглы Гашимов, Азиз Машаллах оглы Талыбов, Ариф Гасан оглы Гасанов, Композитные материалы на основе углеродных нанотрубок и применение их в военных целях, Metallar fizikiasının müasir problemləri. V beynəlxalq elmi-praktik konfransın materilları ноябрь 2016 г., с.292-296. – труды конференции
 20. Mohamed S. Selim, Sherif A. El-Safty, Mohamed A. Shenashen, Ahmed Elmarakbi., Advances in polymer/inorganic nanocomposite fabrics for lightweight and high-strength armor and ballistic-proof materials, Chemical Engineering Journal 493, 152-422 (2024) – статья
 21. Кулаков Н.А., Любин А.Н., Особенности конструкции композитной брони повышенной живучести, Известия МГТУ «МАМИ» 1(11), 46-51 (2011) – статья
 22. Морозова Т.В., Дворцевая А.М., Зайцева Л.В., Осипчик В.С., Свойства композитных материалов, используемых в средствах бронезащиты, Успехи в химии и химической технологии 6, 94-96 (2018) - статья
 23. Крюков Д. Б., Аспекты получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин в структуре при баллистическом воздействии, Вестник ПГТУ 1(25), 20-28 (2023) – статья
 24. А. А. Смелик, Д. Ф. Бачинин, Д. В. Матушкин., Легкие керамические композитные бронесистемы, Вестник военного инновационного технополиса «Эра» 4(1), 99-105 (2023) – статья
 25. Т.В. Морозова, А.М. Дворцевая, Е.В. Куприянова, В.С. Осипчик., Исследование перспективных арамидных волокон Русар-С в средствах индивидуальной бронезащиты, Успехи в химии и химической технологии 6, 65-67 (2019) – статья
 26. Патент 212462 Российская Федерация, МПК F41H 1/02. Бронежилет с амортизационным подпором: 2021133547: 17.11.2021: 22.07.2022. Котосов А.А., Котосов К.А., Ошкин А.А., Миляев А.В., Жуков И.Е., Цуриков С.Г. – 13 с. - патент
 27. Патент 2794376 Российская Федерация, МПК C04B 35/581, C04B 35/645. Способ

- получения керамики на основе оксинитрида алюминия: 2022121864: 11.08.2022: 17.04.2023. Лысенков А.С., Фролова М.Г., Каргин Ю.Ф., Ким К.А., Ахмадуллина Н.С., Мельников М.Д., Ивичева С.Н. – 5 с. – патент
28. Anand Biradar, Jayakrishna Kandasamy, Arulvel S., J. Naveen, Sanjay Mavinkere Rangappa, Suchart Siengchin, Ballistic impact behavior of shear thickening fluid impregnated sisal fabrics, Journal of Materials Research and Technology 32, 4006-4018 (2024) – статья

Information about the authors

Ramazanov Zhanat Musanovna - corresponding author, candidate of chemical sciences, associate professor, technology of electrochemical industries, senior teacher, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, st. Kazhymukan, 11, 010000, Astana, Kazakhstan
 Kokayeva Gulnara Aitikenovna - corresponding author, candidate of technical sciences, associate professor, Technological machines and equipment, associate professor, NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agro-Technical Research University», Zhenis avenue, 62, 010011, Astana, Kazakhstan
 Zhakupova Almira Yersainovna - candidate of technical sciences, instruments and methods of experimental physics, associate professor, Department of Space Engineering and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, st. Kazhymukan, 11, 010000, Astana, Kazakhstan
 O.K. Abdirashev - PhD, acting, Associate Professor, Department of Space Engineering and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, st. Satpayeva 2, Astana, Kazakhstan, 8-702-682-16-92, abdirashev_ok@enu.kz

Рамазанова Жанат Мусановна - автор для корреспонденции, кандидат химических наук, доцент, технология электрохимических производств, старший преподаватель, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан

Кокаева Гульнара Айтикеновна - автор для корреспонденции, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Технологические машины и оборудование, ассоциированный профессор, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина», пр. Женис, 62, 010011, Астана, Казахстан

Жакупова Альмира Ерсайиновна – кандидат технических наук, приборы и методы экспериментальной физики, и.о. доцента кафедры «Космическая техника и технологии», Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, ул. Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан

О.К. Абдирашев – PhD, и.о., доцент кафедры «Космическая техника и технологии», Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, ул. Сатпаева 2, Астана, Казахстан, 8-702-682-16-92, abdirashev_ok@enu.kz

Рамазанова Жанат Мусановна- хат-хабар авторы, химия ғылымдарының кандидаты, доцент, электрохимиялық өндіріс технологиясы, аға оқытушы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көшесі, 11, 010000, Астана, Қазақстан

Кокаева Гульнара Айтикеновна - хат-хабар авторы, техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Технологиялық машиналар және абдықтар, «С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Жеңіс даңғылы, 11, 010011,

Астана, Қазақстан

Жакупова Альмира Ерсайиновна – техника ғылымдарының кандидаты, эксперименттік физиканың құралдары мен әдістері, «Ғарыштық техника және технологиялар» кафедрасының доценті м.а., Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көшесі, 11, 010000, Астана, Қазақстан

Ө.К.Әбдірашев - «Ғарыштық техника және технологиялар» кафедрасының доцент м.а., PhD, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі 2, Астана, Қазақстан, 8-702-682-16-92, abdirashev_ok@enu.kz



Copyright: © 2025 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/>).



IRSTI 67.07.01

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-137-154>

Rebranding of the Eurasian nomadic civilization: the importance of the experience of historical nomadism in the context of climate change and aridization of the territories of Kazakhstan.

A.M. Baidaralina , G.D. Maulenova , B.U. Kuspangaliev ,
D.Zh. Baidaralin* 

Kazakh National Research Technical University named after K.I.Satpayev, Almaty, Kazakhstan

E mail: dbaidaralin@gmail.com

Abstract. This article is introducing the ideas of implementing thousands of years old know-hows of the nomadic pastoralists of Kazakhstan to current ecological conditions and challenges of our region. The nomadic pastoralist lifestyle historically has developed in the conditions of arid and semi-arid regions of the Eurasian continent (Eurasian Steppe). This lifestyle was designed and perfected to deal with chronic seasonal droughts and shortages of water. It relied on moving large herds of livestock, mobile architecture and infrastructure, and nomadic technologies. In the modern era, when the cities are overcrowded, while the economy and food security rely mostly on agriculture, vast arid areas of land remain unused, producing zero value both for humanity and the planet Earth. These wastelands were once a thriving ecological system, where the nomadic pastoralism served as an engine for their sustainability. But, once the nomadism was uprooted from those areas, and the population was moved towards urban areas and an agriculture-based economy, they degraded into lifeless deserts. By using the 21st century's technologies, architecture, engineering, energy sources, and materials, it is possible to reintroduce the once-vital nomadic pastoral lifestyle into those empty wastelands, turning them once again into vibrant ecological regions.

Keywords: eco-villages, eco-auls, yurt, nomads, nomadic pastoralism, arid regions, nomadic architecture.

Introduction

Biosystems are extremely unstable in the arid and extra-arid regions of Eurasia, with increased solar activity and sharp continental temperature differences, where repeated droughts, extreme shortages of water and vegetation, and wind erosion processes are typical.

This significantly limits human capabilities, requiring adaptation through special social and technological solutions. In the historical perspective, starting from approximately four thousand years ago, the basis of existence in these conditions became nomadic pastoralism. The Eurasian nomadic pastoralism utilized the husbandry of the five animals – horses, camels, cows, sheep and goats, which served as the origin of nomadic civilizations.



Figure 1. Approximate geographic span of the Eurasian Steppe. Map by D. Baidaralin

In the modern world, despite its relevance, this method of economy remains underestimated in the large, previously nomadic zones, such as Kazakhstan and regions around the Ponto-Caspian Basin. Attempts to introduce agriculture in these conditions are not only ineffective, but also lead to long-term negative consequences: increased soil erosion, desertification, destruction of biodiversity, and deterioration of the steppe, semi-steppe, and desert landscapes.

In the territory of Kazakhstan, with an annual atmospheric precipitation of less than 400 mm and limited water reservoirs, nomads needed large pasture areas for large and small pastoralism. In such arid zones, the population was small, 1-1.5 people per 1 sq. km. The marginal (peripheral), sub-arid zones with a more favorable climate and diverse vegetation were more often areas for settled agriculture, where a semi-nomadic economy was preserved (Pershits, 1961; Markov, 1976). These territories were characterized by a great diversity of economic structures: Central Asia, Western and Southern Siberia, the foothills of Central Asia, river valleys, and lake regions on the border of the arid zone of Eurasia; these marginal zones also belong to the semi-arid (steppe) zones (see map 1). In such places, the ancient urban culture was preserved, through which the Great Silk Way passed with its trade routes and places of travelers' stops (see maps 5-6).

The methodology

The climate of Eurasia formed in the post-glacial era, which in turn was formed in the Holocene Era (approximately from 10,000 years ago to the present), changing significantly over the past millennia (see Table 1 below). This led to the stabilization of the vegetation and soil cover and their

composition, as well as the formation of the water networks, watercourses, rivers, reservoirs, etc. The development of climate on seasonality, horizontal and vertical zonality (Shnitnikov, 1957; Climate of Kazakhstan, 1959; Chupakhin, 1968).

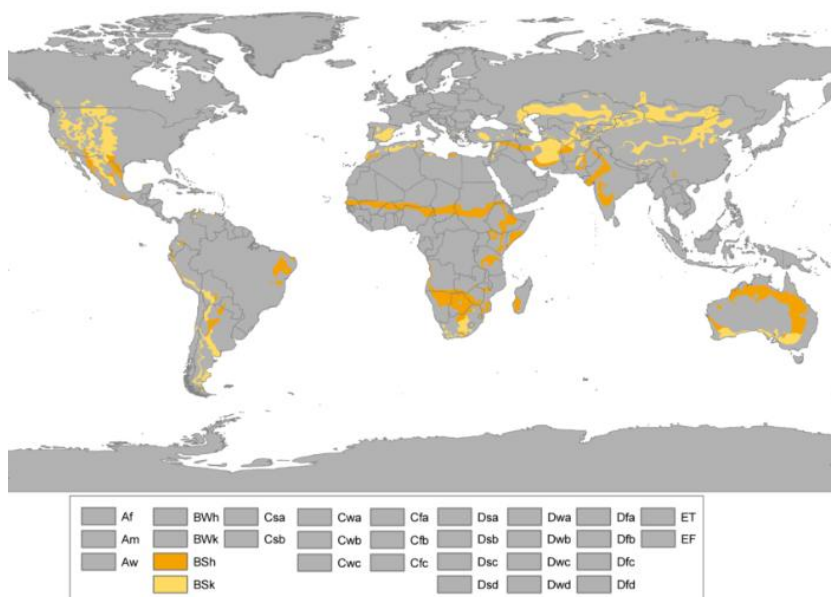


Figure 2. Map 1: Semiarid climate areas – semi-deserts, steppes, sometimes forest-steppe temperate geographical zone.

There are several controversial discussions among various researchers about climate change:

1. The climate fluctuations in Eurasia were cyclical.
2. The Peterson-Shnitnikoz hypothesis, 1800-1900-year cycles of climate fluctuations.
3. A.V. Shnitnikov believes that this rhythm is divided into phases. The 1st, cool-humid phase of 300-500 years, an increase in river runoff, a rise in lake levels, and an increase in climate humidification. The 2nd phase was a stage of dry and warm climate for a period of 1000 years, leading to the retreat of glaciers, the drying up of swamps and wetlands, a decrease in water spaces, and aridization of the climate in general. Shnitnikov suggests that between them there were transitional periods of 100-300 years (Shnitnikov, 1957).
4. Movement from one landscape to another, most sensitive to climate changes - wetting or drying, cooling or warming - marginal zones could be absorbed by areas, from them new marginal zones could emerge along the periphery (Gumilyov, 1966; Veresh, 1979).
5. Those who denied the cyclicity of climate recognized non-periodic fluctuations (Laduri, 1971). Changes in precipitation led to shifts in zones. The general drought in the Afro-Asian region in the 6th and 2nd millennia BC stimulated the development of agriculture and cattle breeding (Nature and Resources, 1984). Similar droughts of the 60s-80s. The 20th century in North Africa led to the aridization of the savanna-Sahel zone, desertification, displacement of agriculture, and migration of the population to cities, changing their way of life and nutrition (Skury, 1984). Climate change in marginal zones has historically led to adaptation of economic activity, life, and transition to nomadism. In Kazakhstan, marginal zones around rivers, lakes, and foothills have been places of a combination of settled and nomadic life.

Table 1. Types of nomadic economy in terms of regional characteristics
(compiled by the author based on the book by Masanov N.E. Nomadic civilization of the Kazakhs, 1995)

№	Type of nomadic economy	Material production	Dwellings	Water resources
1	1st type of nomadic pastoralism is intensive. Western and part of the Central regions of Kazakhstan - the extra-arid zone is arid deserts, semi-desert regions without natural reservoirs with artificial sources of water, and the organization of production had its own characteristics. In the arid regions of Karkaralinsk and Atbasar, cattle were 8-10%, sheep 64-68%, camels a larger %, the rhythm of migration was increased, the amplitude of migration was frequent with short stops, and labor costs were required to provide cattle with water. In winter, they also arrived in waterless and snowless places, wandering all year round. This type of economy had its own features, lifestyle, social, production, psychological relations, organizations, and values. The status of a nomad had a high status in the trend of nomadic culture.	The basis is nomadic pastoralism and the material cultural heritage of the nomads of the West-Central regions of Kazakhstan. There was no agriculture or fishing.	Yurts, tents, residential wheeled carts. Basic stationary settlements.	Water was extracted from underground soils by means of captage, digging wells. In the 1st type with draw-wells, extended communities prevailed.
2	2 types of nomadic pastoralism - moderate. Southern, Eastern, and North-Eastern regions of Kazakhstan, nomads occupied mountainous and foothill areas, forests, steppe zones with developed, natural surface water bodies and summer precipitation. There were no wells. The rule of the first usage of water bodies (first come, first served). In Eastern and North-Eastern, Central Kazakhstan, the volume of the economy was significant. In the Akmola region, water supply was above 66%, the radius of migration was 20-50 km one way with 3-10 stops. The speed of migration was less in relation to that of the 1st type, the stops were long, and the rhythm of migration was slow. In the summer, they migrated no more than 13-16 km per day. In Aktobe, Kostanay, and Pavlodar regions, which were rich in vegetative environment and water bodies, cattle predominated (23-30%) and sheep (38-46%).	2nd type of nomads with natural water usage, non-pastoral farming practices, high costs of labor and material supplies, and stationary dwellings predominate; they live sedentary in winter.	In winter, they farmed stationary for 3-6 months, and permanent dwellings prevailed: stone, wooden, turf, and raw clay. Household items and utensils consisted of materials unsuitable for transportation. They were engaged in farming and fishing.	In water reservoirs, when watering 500-1000 sheep, 2-3 people release them in batches of 300-500 heads per hour. In type 2, there were significant herds of sheep and horses. There is an order for watering in natural water sources (Ishchenko, 1928): 10-15 camels were watered first, and they drank carefully, without muddying the water. Then 10-15 horses (before sheep, since they are very fastidious). The last in line were batches of 15-20 sheep and goats, who are not very picky, and who stir up the water with their hooves. In type 2, large groups of communities roamed, with natural water reservoirs, and the equality of the two forms of communities.

The Kazakh people, numbering over 3.3 million in 1897, are an example of nomadic civilization. Contemporary urbanization and increasing environmental change require the study of the historical experience of nomads, especially in the creation of mobile architecture and infrastructure, soil regeneration through pastoralism, and settlement systems.

The map of migration of Kazakh Zhuzes (nomadic tribal unions) developed by the author shows the influence of climate on nomadism, housing architecture, and water supply. There are two types of nomadic economy (see Table 2): intensive in the arid western and central regions (the Younger and part of the Middle Zhuz), and moderate in the mountainous, forest and steppe southern, eastern and north-eastern regions (the Older and part of the Middle Zhuz).

Zhuzes, as a single organism, contributed to the restoration of the ecosystem. The experience of nomads is studied by modern researchers such as A. Savory (Permaculture and holistic management), M. Akysh and M. Tuyakbaev (New Nomads and the Great Steppe), ecologist and geophysicist Zimov S.A., architect D. Baidaralin, etc.

Various forms of nomadic pastoralism depended on types of system of water usage and how it was extracted; the area, longitude, modes and rhythm of nomadic migrations; the predominance and differences in the proportion of livestock species, agriculture and social form of labor. From this, we observe social forms of organization, socio-economic features, and various forms of material cultural value (Masanov, 1989). For a deeper understanding of the nomadic pastoralist way of life, we will consider the migration features of the main Zhuzes, compiled by the author in the tables and maps of the migration movement of the three Kazakh Zhuzes: Senior, Middle and Junior.

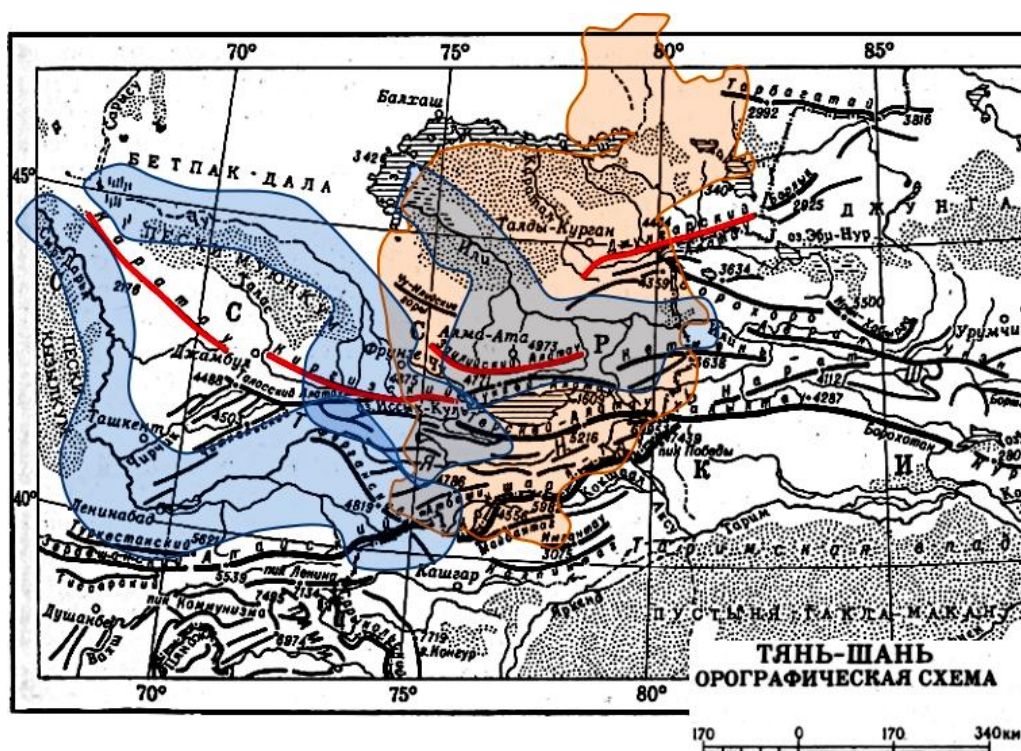


Figure 3. Map of migration of the Kazakh nomads of the Senior Zhuz (tribal union).

Orange color: main migrations area, blue color: main river valleys, red lines: main mountain ridges. Compiled by the author per Masanov N.E.

The map of the Senior Zhuz covers the mountainous and foothill areas of the Dzungarian and Zailiysky Alatau, the Kyrgyz Range and Karatau, the area between the Chu and Talas rivers, as well as the upper and middle reaches of the Syr-Darya River. The pastoral grazing areas could have passed along the path of ancient cities such as Koylyk, Dungene, Talgar, Almaty, Suyab, Taraz, Otyrar, Turkestan, Kulan, Merke, Sygnak, Balasagun, and Sauran. The Silk Way passed through some of these ancient cities.

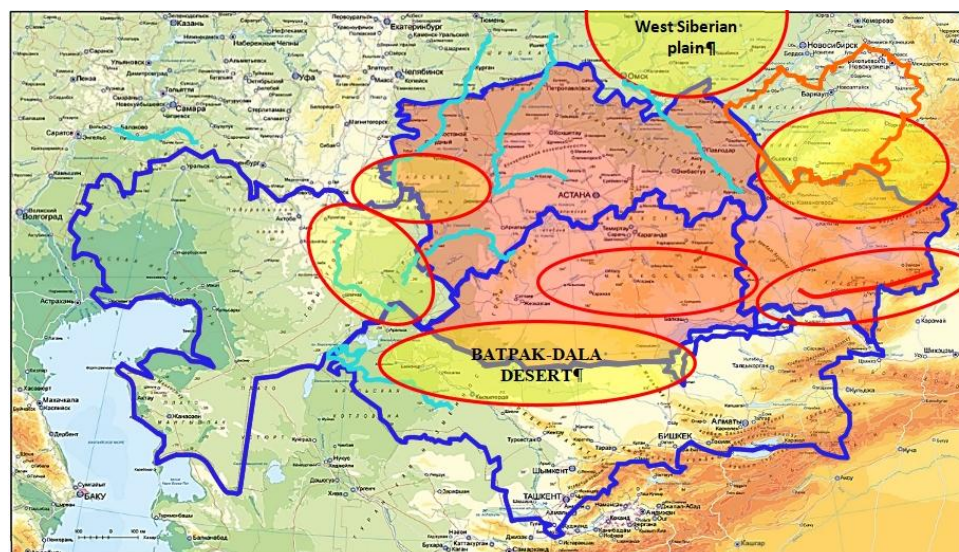


Figure 4. Map of the migration of the Middle Zhuz (tribal union). Compiled by the author per Masanov N.E. Includes the basins of the middle reaches of the Irtysh River, lower and middle reaches of Ishim, Turgai, and Tobol Rivers

Kazakhs of the Middle Zhuz grazed their livestock in the arid zones of deserts and semi-deserts, as well as the regions of the Prisyrdarya region. For meridional nomadism in the north of Kazakhstan, forest-steppe zones, foothill plains and lowland areas of mountains; and for vertical nomadism, they roamed in river valleys, areas near lakes. In meridional nomadism, the summer pastures were located in the steppe zone, where there was good precipitation. The low and high-altitude territories on alpine and subalpine meadows were better suited to the vertical nomadism of the Middle Zhuz (MKZ. T. I.-XII, etc.).

The time of the annexation of the Middle Zhuz to Russia is the middle of the XVIII century - the middle of the XIX century. Map 3 (developed by the author), shows the location of nomadic migrations of Kazakhs of the Middle Zhuz, where they may have passed nearby among ancient cities like Khakan, Egendibulak, Bakamyr, Yagnikent, Sygnak and other settlements.

During pastoral migrations, they covered the territories of Central, Middle and Eastern Kazakhstan, parts of the southern and middle reaches of the Syrdarya River, the areas from west to east of the Irgiz-Turgai-Tobol rivers to the Western Altai and Tarbagatai, from south to north of the middle reaches of the Syrdarya, puystini Betpak-Dala, parts of Balkhash, etc., see table 5 above. The territories of Western Kazakhstan belonged to the nomads of the Junior Zhuz. The borders from the Irgiz – Tobol – Turgai – Mugozhary river bands to the eastern end of the Caspian Sea and

the lower reaches of the Ural River in the latitudinal direction, etc. the exact description is described and shown in Table 5 and Map 4, (Masanov N. E. Nomadic civilization of the Kazakhs: the foundations of nomadic society. 1995).



Below are Table 6 and Map 3, compiled by the author, which indicate the territories of nomadic Kazakhs of the Middle Zhuz according to Masanov N.E. (Nomadic Civilization of the Kazakhs, 1995).

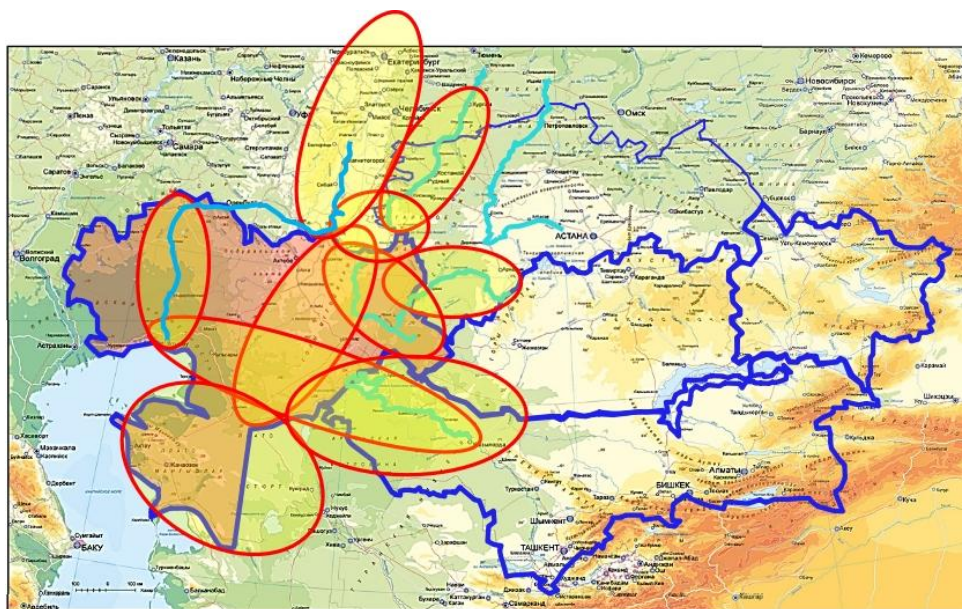


Figure 5. Map of the migration of the Junior Zhuz (tribal union). Compiled by the author per Masanov N.E.

Table 2. Territories of nomadism of three Kazakh Zhuzes (tribal unions), (compiled by the author per Masanov N.E., 1995)

Senior Zhuz
The Kazakhs of the Senior Zhuz traditionally occupied the territory of Jetysu (Semirechye), in particular the Ili River basin and its numerous tributaries, the foothills of the Dzungarian and Trans-Ili Alatau, the Kyrgyz ridge and Karatau, the interfluvium of the Chu and Talas, as well as the areas of the upper and middle reaches of the Syrdarya. Winter pastures were located in the plains of the region in the sands, foothill and river valleys, and low-altitude areas with rugged terrain. Summer pastures in vertical nomadism were located in the mountainous and high-altitude areas of the Dzungarian Alatau and the western spurs of the Tien Shan, and in meridional nomadism along river valleys and lakes (MOT. Vol. II—IV, etc.). The approximate number of Kazakhs of the Senior Zhuz at the turn of the XIX—XX centuries was about 700 thousand. (see: HaverdovSt. Petersburg, 1803.; Spassky, 1820.; Tynyshpaev, 1925. and others). According to the folk genealogy (shezhire), the Kazakhs of the Senior Zhuz were divided into the following tribes: Zhalaïr, Oshakty, Dulat, Kangly, Sary-Uysun, Shaprashty, Shanyshkly, Ergeli, Ysty, Alban, and Suan. The place of Katagans, Bestamgalas, and a number of other groups in this structure is not entirely clear.
Middle Zhuz
The Kazakhs of the Middle Zhuz traditionally occupied the territory of Central, Northern and Eastern Kazakhstan, as well as partly Southern Kazakhstan along the middle course of the Syr-Darya. In latitudinal terms, the nomadic sites covered almost the entire area from the Irgiz—Turgai—Tobol watershed to Western Altai and Tarbagatai, and from south to north — from the middle reaches of the Syr-Darya, the Betpak-Dala desert and the northern tip of Lake Balkhash to the southern reaches of the West Siberian Plain, occupying almost the entire territory of the Turgai Plateau, Central Kazakhstan Hillrocks, river basins of the middle reaches of the Irtysh, lower and middle reaches of the Ishim, Turgai and Tobol, and reaching the Kulunda and Ishim steppes.
Junior Zhuz
The Kazakhs of the Junior Zhuz traditionally occupied the territory of the entire Western Kazakhstan from the Irgiz-Tobol-Turgay-Mugodzhary watershed to the eastern end of the Caspian Sea and the lower reaches of the Urals in the latitudinal direction and from the lower and middle reaches of the Syrdarya to the Urals and Tobol in the meridional direction, capturing a vast territory including the Mangyshlak Peninsula, the northern part of the Ustyurt Plateau, the eastern part of the Caspian Plain and the General Syrt Upland, the Emba and western part of the Turgay Plateau, the southern end of the Ural Mountains, the Mugodzhary, the northern part of the Turan Lowland and the northern coast of the Aral Sea. The winter pastures of the Kazakhs of the Junior Zhuz were mainly located in the desert and semi-desert zones, sands and river valleys, the coastal strip of the Aral Sea, the Syr-Darya, the Urals and their numerous tributaries and branches of rivers.

In winter, livestock grazed in desert and semi-desert areas, sands and river valleys, the coasts of the Aral Sea, Syr-Darya and Ural rivers, and their tributaries. Pastures concentrated in the summer were maintained in the steppe zone, in the valleys of the Turgay, Irgiz, and Tobol rivers, on the Emba and Turgay plateaus (Blaramberg, 1848; Meyer, 1865).

Map 4 shows the areas of nomadism of the Kazakhs of the Junior Zhuz, covering Western Kazakhstan and meridionally extending towards the river junctions of the Urals, Tobol, etc. The following ancient cities existed along the path of nomadic Kazakhs of the Junior Zhuz: Saraichik, Yagnikent, Jent, Urgani, Sygynak, which are shown on maps 5 and 6 below.

The nomadic way of life determined the low population density (0.5-2 people/sq. km) and multi-level organization. Three large associations were formed: the Senior, Middle and Junior Zhuzes, which occupied vast territories of modern Kazakhstan and adjacent regions.

The Senior Zhuz was located mainly in southeastern and southern Kazakhstan, part of central and northern Kazakhstan; the Middle Zhuz in Dzungaria, Western Siberia, and Central Asia; the Junior Zhuz in Western Kazakhstan, and part of it - in Southeastern Europe and the Urals.

The Great Silk Way passed through the territory of Kazakhstan, and the following fortified cities stood along its routes: Khakan, Imakia, Egendybulak, Koylyk, Talgar, Dungene, Suyab, Taraz, Merke, Kula, Almaty, Otyrar, Turkestan, Sygnak, Yagnikent, Jend, Saraishyk. These walled and guarded cities were centers of trade and crafts for the settled population, contrasting with the nomadic world outside, where nomads led difficult lives subordinated to the needs of nomadic pastoralism.

The dwellings of the nomads of Kazakhstan were functional and comfortable solutions that corresponded to the lifestyle associated with constant movement. The development of settlement and agriculture has led to the construction of more permanent homes. However, mobile traditions such as yurts continued to be preserved in the culture and are still a symbol of Kazakh nomadic culture.

Portable yurts and stationary sedentary stone houses reflect not only everyday life, but also the social, economic and climatic features of the era. Each dwelling was associated with the lifestyle of its owners and their interaction with nature. Studying these dwellings helps to better understand the culture and philosophy of nomads, as well as the role they played in the history of Central Asia.

Nomad dwellings – portable, stationary, settled, etc.

Nomad migration distances - meridional, vertical, latitudinal, etc.

Composition of **domestic animals** - sheep, goats, horses, camels, cows.

Economic occupation: mostly nomadic, semi-nomadic.

Type 1 - arid zone is arid deserts, semi-desert regions without natural reservoirs, with artificial sources of water (wells), and the organization of production had its own characteristics. In material production, there were minimal stationary encampments; there was no agriculture and fishing.

Water was extracted from underground soils using captage (bringing underground water to the surface).

Type 2 - nomads occupied mountain and foothill areas, forests, steppe zones with developed, natural surface reservoirs and summer precipitation, and did not build wells. The principle of the right of first seizure of water reservoirs was in effect. In winter, they spent 3-6 months in a stationary manner and ran a household, immovable dwellings prevailed - stone, wooden, turf, and adobe. They were engaged in agriculture, farming and fishing.

The 2nd type of nomads with natural water use, the practice of non-pastoral farms, high costs for labor and material reserves, and stationary dwellings predominated; they live a sedentary life in winter.

Table 3. Types of housing of nomads of Kazakhstan. Compiled by the author per Masanov N.E., 1995)

I - PORTABLE DWELLINGS		
The main type of dwelling of nomads of Kazakhstan in ancient and medieval times was portable structures that were mobile and easy to assemble/disassemble. This provided nomads with freedom of movement from pasture to pasture.		
Yurt	Kos	Temporary field residential structures
Kiiz Ui (yurt) is a traditional portable dwelling of nomads, which is a symbol of the steppe world. It is a round structure with a frame made of wooden elements and a felt cover. The frame consists of vertical wall sections and a domed roof. It was easy to understand and collect, which allowed nomads to move from place to place. Kiiz uy, kigez uy, kiez oy, terme uy, termya uy - various regional names. The yurt frame consists of wooden lattices, which were installed in a circle. On them, they installed the dome poles and the dome ring. - The felt cover protected against rain, wind and cold. The felt was made of sheep's wool, which provided good thermal insulation. - The size and structure of the yurt varied depending on the social status of its owner. For poorer nomads, the yurts could be small, while the rich and noble had spacious and multi-room ones. The yurt, thanks to its mobility and protection from harsh weather conditions, was used not only by the nomads of Kazakhstan but also by other nomadic peoples, for example, by the Mongols.	In summer time, the nomads moved 13-16 km per day. if stayed only for the night, the yurts were not raised, instead they put together "kos" (incompletely assembled yurts) from dome poles.	Smaller and simpler temporary dwellings were used in case of short travels. These could be light tent structures, covered with felt, and their variants. These dwellings were most often used in field conditions.
II - STATIONARY DWELLING		
In addition to portable dwellings, there were also more stable, stationary dwellings, especially in those cases when nomads settled on a certain territory for pastoral rest, or if the region had sufficient resources (grass, water). They were built especially in those places where they remained for a long time, or when natural resources were used (for example, rivers or oases).		
Brick or stone houses	Urban buildings	
Brick or stone houses were common in some settled areas of Kazakhstan. With the development of agriculture and settlements, nomads began to build more durable, weather-resistant dwellings. These houses were more stable and provided better protection from extreme weather conditions.	In the medieval period, with the development of trade and cities, for example, in such ancient cities as Taraz or Syghanak, nomads began to build more permanent dwellings, which no longer required constant movement. Materials such as stone, brick, and wood were used here. In such permanent settlements, it was possible to find houses with several rooms, courtyards and specialized premises for storing goods.	
III - RESIDENTIAL DWELLINGS		
In the later period, when part of the nomadic tribes of Kazakhstan settled in one place, more settled forms of housing appeared. With the development of agriculture, economy, trade and permanent settlements, nomadic peoples began to build settled homes, cities and fortresses, some nomadic peoples began to transition to a more sedentary lifestyle. During this period, housing became more and more stationary.		
Features of construction and materials.		
Building materials: wood was used for the frames of yurts and later houses. Leather, felt, fabric - a covering that creates thermal insulation. Stone and clay were used for the construction of stationary houses. Construction		

technology: The lightness of the construction, as well as the ability to protect against cold, wind and rain were the most important principles of construction.		
Small residential houses	Stone and brick houses	Urban dwellings in the Middle Ages
Typical for many Kazakh settlements are Auls : villages, where small wooden or brick houses were built, with elements of national design and layout, corresponding to the traditions of the Kazakh people.	They were distributed in some settled areas of Kazakhstan. With the development of agriculture and settlements, nomads began to build more durable, weather-resistant dwellings. These houses were more stable and provided better protection from extreme weather conditions.	In the medieval period, with the development of trade and cities, for example, in such ancient cities as Taraz or Syghanak, nomads began to build more permanent dwellings, which no longer required constant movement. Materials such as stone, brick, and wood were used here. In such cities, it was possible to find houses with several rooms, courtyards and specialized premises for storing goods.

Nomadic architecture in winter: special fences (wind walls) made of wood, stone, reeds, brushwood, turf, and tents were built next to the wintering grounds, which were stretched vertically on poles, and yurts were erected. Newborn livestock and young animals were housed in wagons with people.

Movement in spring: As soon as the young animals got on their feet in a couple of days, it was necessary to cover 110-210 km in a short time, the routes of movement were common and spring pastures were quickly depleted by domestic animals. During the transition, nomads united in 2-4 Auls, and they covered 16-32 km per day, with short stops for 2-3 days, through 3-4 migrations.



Figure 6. Main Kazakh cities in the Middle Ages

Encampment along the way: Short stops - yurts were set up for 2-3 days, for short-term ones they put tents out of a yurt, they cover them with a koshma (cover material from felt), they make a number of shelters covered with felt out of a yurt, they spend the night there, they did not put up a yurt, because it took a lot of time. If it was hot during the day, they moved at night (Kuftin, 1926). Summer - (I. P. Shagin) - in the Nura region, 1000 yurts gathered for the summer. Other researchers encountered 30 auls, near Burul-Tokhoy, on the jailau over 400 auls, the auls were large with 500-1000 yurts - where the khans and sultans roamed the pastures. In summer, they roamed 13-16 km a day, stayed only for the night, did not set up a yurt, and made "kos" from uyks. Winter - Nomads who wintered in the sands, snowless places, grazing from well to well, around the main water source. When the Qystau (winter encampment) were located further in the sands,

their wintering tactics consisted of moving deep into the sands at the beginning until mid-winter, and by the end of the Qystau, after the snow cover had melted, back. They changed encampments every 15-25 days.

The Great Silk Way had a vast impact on the development of Kazakhstan, uniting East and West through trade, cultural exchange and the spread of technology. It stimulated the economic growth of the region, facilitated the exchange of experience and traditions between different peoples, as well as the development of cities, caravan-serais and infrastructure. The spread of religion and culture, as well as scientific exchange, reflected in architecture, agriculture, medicine, and science in Kazakhstan. Many cities on the routes of the Silk Way flourished and developed, some of them, such as Taraz, Almaty, Turkestan and Saraishyk were transformed into modern cities. UNESCO recognized the route of the Great Silk Way as a world heritage site. Maps 5 and 6 emphasize the existence and development of the ancient cities of Kazakhstan, which flourished during the nomadic civilization and were influenced by it due to the seasonal migrations of nomads.

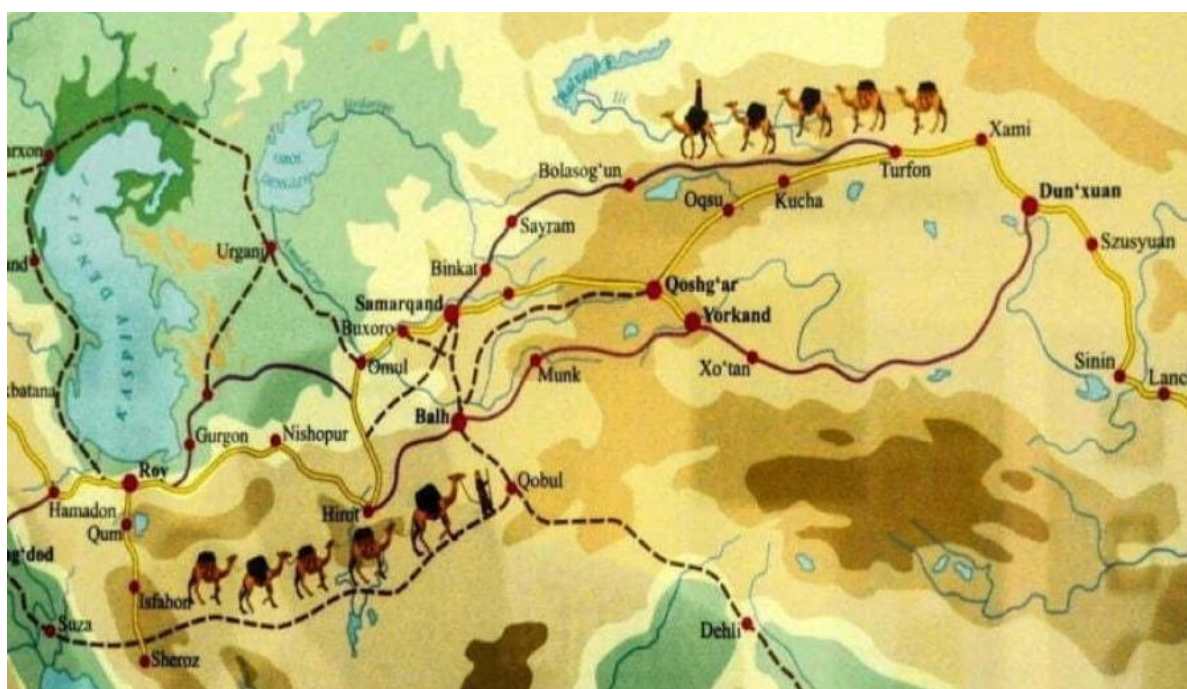


Figure 7. Silk way cities on the territory of Southern Kazakhstan

(<https://orda.kz/vlijanie-velikogo-shelkovogo-puti-na-razvitie-kazahstana-383495/>)

Findings/Discussion.

As shown above, the nomadic civilization of Kazakhstan have accumulated thousands years worth of know-how on survival in the arid and semi-arid regions of our nation. These technological, architectural, and biological inventions and accommodations deserve to be studied with practical purposes, as to how to possibly implement them in the near future to solve the imminent ecological problems that Kazakhstan faces.

The climatic conditions in the region are worsening: the multi-decade droughts and water shortages are inevitable in the following decades. Luckily, Kazakhstan has four thousand of years of lifestyle, designed specifically for such conditions, namely the nomadic pastoralism (nomadism).

Particularly, in Central Asia and Kazakhstan, the past nomadic knowledge of living in tight connection with nature can form the ideological, strategic, and technological paradigm for creating a sustainable economy in the arid climate. Namely, such emerging movements as Eco-Villages and Eco-Auls (mobile village for nomadic pastoralism).

These settlements, combining traditional know-how and the 21st century's technologies, could contribute greatly to food and resource security, providing for a natural way of soil regeneration and development of alternative energy sources (solar, wind, hydro, biochemical, geothermal, etc.) in the conditions of an extra-arid climate.

Development of Eco-Villages and Eco-Auls in the now vast empty areas of Kazakhstan is a great way to lessen the population and economic burden on the cities, create new occupations in education and healthcare services, and also create mobile nomadic technologies. The study of the nomadic civilization will allow the development of strategies for bringing back the nomadic way of life, transformed for modern conditions, in order to provide for a sustainable future.

The pastures of Kazakhstan have enormously suffered from agrarian experiments within the past 50-100 years, which led to regional-scale desertification. But it is still possible to revive and regenerate those lands through massive, large-scale nomadic pastoralism, as suggested by authors like Masanov, Savori, Akysh, Tuayakbaev, Baidaralin, and others. It restores topsoil, grass pasture diversity, water resources, climate, and provides oxygen as a byproduct.

The strategy developed by the author to maximally incorporate the heritage experience of the traditional nomadic lifestyle into modern concepts of development includes the following main principles and measures:

1. Conducting informational work on creating a positive image of Eco-Auls and their influence on the ecology and economy of arid zones of Kazakhstan.
2. Development of the necessary infrastructure for comfortable living in Eco-Auls and Eco-Villages.
3. Mass information campaigns about the advantages of nomadic animal pastoralism and Eco-Auls.
4. Creation of comfortable living conditions outside the city, including the Internet, remote education, mobile medicine, and ecological transport.
5. The development and introduction of affordable energy and water supply technologies.
6. Development of small and medium-sized businesses in the field of nomadic pastoralism in Eco-Auls, and perma-culture in Eco-Villages.
7. Development and implementation of infrastructure for eco-tourism.
8. Educational and research centers focused on the development of Eco-Auls and Eco-Villages.
9. Regular information campaigns in education, healthcare, economy, transport and science to strengthen positive trends, forming "eco-people" living in harmony with nature, like those of the past nomadic civilization of Kazakhstan, which will play an important role in the development of sustainable development not only in Kazakhstan, but also may become an example for many countries.

Conclusions

The author proves the relevance of studying nomadic architecture to solve the problems of climate change in Kazakhstan. The nomadic experience of Central Asia, living in symbiosis with nature, can become the basis for creating sustainable Eco-Villages and Eco-Auls. These settlements,

combining traditional knowledge and modern technologies, will ensure food and resource security, soil regeneration and the development of alternative energy in the conditions of an extra-arid climate. Eco-Auls are meant to decongest cities, provide new opportunities in education and health care, and also create mobile infrastructure. Research based on the study of the nomadic civilization of Kazakhs (N.E. Masanov and other authors) will allow the development of maps and tables for the revival of the nomadic way of life, adapted to modern conditions. The task of the generation is to ensure survival and prosperity in the conditions of droughts and water shortage, creating favorable conditions for the development of Eco-Villages and Eco-Auls in Kazakhstan. It is important to transfer knowledge and experience to the younger generation in order to ensure its sustainable future.

Regeneration of pastures of Kazakhstan, which suffered from agrarian experiments and desertification, is possible through large-scale nomadic farming, as suggested by authors like Masanov, Savori, Akyshev, and Tuayakbaev. It restores soil, grass, water resources, and climate, and provides oxygen. The strategy being developed by the author to incorporate the experience of traditional nomadism into modern development is described above.

The contribution of the authors.

Asylgul Maksutovna Baydaralina – author and developer of the tables and three maps:

"Map of migration of the Kazakh nomads of the Senior Zhuz (tribal union)";

"Map of the migration of the Middle Zhuz (tribal union)";

"Map of the migration of the Junior Zhuz (tribal union)".

Daniyar Zhanatovich Baydaralin – assisted with the English translation of the article, developed the map *"Approximate geographic span of the Eurasian Steppe"*, and contributed to the development of the article's subject matter.

Gulnara Dzhuparbekovna Maulenova – responsible for the development of the article's structure and editing.

Bolat Uraikhanovich Kusspangaliyev – responsible for formulating the main concept and editing.

References

1. N. E. MASANOV, Nomadic civilization of the Kazakhs: fundamentals of Life of Nomadic Society (Socinvest, Almaty / Horizont, Moscow, 1995).- book
2. History of climate. Hydrometeoizdat, L., 1979.- Electronic journal
3. A.-S. Monin and Yu. A. Shishkov, History of Climate (Hydrometeoizdat, Leningrad, 1979).- book
4. I. Pershitz and A. M. Khazanov, "Community of Nomadic Pastoralists," NAA, No. 2, 51–60 (1979).- book
5. V. Shnitnikov, Variability of the General Moisture Content of the Continents of the Northern Hemisphere (Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow–Leningrad, 1957), p. 337.- book
6. L. N. Ilev, "The Historical Rhythm of the Nomadic Culture of Central Asia: Experience of Historical-Geographical Synthesis," NAA, No. 4 (1966).- book
7. E. Le Roy Ladurie, Histoire du Climat Depuis l'An Mil (Hydrometeoizdat, Leningrad, 1971), p. 280.- book
7. M. Kuri, "Regional Development and Problems of Desertification of Arid and Semi-Arid

- Territories to the North and South of the Sahara," Nature and Resources, No. 1, 11–23 (1984).- book
8. F. Blaramberg, Military-Statistical Description of the Territory of Kyrgyz-Kaysakov Inner (Bukeev) and Zaural (Small) Hordes, Orenburg Region, in Military-Statistical Overview of the Russian Empire, Vol. XIV, Part I (St. Petersburg, 1848), pp. 30+119.- book
 9. S. Monin, Popular History of Earth (Nauka, Moscow, 1980), p. 225.- book
 10. E. V. Shneidstein, "Some Problems of Livestock Breeding in South-Eastern Europe in the Middle Ages," Vestnik Kalmytskogo NIYALI, Series: History, No. 9 (1974).- book
 11. V. A. Shnirelman, "Ethnocultural Contacts and the Transition to a Productive Economy: On African and Asian Materials," Soviet Ethnography, No. 4, 26–39 (1982a).- book
 12. V. A. Shnirelman, "The Late Primitive Community of Farmers, Cattle Breeders and Higher Hunters, Fishermen and Gatherers," in History of the Primitive Society: Epoch of the Primitive Family Community (Nauka, Moscow, 1986), pp. 236–426.- book
 13. K. V. Kuksin and Z. I. Gordeeva, "Traditional Dwellings of Nomadic Peoples and Their Adaptation to Landscape Conditions (on the Example of Mongolian and Kazakh Lands)," Social-Ecological Technologies, No. 1–2 (2015).- electronic article
 14. Kazakh Historical and Ethnographic Research (1995).- electronic book
 15. B. Irmukhanov, History of Kazakhstan: Experience in Theory and Methodology (2004).- electronic book
 16. T. A. Zhdanko, Materials for the Historical-Ethnographic Atlas of Central Asia and Kazakhstan (Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1961).- electronic book
 17. M. Akish and M. Tuyakbaeva, Novye Nomady i Velikaya Step (2016).- book
 18. Yu. V. Bromley and G. E. Markov, Ethnography (High School Publishers, Moscow, 1982), p. 284.- electronic book
 19. Savory and M. Gorshenina, Permaculture and Holistic Management (2022).- electronic journal

А.М.Байдаралина*, Г.Д.Мауленова, Б.У.Куспангалиев, Д.Ж.Байдаралин

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

Еуразиялық көшпелі өркениетті ребрендингтеу: климаттың өзгеруі және қазақстан территорияларының аридизациясы жағдайындағы тарихи көшпенділік тәжірибесінің мәні.

Андатпа. Бұл мақала Қазақстанның көшпелі малшыларының мыңдаған жылдық “ноу-хауларын” біздің аймақтың қазіргі экологиялық жағдайлары мен себептеріне енгізу ойларымен таныстырады. Көшпелі мал шаруашылығының өмір салты Еуразия материгінің (Еуразия даласының) құрғақ және жартылай құрғақ аймақтары жағдайында тарихи түрде дамыды. Бұл өмір салты созылмалы маусымдық құрғақшылық пен су тапшылығымен күресу үшін әзірленді және жетілдірілді. Ол көп малды көшіруге, жылжымалы сәулет пен инфрақұрылымға, көшпелі технологияларға сүйенген. Қазіргі заманда, қалалар тіпті толып жатқан кезде, экономика мен азық-түлік қауіпсіздігі негізінен көбінесе егін

шаруашылығына сүйеніп жатқанда, кең құрғақ аумақтар пайдаланылмай қалып, адамзат үшін де, Жер планетасы үшін де нөлдік құндылық тудырады. Бұл шөлді жерлер бір кездері көшпелі мал шаруашықтың арқасындағы тұрақтылығының қозғалтқышы болғандықтан, гүлденген экологиялық жүйелер болған. Бірақ көшпелілік бұл аймақтардан жойылып, халық қалаға және егін шаруашылығына негізделген экономикаға көшкеннен кейін, олар жансыз шөлдерге айналды. 21-ғасырдың технологияларын, сәулет өнерін, инженериясын, жаңа энергия көздерін және материалдарын пайдалана отырып, бір кездері өміршең болған сол бос жатқан жерлерге көшпелі мал шаруашылығын қайта енгізіп, оларды қайтадан тірі экологиялық аймақтарға айналдыруға болады.

Түйін сөздер: эконоуылдар, эконоуылдар, киіз үй, көшпенділер, көшпелі мал шаруашылығы, құрғақ аймақтар, көшпелі сәулет.

А.М.Байдаралина*, Г.Д.Мауленова, Б.У.Куспангалиев, Д.Ж.Байдаралин

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

**Ребрендинг евразийской кочевой цивилизации: значение опыта исторического
кочевничества в контексте изменения климата и аридизации территорий
казахстана.**

Аннотация. В этой статье представлены идеи внедрения тысячелетних “ноу-хау” кочевых скотоводов Казахстана в современных экологических условиях и проблемах нашего региона. Кочевой образ жизни скотоводов исторически развивался в условиях засушливых и полузасушливых регионов Евразийского континента (Евразийская степь). Этот образ жизни был разработан и усовершенствован для борьбы с хроническими сезонными засухами и нехваткой воды. Он основывался на перемещении больших стад скота, мобильной архитектуре и инфраструктуре, а также кочевых технологиях. В современную эпоху, когда города перенаселены, а экономика и продовольственная безопасность в основном зависят от сельского хозяйства, обширные засушливые территории остаются неиспользованными, не принося никакой пользы ни человечеству, ни планете Земля. Эти пустоши когда-то были процветающей экологической системой, где кочевое скотоводство служило двигателем их устойчивости. Но как только кочевой образ жизни был искоренен из этих районов, а население переселено в городские районы с основанной на сельском хозяйстве экономикой, они деградировали в безжизненные пустыни. Используя технологии, архитектуру, инженерии, источники энергии и материалы XXI века, можно возродить некогда жизненно-важный кочевой образ жизни скотоводов на этих пустошах, вновь превратив их в кипящие жизнью экологические регионы.

Ключевые слова: экодережни, эконоулы, юрта, кочевники, кочевое скотоводство, засушливые регионы, кочевая архитектура.

References:

1. N. E. MASANOV, Nomadic civilization of the Kazakhs: fundamentals of Life of Nomadic Society (Socinvest, Almaty / Horizont, Moscow, 1995).- book

2. History of climate. Hydrometeoizdat, L., 1979.- Electronic journal
3. A.-S. Monin and Yu. A. Shishkov, History of Climate (Hydrometeoizdat, Leningrad, 1979).- book
4. I. Pershitz and A. M. Khazanov, "Community of Nomadic Pastoralists," NAA, No. 2, 51–60 (1979).- book
5. V. Shnitnikov, Variability of the General Moisture Content of the Continents of the Northern Hemisphere (Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow–Leningrad, 1957), p. 337.- book
6. L. N. Ilev, "The Historical Rhythm of the Nomadic Culture of Central Asia: Experience of Historical-Geographical Synthesis," NAA, No. 4 (1966).- book
7. E. Le Roy Ladurie, Histoire du Climat Depuis l'An Mil (Hydrometeoizdat, Leningrad, 1971), p. 280.- book
8. M. Kuri, "Regional Development and Problems of Desertification of Arid and Semi-Arid Territories to the North and South of the Sahara," Nature and Resources, No. 1, 11–23 (1984).- book
9. F. Blaramberg, Military-Statistical Description of the Territory of Kyrgyz-Kaysakov Inner (Bukeev) and Zaural (Small) Hordes, Orenburg Region, in Military-Statistical Overview of the Russian Empire, Vol. XIV, Part I (St. Petersburg, 1848), pp. 30+119.- book
10. A. S. Monin, Popular History of Earth (Nauka, Moscow, 1980), p. 225.- book
11. E. V. Shneidstein, "Some Problems of Livestock Breeding in South-Eastern Europe in the Middle Ages," Vestnik Kalmytskogo NIYALI, Series: History, No. 9 (1974).- book
12. V. A. Shnirelman, "Ethnocultural Contacts and the Transition to a Productive Economy: On African and Asian Materials," Soviet Ethnography, No. 4, 26–39 (1982a).- book
13. V. A. Shnirelman, "The Late Primitive Community of Farmers, Cattle Breeders and Higher Hunters, Fishermen and Gatherers," in History of the Primitive Society: Epoch of the Primitive Family Community (Nauka, Moscow, 1986), pp. 236–426.- book
14. K. V. Kuksin and Z. I. Gordeeva, "Traditional Dwellings of Nomadic Peoples and Their Adaptation to Landscape Conditions (on the Example of Mongolian and Kazakh Lands)," Social-Ecological Technologies, No. 1–2 (2015).- electronic article
15. Kazakh Historical and Ethnographic Research (1995).- electronic book
16. B. Irmukhanov, History of Kazakhstan: Experience in Theory and Methodology (2004).- electronic book
17. T. A. Zhdanko, Materials for the Historical-Ethnographic Atlas of Central Asia and Kazakhstan (Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1961).- electronic book
18. M. Akish and M. Tuyakbaeva, Novye Nomady i Velikaya Step (2016).- book
19. Yu. V. Bromley and G. E. Markov, Ethnography (High School Publishers, Moscow, 1982), p. 284.- electronic book
20. Savory and M. Gorshenina, Permaculture and Holistic Management (2022).- electronic journal

Information about the authors

Baidaralina A.M. - Master's Architecture student, Kazakh National Technical University named after K. Satpayev, Almaty, Kazakhstan.

Maulenova G.D. - Associate Professor, Institute of Architecture, Satbayev University

Kuspangaliyev B.U. Professor, Director of Institute of Architecture and Construction, Satbayev University

Baidaralin D.Zh. - MA Architecture, Historical Museum at Satbayev University

Байдаралина А.М. магистрант, Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, 050013, Алматы, Қазақстан.

Мауленова Г. Д. – «Сәулет» кафедрасының профессоры, Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, 050013, Алматы, Қазақстан.

Куспанғалиев Б.У. Сәтбаев атындағы университеттің Сәулет және құрылыс институтының директоры, сәулет ғылымының докторы, профессор.

Байдаралин Д.Ж. Сәтбаев атындағы университеттің тарихи мұражайы, сәулет өнері магистрі.

Байдаралина А.М. МА Архитектура, Магистрант кафедры «Архитектура» Казахского национального технического университета имени К. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан.

Мауленова Г.Д. Кандидат архитектуры, ассоциированный профессор, Институт архитектуры, кафедры «Архитектура», Казахского национального технического университета имени К. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан.

Куспанғалиев Б.У. Профессор, Директор Института архитектуры и строительства, Satbayev University.

Байдаралин Д.Ж. Исторический музей Университета имени Сатпаева, магистр архитектуры.



Copyright: © 2025 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/>).



ХҒТАР 73.01.11
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-155-170>

Жүк ағындарындағы тұрақты даму факторларын зерттеу

К.С. Юсупова* ¹, С.Е. Бекжанова¹, Б.Б. Амралинова¹,
Г.С. Муханова¹, А.В. Мухаметжанова²

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

E mail: sss.kuralay.0520@gmail.com

Аңдатпа. Бұл мақалада Қазақстандағы жүк тасымалы саласының экологиялық тұрақтылық және қоғамдық денсаулық сақтау мәселелерімен өзара байланысы қарастырылады. Сонымен қатар климаттың жаһандық өзгеруі және қоршаған ортаның нашарлауы жағдайында көлік секторын тұрақты дамыту қажеттілігі зерттеледі. Зерттеудің өзектілігі Қазақстандағы жүк ағынының тұрақты дамуының негізгі проблемалары мен мүмкіндіктерін анықтау, қоршаған ортаны жақсарту және экономикалық тиімділікті арттыру бойынша практикалық шешімдерді ұсыну. Негізгі назар парниктік газдар шығарындыларын азайту мен қоршаған ортаға келетін зиянды төмендетуге аударылған. Көлік шығарындыларының ауа, су және топырақ сапасына тигізетін кері әсері мен олардың экожүйелерге залал келтіретіні баяндалады. Сонымен қатар, денсаулыққа келетін қауіптер – тыныс алу аурулары, жүрек-қан тамырлары жүйесінің бұзылыстары сияқты мәселелер егжей-тегжейлі сипатталады. Зерттеуде әртүрлі аналитикалық әдістер қолданылады, соның ішінде статистикалық деректерді талдау, халықаралық тәжірибелерді салыстырмалы зерттеу және ағымдағы жағдайды бағалау және тиімді шешімдерді ұсыну үшін экологиялық және экономикалық модельдеу әдістері. Зерттеу нәтижесінде көлік саласындағы экологиялық қауіптерге жауап беретін тиімді стратегияларды қалыптастыру қажеттігі ғылыми негізде баяндалады және Қазақстанда бұл мәселелерді саясат пен тәжірибе арқылы шешудің мүмкін жолдары қарастырылады.

Түйін сөздер: Тұрақты даму, жасыл технология, жүк тасымалы, жүк ағындары, көлік қызметтері.

Түсті 02.06.2025. Жөнделді 09.09.2025. Мақұлданды 11.09.2025. Онлайн қолжетімді 30.09.2025

* хат-хабар автор үшін

Кіріспе

Транзиттік рөл атқаратын Қазақстан үшін қазіргі замандағы ең маңызды мәселелердің бірі жүк ағындарының тұрақты дамуына әсер ететін факторларды зерттеу болып табылады. Елдің көлік инфрақұрылымы ішкі және халықаралық жүк тасымалдарын тиімді ұйымдастыру мен басқаруға арналған нақты стратегиялар мен механизмдерді талап етеді. Тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізу үшін жүк ағындарын басқару барысында экологиялық, экономикалық және әлеуметтік аспектілердің тепе-теңдігін сақтау маңызды. Тұрақты даму мақсаттары (ТДМ) бұл 2030 жылға дейін өмірдің барлық салаларында тұрақты дамуға қол жеткізуге және жаһандық деңгейдегі маңызды мәселелерді шешуге бағытталған бүкіләлемдік міндеттер жиынтығы болып табылады [1].

Біріккен Ұлттар Ұйымының Даму бағдарламасы (БҰҰДБ) — бұл әлемнің 170-тен астам елінде жұмыс істейтін, тұрақты дамуға қол жеткізуді мақсат еткен БҰҰ-ның жаһандық даму желісі. Бағдарлама кедейлікпен күресуге, теңсіздікті азайтуға, сыбайлас жемқорлықтың алдын алуға және мемлекеттік басқаруда ашықтықты нығайтуға бағытталған. Қазақстанда БҰҰДБ-мен ынтымақтастық орнаған сәттен бастап жалпы құны 200 миллион АҚШ долларынан асатын 200-ден астам жобалар жүзеге асырылды. Бұл бағдарлама Қазақстанға Тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізу үшін келесі бағыттарда көмек көрсетеді. Атап айтқанда, әлеуметтік теңсіздік пен сенімсіздікті еңсеру, халықтың үкіметке деген сенімін нығайту, қоршаған ортаның тұрақтылығын қамтамасыз ету және жоғары нәтижелі экономикалық өсуді ынталандыру сияқты маңызды салаларды қамтиды [1].



1-сурет. 17 Тұрақты даму мақсаттары [1].

Тұрақты даму тұжырымдамасы экологиялық, экономикалық, әлеуметтік, мәдени даму мен адам қажеттіліктері арасындағы ақылға қонымды теңгерімге қол жеткізу идеясына негізделген. Тұрақты дамудың экономикалық құрамдас бөлігі шектеулі ресурстарды тиімді пайдалануға, энергияны үнемдеуге, экологиялық және материалды үнемдейтін технологияларды пайдалануға бағытталған. Әлеуметтік-мәдени құрамдас мәдени және

әлеуметтік жүйелердің тұрақтылығын сақтауды және пайданы әділ бөлуді білдіреді. Экологиялық компонент қазіргі және болашақ ұрпақтар үшін табиғи жүйелердің тұтастығын сақтауға бағытталған [2].

Тұрақты даму жағдайында тасымалдау экономикалық тұрғыдан тиімді бола отырып, қоршаған ортаға және қоғамға жағымсыз әсерлерді азайтуды ескеруі керек. Жүк тасымалы кезінде парниктік газдар шығарындыларын азайту, ауа мен судың ластануын, және жаңартылмайтын ресурстарды пайдалануды барынша азайту сияқты тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізуде әртүрлі модельдерді қолдана аламыз.

- Жасыл логистика модельдері (Green Logistics) - бұл модель CO₂ шығарындыларын азайтуға, отын шығынын азайтуға және қалдықтарды азайтуға бағытталған. Ол үшін электр немесе гибриді көлік құралдарын пайдалану, жол жүру уақытын және отын шығынын азайту үшін маршруттарды оңтайландыру, теміржол және су көлігі сияқты экологиялық таза көлік түрлерін барынша пайдалану үшін интермодальды тасымалдауды дамыту ұсынылады.

- Айналым экономика (Circular Economy) - материалдар мен қаптамаларды қайта пайдалануды және қайта өңдеу үшін бос ыдысты қайтару, тұрақты және қайта өңделетін материалдарды пайдалану ұсынылады.

- Интермодальдық тасымалдау - әр қадамда шығарындыларды азайту үшін әртүрлі көлік түрлерін (темір, теңіз және автомобиль) пайдалану.

- Блокчейн және IoT технологиялары (Интернет заттары) - жеткізу тізбегін нақты уақытта бақылауға және тұрақтылық тұрғысынан тасымалдауды оңтайландыруға көмектеседі.

- Энергияны үнемдейтін көліктер - көміртегі ізін азайту үшін электр көліктерін, сутегі жүк көліктерін және гибриді кемелерді пайдалану. Электр энергиясын үнемдеуде күн батареялары сияқты баламалы энергия көздерін пайдалану ұсынылады.

- Жүк сыйымдылығын және жүк тасымалын оңтайландыру - көлік құралдарын толық тиеу және «бос жүрістерді» азайту мақсатында жеткізу кестелерін оңтайландыру арқылы тиімділікті арттыру.

Әдебиеттерге шолу

Бүгінгі таңда тұрақты логистика саласында көптеген зерттеулер жасалған. Ахи П., Сирси С өз еңбектерінде экологиялық, экономикалық және әлеуметтік аспектілерді қамтитын тұрақты дамуға әсер ететін негізгі факторларды атап көрсетеді, сонымен қатар тұрақты практикаларды басқаруда интеграциялаудың қажеттілігін айтады [3].

Бектас Т, Лапорт Г. «Ластану маршрутизациясы мәселесі» атты зерттеу жұмысында көлікпен жүк тасымалдағанда экологияға зиян келтірмейтін жолдарды қалай тиімді қолдануға болатынын, сонымен қатар әртүрлі жағдайлардағы шығын мен тиімділік арасындағы тепе-теңдік кеңінен түсіндіріледі [4].

Ал қалдықтарды жинау мен көліктің жүретін жолдарын тиімді жоспарлау мәселесін М.А. Ханнан мен т.б. авторлар арнайы PSO әдісін пайдаланып, қалдықтарды жинайтын көліктердің қайда, қалай және қай кезде баруы керектігін анықтайтын жаңа тәсілді ұсынды. Мұндағы басты жаңалық - қалдық жинайтын жәшіктер қаншалықты толғанын бақылау және ең тиімді уақытты таңдап, жинау болды (TWL - ең жоғары қалдық деңгейі). Бұл әдіс арқылы қалдықты дер кезінде жинауға, жолды қысқартуға және шығынды азайтуға болады [5].

Автоматтандыру, заттар интернеті (IoT) және үлкен деректер сияқты заманауи технологиялардың жүк тасымалдарын тұрақтандыруға қалай ықпал ететінін И. А. Круглова мен А.Д. Кривонос өз зерттеулерінде қарастыра отырып, осы технологияларды енгізудің практикалық мысалдарын ұсынды [6].

Надия Резник және т.б. зерттеушілер циркулярлық экономика концепциясының логистикалық процестермен байланысын анықтай отырып, циркулярлық модельге көшу кезіндегі жүк тасымалдарының тұрақтылығын қалай арттыруға болатынын талқылайды. Аталған зерттеушілер қалдықтарды басқару жүйесін жетілдіру үшін көлік және логистиканы тиімді пайдаланудың жолдарын көрсеткен. Бұл мәселе тек экологиялық тұрғыда ғана емес, экономикалық тиімділік тұрғысынан да маңызды. Себебі дұрыс ұйымдастырылған тасымал мен қайта өңдеу шығынды азайтып, қоршаған ортаға зиянды төмендетуге мүмкіндік береді. Мұндағы *тасымалдау логистикасының мақсаты* қалдықтарды шыққан жерінен бастап, сұрыптау немесе қайта өңдеу орнына дейінгі қозғалысын ұйымдастыру. Яғни бұл процесс табысты көбейтуге, шығынды азайтуға және қоршаған ортаға келетін зиянды төмендетуге көмектеседі. Ал *циркулярлы экономика* – бұл қалдықтарды тастамай, қайта пайдалану, жөндеу, өңдеу арқылы табиғи ресурстарды үнемдеп, экологияны сақтауды көздейді. Сонымен қатар зерттеушілер *өндіріс логистикасын* экологиямен байланыстыра отырып, «ресурстар – өндіріс – тұтыну – қалдықтарды басқару» жүйесінде тұрақты даму принциптері негізінде басқару керек деп тұжырымдайды [7].

Жоғары жылдамдықты теміржолдың жасыл технологиялық инновацияларға әсерін Линь С., Чэнь З., Хэ З. «Rapid Transportation and Green Technology Innovation in Cities-From the View of the Industrial Collaborative Agglomeration» атты еңбегінде зерттей отырып, өндіріс және қызмет көрсету салаларының бірлескен кластерін қалыптастыруды қарастырған. Жоғары жылдамдықты теміржол көлік шығындарын азайтып, инновация мен жасыл технологияларды дамытуға қолдау көрсету ұсынылады [8].

Тұрақты даму жөніндегі ғылыми зерттеулер жүк тасымалдарының экологиялық, экономикалық және әлеуметтік аспектілерін қамтитын кешенді тәсілдің маңыздылығын көрсетеді. Инновациялар мен технологиялар тұрақты логистикалық жүйелерді құруда басты рөл атқарады. Келешек зерттеулердің практикалық тұрақты практикаларды енгізу мен олардың нарыққа әсерін бағалауға бағытталуы маңызды.

Әдіснама

Төменде Қазақстандағы жүк тасымалдаудың экологиялық мәселелері мен жүк ағындарының ағымдағы талдауы жасалды. «Қазақстан республикасы стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігі ұлттық статистика» бюросының мәлімдемесі бойынша 2024 жылғы қаңтар-шілдеде республика көлігімен 589,9 млн тонна жүк тасымалданды, бұл 2023 жылғы қаңтар-шілдедегі деңгейден 5,8%-ға артық.

Осы кезеңде жүк айналымы 289,4 млрд т-км құрады, яғни 2023 жылғы қаңтармен салыстырғанда 0,3%-ға азайғанын 1- кестеден байқауға болады [9]. Соңғы жылдардағы жүк тасымалының көлемі мен құрылымына шолу: Индустрия және инфрақұрылымдық даму министрлігінің мәліметі бойынша, Қазақстанда жүк тасымалдау көлемі өсіп келеді, бұл қоршаған ортаға қысымды күшейтеді. Негізгі көлік артериялары және олардың қоршаған ортаға әсері: Негізгі жүк ағындары CO₂ шығарындыларына айтарлықтай әсер ететін Трансқазақстандық және Батыс Еуропа көлік дәліздері арқылы өтеді.

Қолданылатын технологияларды және олардың қоршаған ортаға әсерін бағалау: Қазақстанның көлік жүйесіндегі ескі дизельдік қозғалтқыштар сияқты технологиялар шығарындылардың жоғары деңгейіне ие, олар жаңғыртуды және балама отын түрлеріне көшуді талап етеді.

1-кесте. Өңірлер бойынша 2024 жылдың қаңтар-шілде айларындағы жүк айналымы

№	Өңірлер	Жүк айналымының пайыздық үлесі
1	Жетісу	(22,8%)
2	Солтүстік Қазақстан	(12,8%)
3	Шығыс Қазақстан	(12%)
4	Ұлытау	(11,3%)
5	Абай	(10,2%)
6	Ақтөбе	(7,9%)
7	Батыс Қазақстан	(7,4%)
8	Қарағанды	(6,6%)
9	Ақмола	(5,4%)
10	Түркістан	(5,2%)
11	Алматы	(4,9%)
12	Қостанай	(3,5%)
13	Маңғыстау	(0,2%)

Ескерту: Кестедегі мәліметтер stat.gov.kz сайтынан алынған [9]

Өңірлер бойынша 2024 жылдың қаңтар-шілде айларында жүк айналымының төмендеуі байқалды



2 – сурет. Өңірлер бойынша 2024 жылдың қаңтар-шілде айларындағы жүк айналымы

Ескерту: stat.gov.kz сайтынан алынған деректер негізінде құрастырылған [9]

Қоршаған ортаға және халықтың денсаулығына әсері

Жүк тасымалымен байланысты ауаның ластануы мыналарға кері әсер етеді:

Қоғамдық денсаулық сақтау: Көлік құралдарының шығарындылары тыныс алу органдарының ауруларын, жүрек-қан тамырлары проблемаларын және басқа да созылмалы ауруларды тудыруы мүмкін.

Қоршаған орта: автокөлік шығарындылары ауа сапасының нашарлауына, топырақ пен суда зиянды заттардың жиналуына ықпал етеді, бұл экожүйелерді, әсіресе көлік жолдарының маңында бұзады.

Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының (ДДҰ) зерттеулеріне сәйкес, көліктен ауаның ластануы қала тұрғындарының денсаулығының нашарлауының негізгі себептерінің бірі болып табылады.

Отынды және ресурсты көп қажет ететін технологияларды ұтымсыз пайдалану мәселесі

Отынды ұтымсыз пайдалану және жүк тасымалдауда үнемді технологиялардың жоқтығы отын шығынын арттырады, бұл парниктік газдар шығарындыларының өсуіне әкеледі.

Ресурсты көп қажет ететін технологиялар проблемасы және электромобильдер немесе сутегі отыны сияқты балама отынға нашар бейімделу де тұрақты жүк тасымалына көшуді бәсеңдетеді.

Қазақстанда экологиялық жағдайды жақсарту бойынша бағдарламалардың болуына қарамастан, энергия үнемдейтін технологияларды енгізу төмен деңгейде қалып отыр, бұл көлік секторының ластануының айтарлықтай төмендеуіне жол бермейді.

Қазақстандағы көлік саласындағы негізгі ластаушы көздер:

Дизельдік отынмен жұмыс істейтін жүк көліктері мен басқа көліктерден CO₂ және басқа да зиянды заттардың (мысалы, азот оксидтері, көміртегі қосылыстары және қатты бөлшектер) шығарындылары.

Ескірген технологияларды және тиімділігі төмен қозғалтқыштарды пайдалану отын шығынының жоғарылауына және зиянды заттардың шығарылуына әкеледі.

ҚР Қоршаған ортаны қорғау министрлігінің мәліметінше, көлік Алматы және Астана сияқты ірі қалалардағы ауаны ластайтын негізгі заттардың бірі болып табылады.

Логистиканың тұрақты дамуының халықаралық тәжірибесі негізінде әртүрлі елдердегі шығарындыларды азайту бағытында жүзеге асырылған жобалар: Еуропалық Одақ елдерінде көлік қызметінен CO₂ шығарындыларын азайтуға бағытталған «Жасыл жүк Еуропа» бағдарламасы бар. Бағдарламаға қатысатын компаниялар жасыл көліктерді пайдалану және маршруттарды оңтайландыру арқылы жеткізу тізбегіндегі көміртегі ізін өлшеуге және азайтуға міндетті болып табылады. Германия мен Нидерландыда электр және гибридті жүк көліктерін енгізу кейбір бағыттардағы шығарындыларды 25%-ға дейін төмендетті [10]. Швецияда Scania және Northvolt жобасы алыс қашықтыққа тасымалдау үшін батареямен жұмыс істейтін жүк көліктерін жасау жолға қойылған. Бұл технологиялар қазірдің өзінде дәстүрлі дизельді жүк көліктерімен салыстырғанда көміртегі шығарындыларын 50%-дан астамға азайтты.

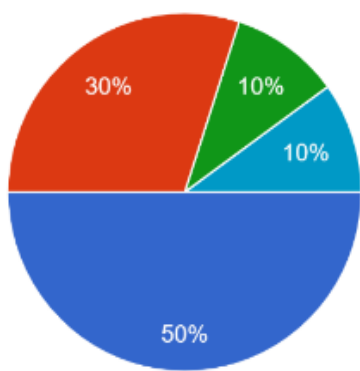
АҚШ-та қоршаған ортаны қорғау агенттігі (EPA) іске қосқан SmartWay бағдарламасы көлік компанияларына отын тиімділігін арттыру арқылы шығарындыларды азайтуға көмектеседі. Жақсартылған аэродинамикалық технологиялар және балама отынға көшу бағдарламасы нәтижесінде көмірқышқыл газы шығарындыларды 72 миллион метрикалық тонна азайтты [11].

Нәтижелер мен талқылаулар

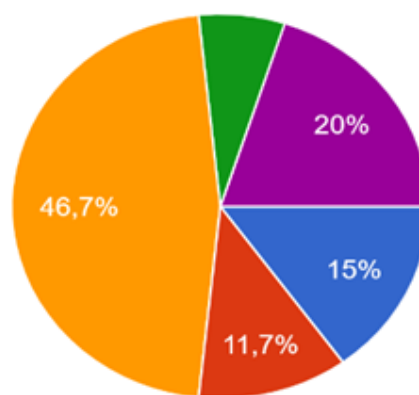
Осыған орай Қазақстанда жүк тасымалдауда жасыл технологияларды енгізу перспективаларын бағалау бойынша мамандар арасында сауалнамалық талдау жүргізілді.

Ең перспективалы жасыл технологиялар, оларды енгізудегі кедергілер және ықтимал қолдау шаралары туралы сараптама жүргізілді. Сараптама қорытындысы бойынша көлік логистикасы, темір жол көлігі, автомобильдік жүктерді тасымалдау, экология және тұрақты даму, көлік экономикасы, жасыл технологияларды әзірлеу және енгізу, мемлекеттік реттеу және саясат және тағы да басқа бағыттар бойынша мамандар қатыстырылды.

Сараптама нәтижесінде көлік логистикасының мамандары 50%, темір жол көлігі мамандарының үлесі 30%, экология және тұрақты даму бойынша 10%; жасыл технологияларды әзірлеу және енгізу саласындағы мамандар 10% құрады.



3-сурет. Сараптамаға қатысқан эксперттердің пайыздық көрсеткіштері



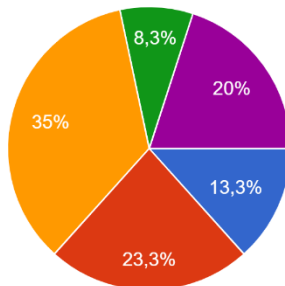
4 – сурет. Қазақстандағы жүк тасымалдау үшін ең перспективалы жасыл технологиялар

Қазақстандағы жүк тасымалын экологияландыру мақсатында ең перспективті жасыл технологияларды анықтаудың нәтижесі келесідей болды. Электр тарту жүйелері (электровоздар мен электрофуралар) – 46,7% құрап ең тиімді деп танылды. Одан кейінгі орындарда гибридные технологии (дизель-электрлік локомотивтер мен жүк көліктері) – 20%, биодизель – 15%, сығылған табиғи газ (LNG) – 11,7%, ал сутекті отынмен жүретін көліктер – 6,6% үлесті құрады.

Бұл технологиялардың әрқайсысының Қазақстан жағдайында жүзеге асу мүмкіндігі мен тиімділік деңгейі әртүрлі. Осы шолудың аясында сарапшылардың 1-ден 5-ке дейінгі бағалау шкаласына сүйене отырып, жүк тасымалында жасыл технологияларды енгізудің әлеуеті мен іске асу деңгейі талданды.

Бағалау нәтижесінде келесі көрсеткіштер анықталды: электр тарту жүйелері (электровоздар мен электрофуралар) – 35%, сығылған табиғи газ (LNG) – 23,3%, гибридные решения (дизель-электрлік локомотивтер мен жүк көліктері) – 20%, биодизель – 13%, ал сутекті көліктер – 8,3% үлеске ие болды (5-сурет).

Қазақстандағы жүк тасымалы саласына жасыл технологияларды енгізуге кедергі келтіретін факторларды сарапшылардың пікірі негізінде талдай отырып, бірнеше негізгі кедергілер анықталды. *Инфрақұрылымның жеткіліксіздігі – 45%*. Сауалнамаға қатысқан сарапшылардың басым бөлігі (45%) инфрақұрылымның дамымауын негізгі кедергі ретінде атап өтті.



5- сурет. Көлік тасымалындағы жасыл технологияларды енгізудің тиімділігі мен іске асу мүмкіндігі

Электр жүк көліктеріне арналған қуаттау бекеттерінің, газ құю станцияларының және техникалық қызмет көрсету желілерінің болмауы бұл технологиялардың кеңінен қолданылуын шектейді. Бұдан бөлек, логистикалық тізбектер мен мультимодальды көлік тораптарының жеткілікті дамымауы технологиялық жаңашылдықтардың таралуын баяулатып отыр.

Жоғары шығындар – 28,3%

Жасыл технологиялардың қымбаттығы – екінші маңызды тосқауыл ретінде көрсетілді. Сарапшылардың 28,3%-ы жаңа буын электр және сутекті көліктердің бастапқы құны мен қызмет көрсету шығындарының жоғары болуын басты кедергі деп санайды. Бұл әсіресе шағын және орта логистикалық компаниялар үшін айтарлықтай қаржылық салмақ туғызады.

Мемлекеттік қолдаудың жеткіліксіздігі – 16,7%

Сауалнамаға сәйкес, сарапшылардың 16,7%-ы мемлекеттік қолдаудың әлсіздігін маңызды шектеуші фактор деп есептейді. Субсидиялар, салықтық жеңілдіктер және квоталар сияқты ынталандыру тетіктерінің болмауы кәсіпорындардың жасыл технологияларды енгізуге деген қызығушылығын төмендетеді. Сонымен қатар, нақты нормативтік-құқықтық база мен салалық даму стратегиясының жоқтығы да бұл бағыттағы ілгерілеуді тежейді.

Технологиялық қиындықтар – 10%

Сарапшылардың 10%-ы технологиялық қиындықтарды кедергі ретінде атап өткен. Бұл көрсеткіш салыстырмалы түрде төмен болғанымен, Қазақстан жағдайында жасыл көлік құралдарын өндіру, бейімдеу және техникалық қызмет көрсету үшін қажетті өндірістік және техникалық база жеткілікті дамымаған. Сондай-ақ, отандық инжиниринг пен инновациялық әлеуеттің әлсіздігі де бұл саладағы дамуға кедергі келтіруде. Қазақстанда жасыл технологияларды жедел енгізуге ықпал ететін негізгі мемлекеттік қолдау шаралары бойынша анықталған сауалнама нәтижелері:

Инфрақұрылымға инвестиция салу – 36,7% Респонденттердің пікірінше, инфрақұрылымды дамыту – экологиялық көлік технологияларын енгізудегі басты тетік. Электр және газбен жүретін көлік түрлерін тиімді пайдалану үшін қуаттау станциялары,

жанармай құю бекеттері мен техникалық қызмет көрсету нүктелерінің жеткілікті болуы аса маңызды. Мемлекет тарапынан осы салаға басымдық берілуі кәсіпкерлер мен салалық мамандар тарапынан оң бағаланып отыр.

Салықтық жеңілдіктер – 33,3% Салықтық ынталандыру екінші маңызды қолдау құралы ретінде танылды. Жасыл көлік құралдарын өндіруші немесе сатып алушы компанияларға ұсынылатын салықтық жеңілдіктер бизнестің қаржылық жүктемесін жеңілдетіп, экологиялық бастамаларға деген қызығушылықты арттырады. Әсіресе бұл механизм шағын және орта бизнес үшін маңызды, себебі ол инвестициялық қауіптерді азайтады.

Жасыл көлікке берілетін субсидиялар – 23,3%. Субсидиялар қысқа мерзімді ынталандыру құралы ретінде қарастырылады. Олар, әсіресе, жаңа жобаларды іске қосу кезінде тиімді саналады. Алайда, бұл шараның тиімділігі инфрақұрылым мен салықтық жеңілдіктермен салыстырғанда төмен – бұл оның шектеулі және көбіне бір реттік сипатына байланысты. Жүйелі даму үшін мұндай көмек жеткіліксіз болуы мүмкін.

Мемлекеттік экологиялық квоталар – 6,7%. Экологиялық квота жүйесі ең төмен нәтиже көрсетіп, небәрі 6,7% дауысқа ие болды. Бұл жүйе кәсіпорындарға белгілі бір экологиялық талаптарды міндеттейді, алайда бизнес тарапынан қарсы пікірлер туындауы мүмкін, себебі ол қосымша әкімшілік шығындар мен шектеулерге алып келеді. Сонымен қатар, Қазақстанда бұл жүйені жүзеге асыру үшін нақты құқықтық база мен тиімді бақылау тетіктері әлі толық қалыптаса қоймаған.

Қазақстанда жүк тасымалы саласына жасыл технологияларды жаппай енгізудің нақты мерзімі бірқатар экономикалық, технологиялық және институционалдық факторларға байланысты. Бұл үдерістің жүзеге асу мүмкіндігін сарапшылар бағалап, сауалнама нәтижесінде келесі пайыздық үлестер анықталды:

2030 жылға дейін–10% Сарапшылардың аз бөлігі ғана жасыл технологиялар осы онжылдық аяқталғанға дейін кең көлемде қолданысқа енеді деп санайды. Мұндай күмән технологиялардың қымбаттығы, инфрақұрылымның жеткіліксіздігі және реттеуші саясаттың әлсіздігімен байланысты. Бұл жағдайда тек жекелеген пилоттық жобалармен шектелу ықтималдығы жоғары.

2030–2040 жылдар аралығы–46,7%. Сауалнамаға қатысқандардың басым көпшілігі жасыл технологияларды енгізудің ең ықтимал әрі тиімді кезеңі ретінде осы онжылдықты атаған. Бұл уақытта қажетті инфрақұрылым дамып, заңнамалық негіздер жетілдіріліп, қаржылық ынталандыру механизмдері іске қосылуы мүмкін. Сонымен қатар, отандық және шетелдік технологиялар осы кезеңде бейімделе бастайды деп күтіледі.

2040 жылдан кейін–25% Сарапшылардың бір бөлігі жасыл технологиялар тек ұзақ мерзімді перспективада ғана кеңінен енгізіледі деп есептейді. Бұл көзқарас технологиялық дамудың баяу жүруімен және көлік құралдарының жаңару уақытының ұзақтығымен түсіндіріледі.

Жасыл технологиялар мүлдем жаппай енгізілмейді–18,3% Сауалнамаға қатысқан сарапшылардың бір бөлігі жаппай енгізуге мүлде сенбейді. Олар құрылымдық, қаржылық және институционалдық тосқауылдар көлік секторының толық экологияландырылуына кедергі келтіруі мүмкін деп санайды. Осылайша, сарапшылардың пікірі әртүрлі болғанымен, көпшілігі жасыл технологияларды енгізудің ең оңтайлы мерзімі 2030–2040 жылдар аралығы деп есептейді. Қазақстанда жүк тасымалы саласында жасыл технологияларды кең көлемде енгізу жағдайында көмірқышқыл газы (CO₂)

шығарындыларын азайту мүмкіндігіне қатысты сараптамалық бағалау келесідей нәтижелер көрсетті:

16,7%-дан төмен төмендеу әлеуеті. Бұл пікірді ұстанған сарапшылардың пайымынша, технологиялық жаңартулардың экологиялық әсері шектеулі болуы мүмкін. Мұндай көзқарас, ең алдымен, инфрақұрылымның жеткіліксіздігі мен көлік паркінің жаңару қарқынының баяулығымен байланыстырылады.

20%–31,7% аралығындағы азаю әлеуеті. Сауалнамаға қатысқан сарапшылардың көпшілігі осы аралықты қолдап отыр. Олардың пікірінше, егер жасыл технологиялар–мысалы, электр тарту жүйелері, гибриді көлік құралдары және баламалы отын түрлері–белсенді енгізілсе, айтарлықтай экологиялық нәтижеге қол жеткізуге болады.

31,7%-дан жоғары төмендеу әлеуеті. Кейбір сарапшылардың бағалауынша, егер жасыл технологиялар жүйелі және кешенді түрде жүзеге асырылса, жүк тасымалындағы CO₂ шығарындыларын 30%-дан да жоғары деңгейде қысқарту мүмкін болады. Бұл болжам жаңартылатын энергия көздерімен жұмыс істейтін электр көліктері мен сутекті отын сияқты ұзақ мерзімге бағытталған шешімдерге негізделген.

Осылайша, сарапшылардың бағалауы әртүрлі болғанымен, олардың басым бөлігі жасыл технологияларды енгізу арқылы Қазақстанда жүк тасымалынан шығатын зиянды газдарды айтарлықтай азайтуға болатынын мойындайды.

Жүк көлігі саласындағы тұрақты дамуды бағалау үш негізгі өлшемге негізделеді: экономикалық, экологиялық және әлеуметтік. Бұл өлшемдердің әрқайсысы жүк тасымалдау жүйелерінің орнықтылығын кешенді түрде талдауға мүмкіндік беріп, олардың қоғамға жағымды әсерін қамтамасыз етуге және теріс салдарын барынша азайтуға бағытталған. Төменде осы өлшемдердің басты қырлары егжей-тегжейлі сипатталған.

Экономикалық өлшемдер

Шығындарды тиімді басқару: Тұрақты жүк тасымалы жоғары қызмет көрсету сапасын сақтай отырып, шығындарды оңтайландыруға бағытталады, бұл өз кезегінде оның экономикалық тұрақтылығын арттырады [12].

Жұмыспен қамтуды арттыру: Логистика саласы жаңа жұмыс орындарын ашу және жергілікті кәсіпкерлікті дамыту арқылы өңірлік экономиканың өсуіне серпін береді [13].

Инфрақұрылымдық салымдар: Орнықты көлік жүйелерін дамыту көбінесе алдын ала инфрақұрылымға инвестиция салуды қажет етеді, алайда бұл ұзақ мерзімді экономикалық табысқа жол ашады [14].

Экологиялық өлшемдер

Шығарындыларды төмендету: Тұрақты тасымал жүйелері парниктік газдарды азайту мақсатында экологиялық қауіпсіз технологиялар мен әдістерді қолданады [15].

Ресурстарды үнемді пайдалану: Жанармай, материалдар сынды ресурстарды тиімді тұтыну жүк тасымалының табиғи ортаға әсерін төмендетуге ықпал етеді [16].

Қалдықтарды басқару: Қалдықтарды дұрыс және тиімді өңдеу қоршаған ортаға теріс ықпалды азайту үшін аса маңызды [13].

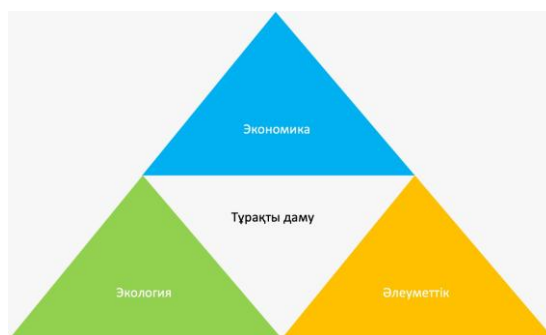
Әлеуметтік өлшемдер

Қоғамға әсері: Жүк көлігі жергілікті тұрғындардың өмір сапасына әсер етеді, әсіресе шу, ластану және көлік кептелісі сияқты факторлар арқылы [14].

Әлеуметтік теңдік және қолжетімділік: Барша азаматтар үшін көлік қызметтерінің әділ әрі тең қолжетімділігі әлеуметтік тұрақтылықты қамтамасыз етеді [17]. Қоғам денсаулығы: Жүк көлігінен бөлінетін зиянды заттарды азайту халық денсаулығының

жақсаруына ықпал етеді [15].

Осы үш бағытты біріктіретін бағалау әдісі жүк тасымалы саласының тұрақтылығын кешенді түрде анықтауға мүмкіндік береді. Алайда бұл өлшемдер арасында тепе-теңдік табу маңызды. Мысалы, тек экономикалық тиімділікке басымдық беру экологиялық көрсеткіштердің нашарлауына әкеп соғуы мүмкін. Сондықтан тұрақты нәтижелерге қол жеткізу үшін барлық мүдделі тараптар арасында жүйелі және тиімді диалог қажет (6-сурет).



6-сурет. Тұрақты даму тұжырымдамасының үш өлшемді критерийлері

Қорытынды

Қазақстанда жүк тасымалы саласын экологияландыру бағытындағы жасыл технологияларды енгізу – көлік жүйесінің тұрақты дамуына қол жеткізудің маңызды құралы болып табылады. Жүргізілген сараптамалық сауалнама нәтижелері бұл бағытта нақты мүмкіндіктердің бар екенін көрсетті. Сарапшылардың көпшілігі электр тарту жүйелері, гибриді шешімдер және баламалы отын түрлері сияқты технологияларды ең перспективалы деп таныды. Сонымен қатар, оларды енгізу әлеуеті мен іске асу мүмкіндіктері де жоғары бағаланды. Алайда жасыл технологияларды кеңінен енгізуге кедергі келтіретін бірқатар факторлар бар. Ең алдымен, бұл – инфрақұрылымның жеткіліксіздігі, жоғары инвестициялық шығындар және мемлекеттік қолдау шараларының әлсіздігі. Технологиялық және институционалдық қиындықтар да бұл үдерістің баяу жүруіне себеп болып отыр. Дегенмен, инфрақұрылымды дамытуға инвестиция тарту, салықтық жеңілдіктер мен субсидиялар сияқты қолдау тетіктерін іске асыру жасыл бастамалардың алға басуына мүмкіндік береді. Сарапшылардың көпшілігі 2030–2040 жылдар аралығын жасыл технологияларды кең көлемде енгізуге ең қолайлы кезең деп есептейді. Бұл кезеңде нормативтік-құқықтық негіздер, техникалық база және инвестициялық тетіктердің дамуы күтіледі. Сонымен қатар, көмірқышқыл газы (CO₂) шығарындыларын 20–30%-ға дейін азайту мүмкіндігі де бар екенін көрсетеді, бұл – маңызды экологиялық нәтиже.

Жүк тасымалы саласының тұрақты дамуын қамтамасыз ету үшін экономикалық, экологиялық және әлеуметтік өлшемдердің өзара теңгерімі қажет. Қазақстанда жасыл көлік технологияларын енгізу тек қоршаған ортаны қорғау ғана емес, сонымен бірге көлік саласының тиімділігі мен қоғамның өмір сапасын арттыруға бағытталған кешенді қадам болуы тиіс. Осы тұрғыда барлық мүдделі тараптардың үйлесімді әрекеті мен стратегиялық көзқарасы шешуші рөл атқарады.

Алғыс айту

Мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің ғылыми жобаларын гранттық қаржыландыру және коммерцияландыру шеңберінде қаржыландырылды. (ИРН BR21882292 «Тұрақты құрылыс саласын интеграцияланған дамыту: инновациялық технологиялар, өндірісті оңтайландыру, ресурстарды тиімді пайдалану және технологиялық парк құру»).

Авторлардың қосқан үлесі

К.С. Юсупова – Материалдарды жинау, сараптамалық сауалнама жүргізу, алынған деректерді талдау

С.Е. Бекжанова – Зерттеу нәтижелерін талдау

Б.Б. Амралинова – Тұжырымдама құру

Г.С. Муханова – Мәліметтер жинап, тұжырымдама жасау

А.В. Мухаметжанова – Жариялануға берілген мақаланың соңғы нұсқасын бекіту

Әдебиеттер тізімі

1. Электрондық үкімет порталы. – URL: <https://egov.kz/cms/kk/zur> (қолжетімділік күні: 27.09.2025). – Электронды ресурс, есеп PDF.
2. Осинцев Н. А., Казармщикова Е. В. Современные проблемы транспортного комплекса России // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2017. – Т.1. – С.13. – Мақала.
3. Ахии П., Сирси К. Показатели устойчивого развития в управлении цепями поставок // Журнал чистого производства. – 2013. – Т.52. – С.329. – Мақала.
4. Бекташ Т., Лапорт Ж. Методы исследования транспортных задач // Транспортные исследования. Серия В: Методология. – 2011. – Т.45. – С.1232. – Мақала.
5. Ханнан М. А., Ахтар М., Бегум Р. А., Басри Х., Хуссейн А. Управление отходами // Управление отходами. – 2017. – DOI: 10.1016/j.wasman.2017.10.019. – Мақала.
6. Круглова И. А., Кривонос А. Д. Инновации в экономике // Экономика, предпринимательство и право. – 2023. – Т.8. – С.2909. – Мақала.
7. Надия Р. и др. Большие данные в финансах: трансформация финансового ландшафта / под ред. Б. Аларини. – Шамп: Springer, 2025. – Серия: Studies in Big Data, т.164. – С.229. – Кітап.
8. Линь С., Чэнь Ч., Хэ Ч. Применение научных методов в инженерии // Прикладные науки. – 2021. – Т.11. – С.8110. – Мақала.
9. Бюро национальной статистики АСПиР РК. Статистика по отходам в Республике Казахстан. – URL: <https://stat.gov.kz/upload/iblock/5be/...> (қолжетімділік күні: 27.09.2025). – Электронды ресурс, есеп PDF.
10. Европейская комиссия. Мобильность и транспорт. – URL: <https://transport.ec.europa.eu/> (қолжетімділік күні: 27.09.2025). – Электронды ресурс.
11. Агентство по охране окружающей среды США. SmartWay. – URL: <https://www.epa.gov/smartway> (қолжетімділік күні: 27.09.2025). Электронды ресурс
12. Росси Р., Гастальди М., Вескови Р. Устойчивое планирование // Труды WIT по экологии и окружающей среде. – 2009. – Т.120. – С.411. – Мақала.
13. Айади Х., Бенайсса М., Хамани Н., Кермад Л. Логистика и устойчивое развитие //

Логистика. – 2024. – Т.8. – С.1. – Мақала.

14. Фарчи С., Тузи Б., Фарчи Ф., Мусриж А. Инновационные исследования и приложения в науке и технике // Материалы 2-й Международной конференции по инновационным исследованиям и их применению в науке и технике (IRASET). – 2022. – С.1. – Мақала.
15. Экономические, экологические и социальные компоненты устойчивого развития. – Эмерелд Пабблишинг, 2023. – С.229. – Мақала.

**К.С. Юсупова^{*1}, С.Е.Бекжанова¹, Б.Б. Амралинова¹, Г.С. Муханова¹
А.В. Мухаметжанова²**

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

²*Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан*

Исследование факторов устойчивого развития при перевозке грузов

Аннотация. В статье рассматривается взаимосвязь между отраслью грузовых перевозок в Казахстане и вопросами экологической устойчивости и общественного здравоохранения. В нем также рассматривается необходимость устойчивого развития транспортного сектора в условиях глобального изменения климата и ухудшения состояния окружающей среды. Актуальность исследования заключается в выявлении основных проблем и возможностей устойчивого развития грузопотоков в Казахстане, предложении практических решений по улучшению экологической обстановки и повышению экономической эффективности. Основное внимание уделяется сокращению выбросов парниковых газов и минимизации ущерба окружающей среде. Описано негативное влияние выбросов транспортных средств на качество воздуха, воды и почвы, а также их ущерб экосистемам. Кроме того, подробно описаны риски для здоровья, такие как респираторные заболевания и сердечно-сосудистые расстройства. В исследовании использованы различные аналитические методы, включая статистический анализ данных, сравнительное изучение международного опыта, методы эколого-экономического моделирования для оценки текущей ситуации и предложения эффективных решений. В исследовании представлено научно обоснованное обоснование необходимости разработки эффективных стратегий по устранению экологических угроз в транспортном секторе и рассмотрены возможные пути решения этих проблем посредством политики и практики в Казахстане.

Ключевые слова: Устойчивое развитие, зеленые технологии, грузовые перевозки, грузопотоки, транспортные услуги

**K.S Yussupova ^{*1}, S.E. Bekzhanova¹, B.B.Amralinova¹, G.S. Mukhanova¹
A.V. Mukhametzhanova²**

¹*Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan*

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

Study of factors of sustainable development in cargo flows

Abstract. The article examines the relationship between the freight transportation industry in Kazakhstan and environmental sustainability and public health issues. It also discusses the need for sustainable development of the transport sector in the context of global climate change and environmental degradation. The relevance of the study lies in identifying the main problems and opportunities for sustainable development of freight flows in Kazakhstan, offering practical solutions to improve the environmental situation and increase economic efficiency. The main focus is on reducing greenhouse gas emissions and minimizing environmental damage.

The negative impact of vehicle emissions on the quality of air, water and soil, as well as their damage to ecosystems, is described. In addition, health risks such as respiratory diseases and cardiovascular disorders are described in detail.

The study uses various analytical methods, including statistical data analysis, comparative study of international experience, methods of environmental and economic modeling to assess the current situation and propose effective solutions. The study presents an evidence-based rationale for the need to develop effective strategies to address environmental threats in the transport sector and examines possible ways to address these issues through policy and practice in Kazakhstan.

Keywords: Sustainable development, green technologies, cargo transportation, cargo flows, transport services

References

1. Electronic Government Portal. Available at: <https://egov.kz/cms/kk/zur> (accessed 27 Sept. 2025). [Electronic resource, report PDF].
2. Osintsev, N. A., & Kazarmshchikova, E. V. (2017). Modern Problems of the Transport Complex of Russia, 1, 13. [Article].
3. Ahi, P., & Searcy, C. (2013). A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 52, 329. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.018> [Article].
4. Bektas, T., & Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45, 1232. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004> [Article].
5. Hannan, M. A., Akhtar, M., Begum, R. A., Basri, H., & Hussain, A. (2017). Green logistics and waste management. *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.019> [Article].
6. Kruglova, I. A., & Krivonos, A. D. (2023). Innovations in economy. *Economics, Entrepreneurship and Law*, 8, 2909. [Article].
7. Nadiia, R., et al. (2025). Big Data in Finance: Transforming the Financial Landscape. In B. Alareeni (Ed.), *Studies in Big Data* (Vol. 164, p. 229). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75095-3_9 [Book].
8. Lin, S., Chen, Z., & He, Z. (2021). Application of scientific methods in engineering. *Applied Sciences*, 11, 8110. <https://doi.org/10.3390/app11178110> [Article].
9. Bureau of National Statistics ASPIR RK. Waste statistics in the Republic of Kazakhstan. Available at: <https://stat.gov.kz/upload/iblock/5be/...> (accessed 27 Sept. 2025). [Electronic resource, report PDF].
10. European Commission. Mobility and Transport. Available at:

- <https://transport.ec.europa.eu/> (accessed 27 Sept. 2025). [Electronic resource].
11. U.S. Environmental Protection Agency. SmartWay. Available at: <https://www.epa.gov/smartway> (accessed 27 Sept. 2025). [Electronic resource].
 12. Rossi, R., Gastaldi, M., & Vescovi, R. (2009). Sustainable development planning. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 120, 411. <https://doi.org/10.2495/SDP090391> [Article].
 13. Ayadi, H., Benaissa, M., Hamani, N., & Kermad, L. (2024). Logistics and sustainable development. Logistics, 8, 1. <https://doi.org/10.3390/logistics8010012> [Article].
 14. Farchi, C., Touzi, B., Farchi, F., & Mousrij, A. (2022). Innovative research and applications in science and technology. Proc. 2nd Int. Conf. Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), 1. <https://doi.org/10.1109/IRASET52964.2022.9738425> [Article].
 15. Economic, Environmental and Social: Three Components to Measure the Perception of Sustainable Development. (2023). Emerald Publishing, p.229. <https://doi.org/10.1108/978-1-80382-577-920231017> [Article].

Авторлар туралы мәлімет

Юсупова К.С. – хат-хабар авторы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің докторанты, Сәтбаев көшесі 22, 050000, Алматы, Қазақстан

Бекжанова С.Е. – техника ғылымдарының докторы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің профессоры, Сәтбаев көшесі 22, 050000, Алматы, Қазақстан

Амралинова Б.Б. – жоба жетекшісі, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің PhD, қауымдастырылған профессоры, Сәтбаев көшесі 22, 050000, Алматы, Қазақстан

Мұханова Г.С. – техника ғылымдарының кандидаты, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің қауымдастырылған профессоры, Сәтбаев көшесі 22, 050000 Алматы, Қазақстан.

Мухаметжанова А.В. – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «көлікті пайдалану және жүк қозғалысы мен тасымалдауды ұйымдастыру» кафедрасының профессоры м.а., 10000 Қазақстан, Астана, Сәтбаев көшесі, 2

Юсупова К.С.– Докторант Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, улица Сатпаева 22, Бекжанова С.Е. – доктор технических наук, профессор Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, улица Сатпаева 22, 050000, Алматы, Казахстан

Амралинова Б.Б. – руководитель проекта, PhD, ассоциированный профессор Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, улица Сатпаева 22, 050000, Алматы, Казахстан, 050000 Алматы, Казахстан

Муханова Г.С. – кандидат технических наук, доцент, Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, улица Сатпаева 22, 050000, Алматы, Казахстан

Мухаметжанова А.В. – исполняющая обязанности профессора кафедры «ОПДЭТ» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилёва, 010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2.

Yussupova K. – corresponding author, doctoral student, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Satpayev street 22, 050000, Almaty, Kazakhstan

Bekzhanova S.E. – doctor of technical sciences, professor, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Satpayev street 22, 050000, Almaty, Kazakhstan

Amralinova B.B. – PhD, associate professor, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Satpayev street 22, 050000, Almaty, Kazakhstan

Mukhanova G.S. – candidate of technical sciences, associate professor, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Satpayev street 22, 050000, Almaty, Kazakhstan

Mukhametzhanova A.V. – Acting Professor of the Department "Transport Operation, Traffic and Transportation Organization", L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010000, Republic of Kazakhstan, Astana city, 2 Satpayev Street.



Copyright: © 2025 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/>).



XҒТАР 55.01.83

Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-171-183>

Сорғы жабдықтарының техникалық жағдайын термиялық бақылау әдісімен диагностикалау

Л.Б. Сағатова* , С.А. Бортеебаев , Д.Д. Басканбаева 
Ш.Д. Ахметова 

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті», Алматы, Қазақстан

E mail: l.sagatova@satbayev.university

Аңдатпа. Мақалада «ҚазАтомӨнеркәсіп» ҰАК" АҚ пайдалану жағдайында тепловизорды пайдалана отырып, сорғы агрегаттарының техникалық күйін диагностикалау әдістері қарастырылады. Осы зерттеу шеңберінде техникалық күйді бағалау рәсіміне жататын SULZER ортадан тепкіш сорғы агрегаттарын термовизиялық тексеру арқылы алынған диагностикалық ақпараттың үлгісі пайдаланылды. Қолданыстағы жабдықта жылу бейнелеу диагностикасын жүргізу әдістемесі сипатталған. Алынған деректерді талдау үшін ықтимал ақауларды көрсететін жергілікті қызып кету аймақтарын анықтауға мүмкіндік беретін термограммаларды өңдеу әдістері қолданылды. Сорғы агрегаттарының мойынтіректерін термиялық талдау нәтижелері келтірілген. Нәтижелер ақаулықтарды ерте анықтау және жабдықтың қалдық ресурсын бағалау үшін термиялық бейнелеу әдісін қолданудың жоғары тиімділігін көрсетеді. Бұл, өз кезегінде, сорғы қондырғыларының сенімділігін арттыруға, төтенше жағдайлар қаупін азайтуға және техникалық қызмет көрсету регламенттерін оңтайландыруға ықпал етеді. Ұсынылған әдістеме жабдықтың ұқсас түрі бар кәсіпорындарда кеңінен енгізу үшін ұсынылуы мүмкін, сонымен қатар болжамды қызмет көрсету тұжырымдамасы аясында техникалық жағдайды бақылау жүйесінде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: ортадан тепкіш сорғы, жылу түсіргіш, термографиялық зерттеу, температура, инфрақызыл сәулелену

Түсті 16.06.2025. Жөнделді 23.08.2025. Мақұлданды 26.08.2025. Онлайн қолжетімді 30.09.2025

* хат-хабар автор үшін

Кіріспе

Жабдықтың тиімділігі мен сенімділігі өндіріс процестерінде шешуші рөл атқаратын қазіргі әлемде машиналар мен механизмдердің күйін диагностикалау маңызды міндетке айналады. Диагностиканың ең прогрессивті әдістерінің бірі-жабдықты бөлшектемей-ақ проблемаларды анықтауға мүмкіндік беретін жылу камераларын пайдалану. Ортадан тепкіш сорғылар сұйықтықтарды айдау үшін әртүрлі салаларда кеңінен қолданылады. Олардың жұмысының сенімділігі негізгі қондырғылардың — мойынтіректердің, тығыздағыштардың, қозғалтқыштың және жұмыс дөңгелегінің күйіне тікелей байланысты. Жабдықтың күйін бақылаудың тиімді әдістерінің бірі-жылу диагностикасы.

Жылу бейнелеу технологияларын қолдана отырып, сорғы жабдықтарының техникалық жағдайын диагностикалау мәселелері отандық және шетелдік ғылыми әдебиеттерде белсенді зерттелуде. Атап айтқанда, В.А. Герасимов пен С. И. Мельниковтың еңбектерінде инфрақызыл термография негізінде сорғы агрегаттарының мойынтіректері мен электр жетектерінің жылу күйін бағалау әдістері қарастырылған. [1] Ғалымдар термобейнелеуді бақылау майлау жүйесіндегі бұзылулардан, мойынтіректердің тозуынан және айналмалы бөліктердің теңгерімсіздігінен туындаған температура режимінің ауытқуларын тиімді анықтауға мүмкіндік беретінін көрсетті. Термограммаларды талдау әдістерінің дамуына шетелдік зерттеушілер де айтарлықтай үлес қосты. Сонымен, J. M. Yasout және C. B. Moloney (MIT, АҚШ) зерттеулерінде сәтсіздіктерді диагностикалау мен болжаудың дәлдігін жақсартуға мүмкіндік беретін термиялық бейнелеуді автоматты түрде жіктеуге арналған машиналық оқыту алгоритмдері қарастырылған [3]. Н. В. Ahmed (Малайзия технологиялық университеті) жұмысы сорғы жүйелерінің техникалық жағдайын жан-жақты бағалауды қамтамасыз ететін тербеліс өнімділігімен жылу ауытқуларын корреляциялау әдісін ұсынады [4].

Отандық тәжірибеде Ю.В. Савченконьң жетекшілігімен жылуэнергетикалық кәсіпорындарда сорғыларға қызмет көрсету кезінде жылу бейнелеу бақылауының тиімділігі негізделген зерттеулерді бөліп көрсетуге болады. Автор жылу үлгісі механикалық немесе діріл ауытқулары түрінде әлі көрінбеген ақаулардың дамуын уақтылы анықтауға мүмкіндік беретінін атап көрсетеді [2]. Осылайша, осы жұмыс шеңберінде жүргізілген зерттеу жинақталған ғылыми тәжірибеге сүйенеді және нақты өндірістік жағдайларда сорғы агрегаттарын диагностикалау тәжірибесіне бағытталған тәсілдерді дамытуға үлес қосады.

BALTECH TR-0102N инфрақызыл жылу түсіргіші қарапайым және жұмыс істеуге ыңғайлы және операторда арнайы дағдылардың болуын қажет етпейді. Жылу бейнелеу құрылғылары олардың техникалық жағдайын бағалау мақсатында электр жүйелері мен жабдықтарын диагностикалау үшін қолданылады. Бұл санатқа электр қозғалтқыштары, тарату құрылғылары және қосалқы станциялар кіреді. Тепловизорларды қолданудың артықшылығы-объектімен тікелей байланыссыз жылдам зерттеу жүргізу. Жылу бейнелеу құрылғыларының көрсеткіштеріне көптеген факторлар үлкен әсер етеді. Жүргізілген өлшеуді талдау кезінде оларды ескермеу жабдықтың нақты жылу күйінің бұрмалануына және ақаулықтарды жою бойынша дұрыс емес шешімдер қабылдауға әкеледі. Сіз жылу түсіргіштің жұмыс принципін келесідей қысқаша сипаттай аласыз: жылу түсіргіштің объективі келіп түскен инфрақызыл сәулеленуді жинайды және оны сәулелену қабылдағышына бағыттайды. Осы сәулеленуге сүйене отырып, радиациялық қабылдағыштың шығысында өлшенетін сигнал пайда болады. Содан кейін пайда болған

сигнал құрылғының дисплейінде жылу кескінін көрсету үшін жылу кескінінің ішінде орналасқан электрондық схемалармен өңделеді.

Термографиялық бақылауды жүзеге асырудың ұйымға қатысты өзіндік ерекшеліктері бар. Әрбір термовизиялық бақылауды орындамас бұрын дайындық жұмыстарының белгілі бір көлемі жүргізілуі керек. Ең алғашқы қадам-бұл туралы жалпы түсінік алу үшін зерттеу объектісінің құжаттамасын зерттеу. Бұған объектінің паспорттық деректері, пайдалану уақыты және т. б. Осыдан кейін ағымдағы жүктемелерді және бақыланатын объектінің түйіндерін ескере отырып, объектіні зерттеу жоспары жасалады, олар алдын-ала мәліметтер бойынша жұмыста ақауларға ие. Сондай-ақ, объектінің дизайн ерекшеліктерін ескере отырып, міндетті термовизиялық түсірілім үшін электр жабдықтарындағы бірнеше нүктелер шартты түрде белгіленуі керек. Бақылауды дайындаудағы соңғы сәт термовизиялық түсіру аспаптарын тексеру және термограф үшін қауіпсіздік техникасы бойынша нұсқама жүргізу болып табылады. Сондай-ақ, электр жабдықтарын диагностикалауға арналған жылу түсіргіштердің рұқсат ету қабілеті $0,1^{\circ}\text{C}$ -тан төмен болмауы керек, ал ең оңтайлы спектрлік диапазон 8-12 мкм болуы керек.

Электр жабдықтарын термобейнелеу бойынша жұмыстың көп бөлігі сапалы сипатқа ие, яғни ұқсас компоненттердің жылу бейнелеріне қарапайым салыстыру жүргізіледі. Термобейнелеу бақылауын жүргізу кезінде зерттелетін электр жабдығының атауын, ток жүктемесін, ауа-райының жағдайын, бетінің жай-күйін атап өту өте маңызды. Бұл зерттеу нәтижелерін реттеуге және оларды бағалау кезінде осы нәтижелерге әсер ететін факторларды ескеруге мүмкіндік береді [5].

Әдіснама

Термографиялық зерттеу-инфрақызыл камераның көмегімен жабдықтың бетіндегі температура өрістерін өлшеуге негізделген жылу жабдығын диагностикалау әдісі. Термографиялық зерттеудің негізгі принципі - барлық нысандар, соның ішінде техникалық жабдықтар арнайы инфрақызыл камерамен өлшенетін инфрақызыл сәуле шығарады [6].

Осы зерттеуде сорғы қондырғыларының техникалық жағдайын бағалау үшін механикалық және электротехникалық жабдықтардағы температуралық ауытқуларды өнеркәсіптік бақылауға арналған BALTECH TR-0102N тепловизорының көмегімен термиялық бейнелеу диагностикасы қолданылды. Құрылғы жоғары өлшеу дәлдігін ($\pm 2^{\circ}\text{C}$ дейін) және 160×120 пиксельді инфрақызыл ажыратымдылықты қамтамасыз етеді, бұл жабдықтың түйіндеріне қол жетімділігі шектеулі жағдайларда да сенімді термограммаларды алуға мүмкіндік береді.

Зерттеу нысандары "Қазатомөнеркәсіп" ҰАҚ" АҚ өндірістік объектісінде пайдаланылатын SULZER орталықтан тепкіш сорғы агрегаттары болды. Диагностикаға мойынтіректер, корпус бөліктері, байланыстырушы муфталар, сондай-ақ сорғылардың жетегін қамтамасыз ететін электр қозғалтқыштары ұшырады.

BALTECH TR-0102N жылу түсіргіші әртүрлі нысандармен жуылатын инфрақызыл сәулеленуді тіркеуге арналған. Тепловизор анық термограммаларды алуға және объектілердің температурасын дәл өлшеуге мүмкіндік береді. Тепловизор электр сымдары мен жабдықтарының жай-күйін бақылау және диагностикалау, мұнай құбырын бақылау, жылу, ылғал, ауа және оқшаулау ақауларының ағып кетуін анықтау, орман буларының алдын алу және жасырын тұтану көздерін іздеу, адам денесінің температурасын дәл өлшеу,

ғылыми зерттеулер, теміржолдарда жұмыс істеу және т. б. үшін қолданылады.

Сорғы қондырғыларының техникалық жағдайын зерттеу үшін электр қозғалтқышының мойынтіректері мен сорғы дөңгелегінің жетек біліктері таңдалды. 1-суретте SULZER сорғы қондырғысының жалпы көрінісі көрсетілген, сонымен қатар температура сипаттамаларын термиялық бақылау нүктелері көрсетілген.



1-сурет. Орталықтан тепкіш сорғы қондырғысының жалпы көрінісі

Жылу параметрлерін зерттеу BALTECH TR-0102N тепловизорын қолдана отырып, олардың техникалық жағдайын диагностикалау мақсатында жұмыс істейтін роторлы машиналар мен механикалық конструкциялардағы температураның таралуын визуализациялау және талдау функцияларын орындайтын тиісті бағдарламалық жасақтамамен жүргізілді (2-сурет).

Зерттеу тәртібі келесі кезеңдерді қамтыды:

1. *Жабдықты дайындау:* өлшеуді бастамас бұрын агрегаттардың бетін шаң мен ластанудан сыртқы тазалау, қауіпсіз кіру жағдайларын тексеру, сондай-ақ BALTECH TR-0102N пайдалану нұсқаулығына сәйкес тепловизорды калибрлеу жүргізілді.

2. *Термограммаларды түсіру:* термобейнелеу жабдықтың жұмыс режимінде тұрақты жүктемелерде жүргізілді. Түсірілім барлық диагностикалық маңызды элементтерді қамту үшін әр түрлі бұрыштарда жүргізілді.

3. *Термограмманы талдау:* алынған кескіндерді түсіндіру үшін BALTECH Expert бағдарламалық жасақтамасы қолданылды. Температура градиенттерін талдау негізінде

жергілікті қызып кету аймақтары, Нормативтік мәндерден ауытқулар және үйкелістің жоғарылауы немесе майлаудың болмауы мүмкін аймақтары анықталды.



2-сурет. BALTECH TR-0102N тепловизоры

Жылу түсіргіш-бұл көрінбейтін инфрақызыл сәуле шығаратын объектілердің көрінетін бейнесін алуға мүмкіндік беретін портативті инфрақызыл камера.

Тепловизордың жұмыс принципі инфрақызыл сәулеленуді түрлендіруге негізделген, ол оптика арқылы оны электр сигналына түрлендіретін қабылдағышқа бағытталған [7]. Алынған сигнал жылу түсіргіштің электроникасымен жазылады және дисплейде көрсетілетін электрондық кескінге (термограммаға) айналады. Демек, термограмма-бұл тепловизордың электроникасымен өңделген объектінің бейнесі, сондықтан түстердің әртүрлі градациялары инфрақызыл сәулеленудің объектінің бетіне таралуына сәйкес келеді. Әдетте түстер ашық (қызыл, сары) түстер жоғары температураны, ал қою түстер (көк, жасыл) төмен температураны көрсететін етіп бөлінеді. Сонымен, термограф объектінің бетінен келетін жылу сәулеленуіне сәйкес келетін термограмманы оңай қарастыра алады. Осылайша жасалған термограммалар арнайы бағдарламалық жасақтамамен өңделеді және талданады. Бұл талдау сәулелену коэффициентін, қоршаған ортаның температурасын есепке алуға және кез-келген өлшеу нүктесінде параметрлерді анықтауға, сондай-ақ суреттің түстер палитрасын оңтайландыруға қатысты. Термовизиялық бақылау нәтижелерінің сенімділігін арттыру үшін зерттеуде термограммаларды талдаудың салыстырмалы әдісі қолданылды, онда ағымдағы температура көрсеткіштері ұқсас типтегі жарамды қондырғыларда алынған анықтамалық мәндермен салыстырылды. Жабдықтың симметриялы аймақтары арасындағы температура айырмашылықтарын бақылауға, сондай-ақ қайта өлшеу кезінде жылу өрістерінің өзгеру динамикасына ерекше назар аударылды. Сыртқы факторлар мен жылу инерциясының әсерін есепке алу үшін әр түрлі уақыт кезеңдерінде (таңертең, күндізгі жүктеме, тоқтағаннан кейін) бірқатар түсірілімдер жүргізілді. Бұл статикалық

ауытқуларды ғана емес, сонымен қатар уақыт өте келе температура ауытқуларының дамуын да тіркеуге мүмкіндік берді, бұл әсіресе жасырын ақауларды ерте анықтау үшін маңызды — мысалы, жағармайдың тозуы, мойынтіректердің тозуы немесе теңгерімсіздік. Сонымен қатар, BALTECH TR-0102N тепловизоры арқылы алынған деректерді кросс-тексеруге мүмкіндік беретін бақылау нүктелерінде байланыс температурасын өлшеу (пирометрмен) диагностикалық валидацияның қосымша шарасы ретінде қолданылды. Сорғы қондырғыларының күйін сандық бағалау үшін температура градиенттері мен бақылау нүктелері арасындағы температура айырмашылығы қолданылды. Негізгі параметрлердің бірі температураның ауытқуы болды [8, 9]:

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\text{ср}} \quad (1)$$

мұндағы

$T_{\max}$ — зерттеу аймағындағы термограммада тіркелген максималды температура, $T_{\text{ср}}$ — қызып кетуге бейім емес, айналадағы учаскелердің орташа температурасы.

10-15 °C-тан жоғары ΔT мәндері жедел араласуды қажет ететін жергілікті қызып кетуді көрсетті. Бұл жағдайда Жабдықтың техникалық күйінің шкаласы қолданылды:

- $\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$ - жұмыс күйіндегі жабдық, қызып кету анықталмаған;
- $5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ - рұқсат етілген ауытқу, бақылау ұсынылады;
- $\Delta T \geq 10^{\circ}\text{C}$ - сыни асып кету, техникалық қызмет көрсету немесе жөндеу қажет.

Сондай-ақ, қондырғының корпусының ұзындығы бойынша температура градиенті есептелді:

$$G = \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

мұндағы L - жылу таралуының біркелкілігін бағалауға мүмкіндік беретін екі бақылау нүктесінің арасындағы қашықтық. Градиенттің күрт секірулерінде ($G > 5^{\circ}\text{C}/\text{см}$) мүмкін ішкі ақаулар қабылданды: бұзылу, үйкелістің жоғарылауы, майлау пленкасының жыртылуы және т. б. Математикалық өңдеу нәтижелері термограммалардың визуалды талдауын растау үшін пайдаланылды және жабдықтың техникалық жағдайын қорытынды бағалауға біріктірілді.

Нәтижелер мен талқылау

Жабдықтың беткі температурасы туралы алынған мәліметтер температураның жоғарылау нүктелерін және жылу алмасу проблемалары бар аймақтарды анықтауға мүмкіндік беретін арнайы бағдарламалық жасақтаманың көмегімен талданады. Термографиялық зерттеу жылу жабдықтарының жұмысында көптеген проблемаларды анықтауға мүмкіндік береді – мысалы: - жабдықтың бетіндегі температураның біркелкі бөлінбеуі; - жоғары температура аймақтары, бұл Жабдықтың жұмысында ақаулардың болуын көрсетуі мүмкін; - Жылу алмасудың төмен тиімділігі, бұл энергияны жоғалтуға және энергия шығындарының артуына әкелуі мүмкін. Термографиялық зерттеу жылу жабдықтарының жұмыс жағдайында да, жабдық өшірілгенде де, оның жұмыс басталғанға дейінгі күйін бағалау үшін жүргізілуі мүмкін. Термографиялық зерттеудің артықшылықтарының бірі - жылу жабдығының жұмысындағы проблемаларды оны тоқтатпай-ақ тез анықтау мүмкіндігі. Сондай-ақ, бұл әдіс жылу алмасудың максималды тиімділігіне қол жеткізу үшін жабдықтың оңтайлы параметрін анықтауға көмектеседі. Термографиялық зерттеудің кемшілігі оның жоғары құны және алынған мәліметтерге

талдау жасау үшін білікті қызметкерлердің талабы болуы мүмкін. Жоғарыда сипатталған диагностикалық әдістерден басқа, жылу жабдықтарының күйі туралы дәлірек ақпарат алуға мүмкіндік беретін басқа да егжей-тегжейлі әдістер бар [10, 11]. Осындай әдістердің бірі-акустикалық диагностика. Оның көмегімен жарықтар, коррозия, мойынтіректердің тозуы және басқалары сияқты ақауларды анықтауға болады. Бұл әдіс жабдық жұмыс істеп тұрған кезде пайда болатын дыбыстық тербелістерді талдауға негізделген. Бұл жабдықтың әртүрлі түйіндеріне орнатылуы мүмкін арнайы акустикалық датчиктерді пайдаланады. Алынған ақпарат мамандарға ақаудың орналасқан жері мен сипатын анықтауға және одан әрі әрекет ету туралы шешім қабылдауға мүмкіндік береді. Тағы бір әдіс — эндоскопия. Бұл жабдықтың ішкі беттерін визуалды тексеруге мүмкіндік береді. Ол үшін жабдықтың ішіне тесіктер немесе тығындар арқылы енгізілетін арнайы оптикалық құрылғылар-эндоскоптар қолданылады. Алынған кескіндер жарықтар, коррозия, қабыршақтану және т.б. сияқты әртүрлі ақауларды анықтауға мүмкіндік береді. Ол инфрақызыл диапазондағы жабдықты шығаратын сәулеленуді талдауға негізделген. Бұл әдіс қызып кету, жылу алмасудың бұзылуы және басқалары сияқты әртүрлі ақауларды анықтауға мүмкіндік береді. Инфрақызыл диагностиканы жабдықтың беткі температурасын тіркейтін және оны талдауға болатын кескінге айналдыратын жылу кескіні арқылы жасауға болады. Жалпы, диагностиканың неғұрлым егжей-тегжейлі әдістерін қолдану күрделі және жасырын ақауларды анықтауға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде техникалық қызмет көрсету тиімділігін арттырады және жылу жабдықтарының қызмет ету мерзімін ұзартады. Жылу сорғыларының күйін диагностикалау үшін алдымен тиімділікті өлшеу әдісін қолдану керек. Біріншіден, жылу сорғысының жылу алмастырғыштары жер астында орналасқан, бұл визуалды тексеруді мүмкін емес етеді. Екіншіден, алынған өлшеу нәтижелері оның жұмысының тиімділігіне әсер ететін аппараттық ақаулардың бар-жоғын анықтайды. Жылу сорғысының жұмысына әсер ететін қандай да бір ақау туындаған жағдайда, ең тиімді диагностика ретінде жылу бейнелеу жабдығы арқылы жылу ағып кетудің орнын анықтауға мүмкіндік беретін инфрақызыл диагностика әдісін қолданған дұрыс. Ақаулы аймақты анықтағаннан кейін ақауды жоюға кірісу керек [11, 12].

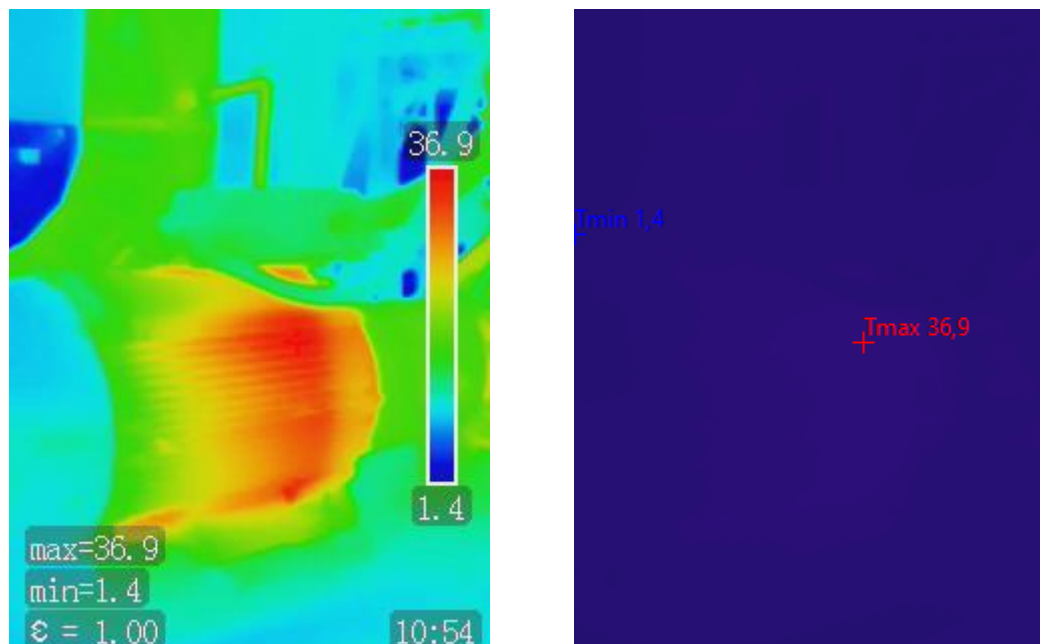
Ортадан тепкіш сорғының жұмысын талдау үшін 160×120 пиксель ИК-детекторының матрицалық ажыратымдылығы және -20°C-тан +600°C-қа дейінгі температура диапазоны бар жылу түсіргіш қолданылды (1-кесте). Өлшеу нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін жабдықта оны тоқтатпай жүргізілді. Негізгі қызығушылық аймақтары мойынтіректер, байланыстырушы муфта және сорғы корпусы болды.

1-кесте. Өлшеу шарттары

Тепловизор моделі	BALTECH TR-0102N
Сериялық нөмір	900196011198
SDK нұсқасы	V_2.0.12
Сәулелену коэффициенті	100 %
Қашықтық	1,00 m
Ылғалдылық	60 %
Температура	21,0°C
Шық нүктесі	12,9°C

«ҚазАтомӨнеркәсіп» ҰАК» АҚ «ХОРАСАН-У» БК» өнеркәсібінде SULZER ортадан тепкіш сорғы агрегаттарының техникалық күйіне жүргізілген зерттеулер бойынша сорғы мен электр қозғалтқышының мойынтіректері тораптарының жылу сипаттамаларының нәтижелері алынды. BALTECH TR-0102N тепловизорымен біріктірілген бағдарламалық жасақтаманың көмегімен жылу деректері өңделіп, термограммалар мен температураның таралуы түрінде кескіндер алынды.

3 және 4-суреттерде сорғы қондырғыларының термограммалары көрсетілген, олар басқа аймақтармен салыстырғанда ауытқуларды көрсететін жоғары температуралы аймақтарды көрсетеді.

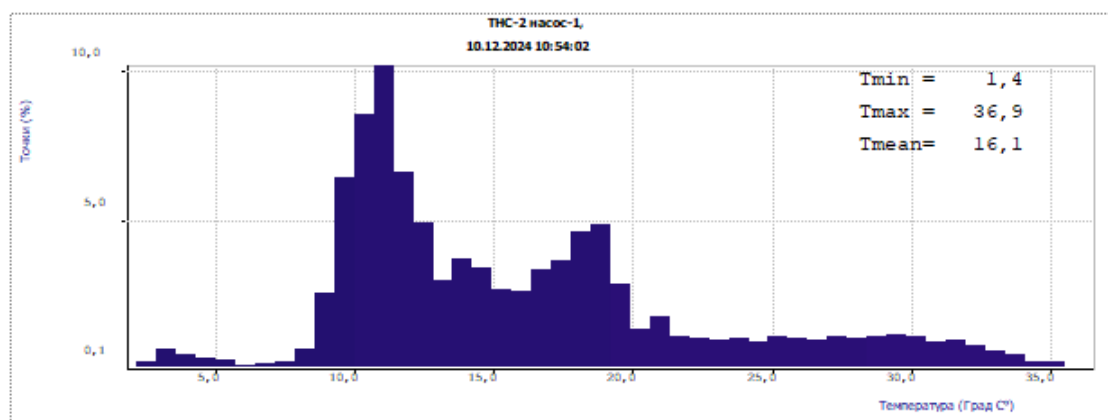


3-сурет. Термиялық сурет, өлшемі 120x160

"Ыстық металл" палитрасы, Tmin=-40,0°C Tmax=1700,0°C

Изотермиялық түс: жоқ

Шық астындағы нүктенің түсі: жоқ



4-сурет. № 1 ЖСС-2 сорғы электр қозғалтқышының мойынтіректерінің термограммасы

Тепловизордың көмегімен алынған ЖСС-2 учаскесіндегі №1 сорғы электр қозғалтқышының мойынтірегінің температуралық таралуының бейнесі.

Жүргізілген зерттеу нәтижелері бойынша анықталған температуралық ауытқулардың негізгі себептерінің бірі термограммаларда жергілікті қызып кету аймақтары түрінде көрінетін біркелкі емес тозу нәтижесінде пайда болатын жұмыс дөңгелегінің теңгерімсіздігі болып табылатыны анықталды.

«ҚазАтомӨнеркәсіп» ҰАК» АҚ «ХОРАСАН-У» БК» өнеркәсібінде SULZER ортадан тепкіш сорғы агрегатының подшипниктік тораптарын термовизиялық талдау нәтижелері температуралық көрсеткіштердің норма шегінде екенін көрсетеді, бұл сорғы жабдығының жақсы техникалық күйіне сәйкес келеді. Дегенмен, температураның қалыпты мәндеріне қарамастан, анықталған жергілікті температура ауытқулары ықтимал ақауларды көрсетеді және сорғы жабдықтарының күйін жүйелі бақылауды қажет етеді.

Қорытынды

Тепловизор-бұл орталықтан тепкіш сорғыларды жедел диагностикалауға арналған қуатты құрал, әсіресе басқа әдістермен бірге. Тұрақты термиялық бақылау Жабдықтың сенімділігін арттыруға, апаттар қаупін азайтуға және жөндеу шығындарын азайтуға мүмкіндік береді. Жылулық бақылауды жоспарлы-алдын алу қызметінің бөлігі ретінде тұрақты негізде жүргізу ұсынылады.

Қозғалтқыштар мен сорғыларды диагностикалауда жылу камераларын пайдалану жабдықтың сенімділігі мен қауіпсіздігін жақсартудың тиімді құралы болып табылады. Бұл әдіс ықтимал проблемаларды уақтылы анықтауға ғана емес, сонымен қатар төтенше жағдайлар қаупін айтарлықтай азайтуға мүмкіндік береді. Жабдыққа қызмет көрсету тәжірибесіне термиялық бейнелеу диагностикасын енгізу өндірістік процестерді оңтайландыруға және жөндеу мен техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтуға бағытталған маңызды қадам болады.

Жылу жабдықтарын диагностикалау жабдықтың сенімді және тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз етудің маңызды процесі болып табылады. Жылу жабдықтарын диагностикалаудың әртүрлі әдістерін қолдану оның жұмыс тиімділігін арттыруға, қауіпсіздікті қамтамасыз етуге және жабдықты жөндеу мен ауыстыру шығындарын азайтуға мүмкіндік береді. Дегенмен, әрбір әдістің артықшылықтары мен кемшіліктері бар және дұрыс әдісті таңдау диагностикалық мақсаттарға, жабдық түріне және жұмыс жағдайларына байланысты. Мысалы, жабдықтың жұмысындағы бұзылуларды тез анықтау үшін жану өнімдерін визуалды тексеру және талдау жеткілікті болуы мүмкін, ал егжей-тегжейлі диагностика үшін термографиялық зерттеу немесе акустикалық сигналдарды қолдану арқылы диагностика сияқты күрделі әдістерді пайдалану қажет. Сондықтан нақты жағдайға байланысты диагностикалық әдістерді дұрыс таңдау және жылу жабдықтарын диагностикалауға жан-жақты қарау маңызды.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің АР22684928-«Іске асыратын аппаратураның әдістемесін әзірлеу арқылы сорғы агрегаттарының техникалық жай-күйін диагностикалау тиімділігін арттыру» гранттық қаржыландыру жобасына сәйкес орындалды.

Авторлардың қосқан үлесі

Сағатова Л.Б. - деректерді жинау және талдау, мақала мәтінін жазу, редакциялау, ұжымның жұмысын үйлестіру, қорытындылар мен ұсыныстарды дайындау.

Бортебаев С.А. - талдау, редакциялау, жазу (кіріспе), визуализация, әдістеме, ақпарат жинау.

Басканбаева Д.Д. - мақалада келтірілген графиктер мен кестелерді дайындап, нәтижелерге талдау жасады.

Ш.Д. Ахметова - зерттеу тұжырымдамасын, мәліметтер жинау, әдебиеттер тізімімен жұмыс.

Әдебиеттер тізімі

1. В.А. Герасимов, С.И. Мельников, Тепловизионный контроль насосного оборудования на промышленных объектах, Вестник машиностроения, 7, с. 48–52 (2019).
2. Ю.В. Савченко, Применение тепловизионного контроля при техническом обслуживании насосных агрегатов, Энергетическое оборудование: эксплуатация и диагностика, 2, с. 35–39 (2020).
3. J. M. Yacout, C. B. Moloney, Infrared thermography and machine learning techniques for fault detection in rotating equipment, Journal of Mechanical Engineering Science, 232(22), p. 4125–4136 (2018). <https://doi.org/10.1177/0954406218783451>
4. H. B. Ahmed, Integrated thermography and vibration analysis for predictive maintenance of centrifugal pumps, International Journal of Prognostics and Health Management, 11(1), p. 1–10 (2020). <https://www.phmsociety.org/journal>
5. С.А. Бажанов, Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации, часть 2 (НТФ «Энергопрогресс, Москва, 2005), с. 64.
6. Fluke Corporation Introduction to thermography, Fluke Corporation, American Technical Publishers, Inc., The Snell Group, Orland Park, Иллинойс, с 68 (2009).
7. А. В. Афонин, Инфракрасная термография в энергетике, Основы инфракрасной термографии, том 1 (СПб.: изд. ПЭИПК, Москва, 2004), с. 240.
8. В.П. Вавилов, Инфракрасная термография и тепловой контроль, (ИД Спектр, Москва, 2009), с. 544.
9. В.П. Иванов, А.С. Константинов, В.В. Петров, Диагностика и ремонт теплотехнического оборудования, (Машиностроение, Москва, 1991), с. 256.
10. С. А. Ефремов, Тепловизионная диагностика: принципы и применение, (Техносфера, Москва, 2015), с. 328.
11. В. А. Васильев, Основы теплового контроля и диагностики машин. (СПб, Питер, 2012), с. 270.
12. ISO 10816-1:1995. Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 1: General guidelines.
13. Тепловизионный контроль состояния оборудования на промышленных предприятиях, Теплоэнергетика, 6, 2020, с. 55–60.
14. Тепловизионное обследование насосного оборудования: опыт применения, Журнал «Энергосбережение», №4, 2021.

Л.Б. Сағатова*, С.А.Бортебаев, Д.Д. Басканбаева, Ш.Д. Ахметова

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

**Диагностика технического состояния насосного оборудования тепловым
методом контроля**

Аннотация. В статье рассматриваются методы диагностики технического состояния насосных агрегатов с использованием тепловизора в условиях эксплуатации АО НАК «КазАтомпром». В рамках настоящего исследования использовалась выборка диагностической информации, полученной с помощью тепловизионного обследования центробежных насосных агрегатов SULZER, подлежащих процедуре оценки технического состояния. Описана методика проведения тепловизионной диагностики на действующем оборудовании. Для анализа полученных данных использовались методы обработки термограмм, позволяющие выявить зоны локального перегрева, свидетельствующие о потенциальных дефектах. Приведены результаты тепловизионного анализа подшипниковых узлов насосных агрегатов. Проведённые исследования позволили сформировать базовые диагностические признаки оценки технического состояния по тепловым характеристикам, что обеспечивает создание единого диагностического критерия для оценки и прогнозирования состояния центробежных насосных агрегатов. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность применения тепловизионного метода для раннего выявления неисправностей и оценки остаточного ресурса оборудования. Это, в свою очередь, способствует повышению надёжности работы насосных установок, снижению рисков аварийных ситуаций и оптимизации регламентов технического обслуживания. Представленная методика может быть рекомендована для широкого внедрения на предприятиях с аналогичным типом оборудования, а также использоваться в системе мониторинга технического состояния в рамках концепции предиктивного обслуживания.

Ключевые слова: центробежный насос, тепловизор, термографическое исследование, температура, инфракрасное излучение.

L.B. Sagatova*, S.A. Bortebayev, D.D. Baskanbayeva, Sh.D. Akhmetova

Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan

**Diagnostics of the technical condition of pumping equipment by thermal control
method**

Abstract. The article discusses methods for diagnosing the technical condition of pumping units using a thermal imager in the operating conditions of JSC NAC KazAtomprom. In the framework of this study, we used a sample of diagnostic information obtained by thermal imaging examination of SULZER centrifugal pumping units subject to a technical condition assessment procedure. A technique for conducting thermal imaging diagnostics on existing equipment is described. To analyze the data obtained, thermogram processing methods were used to identify

areas of local overheating, indicating potential defects. The results of thermal imaging analysis of bearing assemblies of pumping units are presented. The conducted studies have made it possible to form basic diagnostic signs for assessing the technical condition based on thermal characteristics, which ensures the creation of a single diagnostic criterion for assessing and predicting the condition of centrifugal pumping units. The results obtained demonstrate the high efficiency of the thermal imaging method for early detection of malfunctions and assessment of the remaining life of the equipment. This, in turn, helps to improve the reliability of pumping units, reduce the risk of accidents and optimize maintenance regulations. The presented methodology can be recommended for widespread implementation in enterprises with a similar type of equipment, as well as used in a technical condition monitoring system within the framework of the predictive maintenance concept.

Keywords: centrifugal pump, thermal imager, thermographic examination, temperature, infrared radiation.

References

1. V.A. Gerasimov, S.I. Mel'nikov, Teplovizionnyj kontrol' nasosnogo oborudovaniya na promyshlennyh ob"ektah, Vestnik mashinostroeniya, 7, c. 48–52 (2019).
2. YU.V. Savchenko, Primenenie teplovizionnogo kontrolya pri tekhnicheskome obsluzhivanii nasosnyh agregatov, Energeticheskoe oborudovanie: ekspluatatsiya i diagnostika, 2, c. 35–39 (2020).
3. J. M. Yacout, C. B. Moloney, Infrared thermography and machine learning techniques for fault detection in rotating equipment, Journal of Mechanical Engineering Science, 232(22), p. 4125–4136 (2018). <https://doi.org/10.1177/0954406218783451>
4. H. B. Ahmed, Integrated thermography and vibration analysis for predictive maintenance of centrifugal pumps, International Journal of Prognostics and Health Management, 11(1), p. 1–10 (2020). <https://www.phmsociety.org/journal>
5. S.A. Bazhanov, Teplovizionnyj kontrol' elektrooborudovaniya v ekspluatatsii, chast' 2 (NTF «Energoprogress, Moskva, 2005), c. 64.
6. Fluke Corporation Introduction to thermography, Fluke Corporation, American Technical Publishers, Inc., The Snell Group, Orland Park, Illinois, s 68 (2009).
7. V.P. Vavilov, Infekrasnaya termografiya i teplovoj kontrol', (ID Spektr, Moskva, 2009), s. 544.
8. V.P. Ivanov, A.S. Konstantinov, V.V. Petrov, Diagnostika i remont teplotekhnicheskogo oborudovaniya, (Mashinostroenie, Moskva, 1991), s. 256.
9. S. A. Efremov, Teplovizionnaya diagnostika: principy i primeneniye, (Tekhnosfera, Moskva, 2015), s. 328.
10. V. A. Vasil'ev, Osnovy teplovogo kontrolya i diagnostiki mashin. (SPb, Piter, 2012), s. 270.
11. ISO 10816-1:1995. Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 1: General guidelines.
12. Teplovizionnyj kontrol' sostoyaniya oborudovaniya na promyshlennyh predpriyatiyah, Teploenergetika, 6, 2020, s. 55–60.
13. Teplovizionnoe obsledovanie nasosnogo oborudovaniya: opyt primeneniya, ZHurnal «Energoberezhenie», №4, 2021.

Авторлар туралы мәлімет:

Л.Б.Сағатова - «Машиналар мен жабдықтардың цифрлық инженериясы» БББ постдокторанты, «Көлік инженериясы» бағыты бойынша аға оқытушысы, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22а, 050013, Алматы, Қазақстан

С.А. Бортебаев – техника ғылымының кандидаты, «технологиялық машиналар және жабдықтар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22а, 050013, Алматы, Қазақстан

Д.Д. Басканбаева - PhD, «технологиялық машиналар және жабдықтар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22а, 050013, Алматы, Қазақстан, d.baskanbayeva@satbayev.university

Ш.Д. Ахметова - техника ғылымының кандидаты, «Көлік инженериясы» бағыты бойынша қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22а, 050013, Алматы, Қазақстан

Л.Б.Сағатова - постдокторант ОП «Цифровая инженерия машин и оборудования», старший преподаватель по направлению «Транспортная инженерия», Satbayev University, ул. Сатпаева, 22а, 050013, Алматы, Казахстан

С.А. Бортебаев – кандидат технических наук, Ассоциированный профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», Satbayev University, ул. Сатпаева, 22а, 050013, Алматы, Казахстан

Д.Д. Басканбаева - PhD, Ассоциированный профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», Satbayev University, ул. Сатпаева, 22а, 050013, Алматы, Казахстан

Ш.Д. Ахметова - кандидат технических наук, Ассоциированный профессор по направлению «Транспортная инженерия», Satbayev University, ул. Сатпаева, 22а, 050013, Алматы, Казахстан

L.B. Sagatova - postdoctoral student of the EP "Digital Engineering of Machines and Equipment", Senior lecturer in the field of Transport Engineering, Satbayev University, 22a Satpayev str., 050013, Almaty, Kazakhstan

S.A. Bortebayev - candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technological Machines and equipment, Satbayev University, 22a Satpayev str., 050013, Almaty, Kazakhstan

D.D. Baskanbayeva - Ph.D., Associate Professor of the Department of Technological Machines and equipment, Satbayev University, 22a Satpayev str., 050013, Almaty, Kazakhstan

Sh.D. Akhmetova - candidate of technical sciences, Associate Professor in the field of Transport Engineering, Satbayev University, 22a Satpayev str., 050013, Almaty, Kazakhstan



Copyright: © 2025 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/>)



МРНТИ 55.03.07

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-184-200>

Аналитический подход к расчёту динамических характеристик и маховика шестизвенного механизма кривошипного пресса

А.К. Тулешов ¹, М.Ж. Куатова ^{1,2}, А.Т. Хабиев¹ ,
Б.М. Меркибаева ¹

¹Институт механики и машиноведения имени академика У.А.Джолдасбекова, Алматы, Казахстан

²Международный инженерно-технологический университет, Алматы, Казахстан

E mail: Kuatova.moldyr@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается методика динамического проектирования гибридного кривошипного пресса на базе шестизвенного механизма Стефенсона, активно применяемого в современных сервопрессах. Проведен подробный анализ коэффициента неравномерности движения, характеристик возмущающего момента, а также методика определения момента инерции маховика и средней скорости установившегося режима. Показано, что при грамотном выборе этих параметров базисное звено может играть роль встроенного противовеса, значительно снижая неравномерность вращения и динамические ошибки механизма. Это позволяет сократить требования к массе маховика, что особенно важно при проектировании энергоэффективных машин. В работе используется аналитический подход с применением методов математического моделирования. Разработаны алгоритмы решения дифференциальных уравнений движения и проведена оценка динамических ошибок. Полученные формулы и численные данные подтверждают эффективность предложенной методики и демонстрируют её практическую применимость. Метод особенно полезен для предварительного проектирования прессов, обеспечивая учет энергетических и вибродинамических характеристик на ранних этапах проектирования. Результаты работы могут быть использованы при создании интеллектуальных приводных систем штамповочного оборудования.

Ключевые слова: кривошипный пресс, шестизвенный механизм, маховик, виброактивность, динамическая ошибка, численное моделирование.

Поступила 18.07.2025. Доработана 30.08.2025. Одобрена 06.09.2025. Доступна онлайн 30.09.2025

* автор для корреспонденции

Введение

Актуальность данной работы определяется возрастающим интересом к энергоэффективным и устойчивым приводным системам, а также необходимостью учета вибродинамических характеристик на ранних этапах проектирования. Объектом исследования является кривошипный пресс, построенный на базе шестизвенного механизма Стефенсона. Предметом исследования выступают динамические параметры и характеристики работы механизма.

В рамках настоящей работы рассмотрены исследования, связанные с анализом механизмов типа Стефенсона, включая труды по их кинематике, динамике и компьютерному моделированию. Наиболее существенный вклад внесли работы, посвящённые оптимизации структурных параметров для обеспечения устойчивости и точности движения. При этом выявлены пробелы в части учета динамической характеристики привода, особенно при использовании сервомоторов в качестве источника движения. Недостаточно изученным остается вопрос влияния массы и геометрии базисного звена на инерционные характеристики и, как следствие, на неравномерность вращения. Это и обуславливает необходимость разработки новой методики, сочетающей аналитический подход и практическое моделирование.

Обзор литературы. Кривошипный пресс-автомат проектируется на основе шестизвенного кривошипно-ползунного механизма Стефенсона [1]. Такие механизмы, особенно схема Стефенсона II с двумя шатунными тягами, всё чаще применяются в современных сервопрессах для повышения точности и устойчивости работы ползуна при переменных нагрузках [2]. Это позволяет добиться более равномерного распределения усилий и сократить перекосы, особенно при эксцентричном расположении нагрузки [3].

Технологический процесс штамповки сопровождается преодолением значительных переменных сил, что приводит к импульсным динамическим нагрузкам на звенья и приводной двигатель [4]. Существенное влияние на динамику пресса оказывает внутренняя виброактивность рычажного механизма, вызванная инерционными силами и моментами, а также ударными нагрузками [5,6]. Дополнительными источниками динамических ошибок служат трение и зазоры в сочленениях, упругие свойства звеньев, а также свойства обрабатываемого материала [7,8].

Особое внимание в современных исследованиях уделяется коэффициенту неравномерности движения, который отражает отклонения угловой скорости ведущего звена от среднего значения и оказывает влияние на надёжность и точность работы всего механизма. Согласно [9], подбор момента инерции маховика с учётом энергетических характеристик существенно снижает неравномерность вращения в циклических машинах. В этом контексте становится актуальной задача оптимального расчёта маховика, его размещения и соотношения с массой подвижных звеньев.

Одним из направлений снижения вибрационной активности является динамическое уравнивание механизмов. Современные методы, основанные на многокритериальной оптимизации (например, алгоритм дифференциальной эволюции), позволяют эффективно минимизировать силы и моменты раскачки шестизвенных механизмов [10].

Моделирование динамики нового пресса с учетом этих факторов представляет сложную, актуальную задачу. Вместе с тем для широкого применения кривошипных прессов на базе этих механизмов необходимо разработать простые и понятные методы

динамического проектирования для конструктора. При проектировании механизмов машин путем математического моделирования определяют значения постоянных динамических параметров: среднюю скорость установившегося режима цикловых машин; коэффициент неравномерности хода; момент инерции маховика и т.п. Тем самым на стадии предварительного проектирования определяют эти параметры, чтобы наилучшим образом приблизиться к реальному технологическому режиму машины. Динамические ошибки, возникающие при переходных режимах, отклонениях от стационарного вращения и ударных нагрузках, требуют точного учёта в математических моделях. Численные методы решения дифференциальных уравнений, моделирование в средах SimulationX, Matlab/Simulink и MSC Adams активно применяются для анализа таких систем [11,12].

Современные публикации подтверждают эффективность применения механизма Стефенсона II в сервопрессах. В работах авторов [2,13,14] показано, что данная конструкция обеспечивает более точную технологическую выдержку, снижает отклонения движения ползуна и улучшает стабильность при эксцентричных нагрузках. Кроме того, выявлено, что форма и масса базисного звена могут быть использованы как средство компенсации неравномерности вращения, снижая тем самым необходимость в установке массивного маховика [15]. В данной работе предлагается комплексный подход динамического проектирования кривошипного пресса на базе механизма Стефенсона, основанный как на известных методах [4,5,15].

Методология

В настоящей работе рассматривается метод динамического исследования виброактивности шестизвенного исполнительного механизма кривошипного пресса, анализ коэффициента неравномерности движения, методика определения момента инерции маховика, который обеспечивает устойчивость равномерного вращения входного вала машины.

Уравнение динамики шестизвенного механизма (рисунок 1) запишем в следующем виде [14, 16]

$$J_{\text{пр}}(\varphi)\ddot{\varphi} + \frac{1}{2}J'_{\text{пр}}(\varphi)\dot{\varphi}^2 = i_{\text{пм}}M_D(\dot{\varphi}/i_{\text{пм}}) + M_C(\varphi) \quad (1)$$

Отметим, что в уравнении (1) пренебрегается масса параллельных шатунов 3 и 4 по сравнению массой ползуна 5.

С учетом кинематических соотношений между координатами механизма [12] приведенные динамические параметры уравнения (1) будут записаны в виде:

$$\begin{aligned} J_{\text{пр}}(\varphi) &= J_O + m_5(r^2 \cos^2 \varphi + 2rl \cdot P'_\psi(\varphi) \cos \varphi \cos \psi + l^2 P''_\psi(\varphi) \cos^2 \psi), \\ \frac{1}{2}J'_{\text{пр}}(\varphi) &= -m_5 r \sin \varphi (r \cos \varphi + l \cdot P'_\psi(\varphi) \cos \psi) - m_5 l (r \cos \varphi + l P'_\psi(\varphi) \cos \psi) \cdot \\ &\quad \left[-(P'_\psi)^2 \sin \psi + P''_\psi \cos \psi \right], \\ M_{\text{пр}} &= i_{\text{пм}} M_D + r[G_5 + G_2 - F_5(\varphi)] \cos \varphi + l P'_\psi(\varphi)[G_5 - F_5(\varphi)] \cos \psi(\varphi), \\ M_C(\varphi) &= r[G_5 + G_2 - F_5(\varphi)] \cos \varphi + l P'_\psi(\varphi)[G_5 - F_5(\varphi)] \cos \psi(\varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

где передаточные отношения

$$\cos \psi = -\frac{r \cos \varphi}{l} \text{ и } S = a + r \sin \varphi \pm \sqrt{l^2 - r^2 \cos^2 \varphi},$$

$$\begin{aligned} \Pi'_{\psi}(\varphi) &= \psi' = -\frac{r \sin \varphi}{l \sin \psi}, \sin \psi \neq 0, \psi \neq 0, k\pi, k = 1, 2, 3, \dots \\ \Pi'_S(\varphi) &= S' = r \cos \varphi + l \cdot \Pi'_{\psi}(\varphi) \cos \psi, \\ \Pi''_{\psi}(\varphi) &= \psi'' = -\frac{1}{\sin \psi} \left[\frac{r}{l} \cos \varphi - (\Pi'_{\psi})^2 \cos \psi \right], \sin \psi \neq 0, \psi \neq 0, k\pi, k = 1, 2, 3, \dots \\ \Pi''_S(\varphi) &= S'' = -r \sin \varphi - l \cdot (\Pi'_{\psi})^2 \sin \psi + l \cdot \Pi''_{\psi} \cos \psi. \end{aligned} \quad (3)$$

M_D - движущий момент приложен на ведущем звене, J_D - момент инерции ротора, $F_5(S)$ - технологическая сила деформирования поковки двигателя, приложенная к ползуну. При этом будем учитывать, что звено 2 совершает поступательное движение, характер движения звеньев 3 и 4 совпадают. Пусть J_1 момент инерции кривошипа, m_2 - масса звена 2, m_5 - масса ползуна 5. Для этого механизма J_1 , – моменты инерций кривошипа относительно осей вращения (кривошип уравновешен), $i_{\text{пм}}$ - передаточное число передаточного механизма (редуктора).

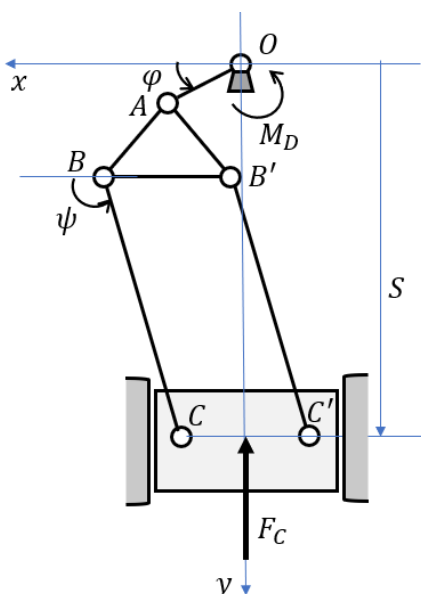


Рисунок 1. Кривошипный механизм пресс-автомата

Активной движущей силой сервопривода является движущий момент силы M_D электродвигателя: $M_D = f(\dot{M}_D, \dot{\varphi}, U)$. Если учитывать, что в кривошипном прессе используются двигатели постоянного тока, то динамическую характеристику можно записать следующим образом [12, 15]:

$$\tau \dot{M}_D + M_D = \mu U - s\omega, \quad (4)$$

где $\tau = LR^{-1}$ - электромагнитная постоянная времени, L - индуктивность, R - сопротивление, $\mu = k\Phi/R$ и $s = (k\Phi)^2/R$ - крутизна статической характеристики. Также имеет место равенство $U = k\Phi\omega$, которое определяет зависимость управления от скорости вала двигателя, Φ - магнитный поток, k - коэффициент, зависящий от некоторых

параметров двигателя. В решении задач динамики привода полезным является зависимость $\omega = \frac{\mu U}{s} - \frac{M_D}{s}$.

Таким образом получаем систему дифференциальных уравнений (1) и (4), содержащих две неизвестные функции $M_D(t)$ и $\varphi(t)$:

$$\begin{aligned} J_{\text{пр}}(\varphi)\ddot{\varphi} + \frac{1}{2}J'_{\text{пр}}(\varphi)\dot{\varphi}^2 &= i_{\text{пм}}M_D(\dot{\varphi}/i_{\text{пм}}) + M_C(\varphi), \\ \tau\dot{M}_D + M_D &= \mu U - s\omega \end{aligned} \quad (5)$$

Кривошипный пресс-автомат относится к цикловым машинам, и рабочий процесс в таких машинах осуществляется в установившемся режиме [4,15]. Обычно в установившемся режиме функция управления является постоянной величиной:

а) $U = u_0 = \text{const}$. При этом в кривошипной машине устанавливается периодическое движение, при котором угловая скорость ротора остается близкой к некоторому среднему значению $\omega = \omega_0$:

$$\dot{\varphi}(t) = \omega_0 + \dot{\psi}(t), \text{ причем } |\dot{\psi}|_{\text{max}} \ll \omega_0. \quad (6)$$

в) установившееся движение при $U = u_0 = \text{const}$. Уравнение (1) в этих условиях имеет вид

$$J_{\text{пр}}(\varphi)\ddot{\varphi} + \frac{1}{2}J'_{\text{пр}}(\varphi)\dot{\varphi}^2 = i_{\text{пм}}M_D(u_0, \dot{\varphi}/i_{\text{пм}}) + M_C(\varphi) \quad (7)$$

Или

$$J_0\ddot{\varphi} - i_{\text{пм}}M_{Ds}\left(u_0, \frac{\dot{\varphi}}{i_{\text{пм}}}\right) = -\tilde{J}_{\text{пр}}(\varphi)\ddot{\varphi} - \frac{1}{2}J'_{\text{пр}}(\varphi)\dot{\varphi}^2 + M_C(\varphi), \quad (8)$$

где периодическая функция $J_{\text{пр}}(\varphi)$ из (2) по φ разложена на постоянные и переменные составляющие $J_{\text{пр}}(\varphi) = J_0 + \tilde{J}_{\text{пр}}(\varphi)$ [7]: $\tilde{J}_{\text{пр}}(\varphi) = m_5(r^2 \cos^2 \varphi + 2rl \cdot P'_\psi(\varphi) \cos \varphi \cos \psi + l^2 P''_\psi(\varphi) \cos^2 \psi)$.

Задача 1. На основе уравнении (8) строится алгоритм решения путем последовательных приближений [8, 16]

$$\begin{aligned} J_0\ddot{\varphi}^k - i_{\text{пм}}M_{Ds}\left(u_0, \frac{\dot{\varphi}^k}{i_{\text{пм}}}\right) &= -\tilde{J}_{\text{пр}}(\varphi^{k-1})\ddot{\varphi}^{k-1} \\ -\frac{1}{2}J'_{\text{пр}}(\varphi^{k-1})(\dot{\varphi}^{k-1})^2 + M_C(\varphi^{k-1}), &k = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (9)$$

На основе численного метода решения дифференциального уравнения второго порядка (9) построить алгоритм решения уравнении (9) в промежутке $[\varphi^{k-1}, \varphi^k]$.

Сходимость оценивается по допустимой разнице двух последовательных приближений:

$$|\varphi^k - \varphi^{k-1}|_{\text{max}} \leq \delta_\varphi, \text{ где } \delta_\varphi - \text{малое число.} \quad (10)$$

В наладенных цикловых машинах бывает достаточным первое приближение моделирования [8, 14].

Задача 2. Определение скорости ω_0 . Пусть выполняется $u_0 = \text{const}$ и $\omega = \omega_0 = \text{const}$. Нулевое приближение ($k=0$) $\varphi^0 = \omega_0 t$ для любого t на основании (9) удовлетворяет уравнению

$$i_{\text{пм}} \left(\mu u_0 - s \frac{\omega_0}{i_{\text{пм}}} \right) = \frac{1}{2} J'_{\text{пр}}(\varphi^0) \omega_0^2 - M_c(\varphi^0), \varphi^0 \in [0, 2\pi] \quad (11)$$

или

$$\omega_0^2 + p \omega_0 + d = 0, \quad (12)$$

где $p = \frac{2ns}{\sum J'_{\text{пр}}(\varphi^0)}$, $d = -\frac{2}{\sum J'_{\text{пр}}(\varphi^0)} [ni_{\text{пм}}\mu u_0 + \sum M_c(\varphi^0)]$ и n – общее число положений кривошипа.

Решение уравнения (12) имеет вид

$$(\omega)_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} - d}, \quad (13)$$

где $\frac{p^2}{4} \geq d$, так как нас интересуют действительные корни уравнения (12), которое выполняется

$$\left(\frac{ns}{\sum J'_{\text{пр}}(\varphi^0)} \right)^2 + \frac{2}{\sum J'_{\text{пр}}(\varphi^0)} [ni_{\text{пм}}\mu u_0 + \sum M_c(\varphi^0)] > 0, \quad (14)$$

Из двух корней

$(\omega)_1 = -\frac{p}{2} + \sqrt{\frac{p^2}{4} - d}$, $(\omega)_2 = -\frac{p}{2} - \sqrt{\frac{p^2}{4} - d}$, следует принять скорость, близкую по абсолютному значению к $\omega_H = \omega_{DH}/i_{\text{пм}}$, ω_{DH} – номинальная скорость сервопривода.

Задача 3. На примере кривошипного пресс-автомата алгебраическое уравнение (17) позволяет определить угловую скорость ω_0 установившегося режима машины [4,8] или значение функции управления $u = u_0$, которое соответствует заданному значению ω_0 [15]. Последнюю задачу важно решать при использовании асинхронного сервопривода.

Определение динамических ошибок. В первом приближении ($k=1$), согласно уравнению (202), имеем следующее уравнение движения:

$$J_0 \ddot{\varphi}^{(1)} - i_{\text{пм}} M_{Ds} \left(u_0, \frac{\dot{\varphi}^{(1)}}{i_{\text{пм}}} \right) = L(t), \quad (18)$$

где $L(t) = -\frac{1}{2} \tilde{J}'_{\text{пр}}(\omega_0 t) (\omega_0)^2 + \tilde{M}_c(\omega_0 t)$ – возмущающий момент [16], характеризующий внутреннюю виброактивность рабочего механизма.

Если ввести новую переменную $\psi = \varphi^{(1)} - \omega_0 t$ с учетом $\dot{\psi} = \dot{\varphi}^{(1)} - \omega_0$ и $\ddot{\psi} = \ddot{\varphi}^{(1)}$ на основании (18) получится линейное дифференциальное уравнение вида [4]

$$J_0 \ddot{\psi} + s\dot{\psi} = L(t), \quad (19)$$

где $s = -\frac{dM_{Ds}}{d\varphi(\omega_0)}$ – крутизна статической характеристики двигателя.

Причиной неравномерности вращения ротора двигателя в установившемся режиме является внутренняя виброактивность механической системы, обусловленная явной зависимостью приведенного момента инерции и приведенного момента сил сопротивления от входного параметра φ . Такое явление характерно рычажным кривошипным пресс-автоматам. Кроме того, в кривошипном пресс-автомате возникают скачки возмущающего момента, вызванные ударными процессами.

Задача 4. На примере кривошипного пресс-автомата необходимо построить характеристику возмущающего момента $L(t)$, решить уравнение (19), которое позволяет построить решения $\psi(t)$ и $\dot{\psi}(t)$ – динамических ошибок по координате и скорости.

Определение момента инерции маховика. Известно [4,15], что уменьшение неравномерности вращения, или динамических ошибок при установившемся режиме машины, возможно путем увеличения постоянной составляющей приведенного момента инерции за счет дополнительной массы (маховика), присоединенной к ротору двигателя или на входном валу рабочего механизма.

Это видно из решения уравнения (19), полученного в работе [15], которую можно записать применительно к нашему механизму

$$\psi = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{L_l \cos(lvt + \alpha_l + \delta_l)}{lv \sqrt{J_0^2 l^2 v^2 + (s + \vartheta)^2}}; \quad \dot{\psi} = -\sum_{l=1}^{\infty} \frac{L_l \sin(lvt + \alpha_l + \delta_l)}{\sqrt{J_0^2 l^2 v^2 + (s + \vartheta)^2}}, \quad (20)$$

где $\alpha_l = \frac{L_l}{lv \sqrt{J_0^2 l^2 v^2 + (s + \vartheta)^2}}$ – амплитуда l -ой гармоники решения уравнения (19); $\delta_l = \tan^{-1} \frac{s + \vartheta}{J_0 lv} + \pi$ – начальная фаза решения; возмущающая сила $L(t)$ разложена в ряд Фурье $L(t) = \sum_{l=1}^{\infty} L_l \cos(lvt + \alpha_l)$.

Постоянная часть J_0 приведенного момента инерции $J_{пр}(\varphi)$ (3) находится в знаменателе уравнения (20), видно, что увеличение J_0 приводит к уменьшению динамических ошибок (20).

Теперь обратим внимание на особенности нашего механизма. В рассматриваемом механизме базисное звено совершает поступательное движение и момент инерции этого звена относительно неподвижного центра O равен:

$$J_{2,0} = m_2(y_{s_2}'^2 + x_{s_2}'^2), \quad (21)$$

где учетом (5) для равностороннего треугольника $(y_{s_2}'^2 + x_{s_2}'^2) = r^2 + \frac{4a^2}{9} - \frac{4}{3}ar \sin \varphi$. Если форму базисного звена выбрать так, чтобы центр S_2 совпал с шарниром A и будет $a = 0$ (смещение), то момент инерции (21) будет постоянным (рисунок 3).

Тогда постоянная часть J_0 приведенного момента инерции $J_{пр}(\varphi)$ (3) будет увеличена на $J_{2,0}$, т.е.

$$J_{пр}(\varphi) = i_{пм}^2 J_D + J_1 + J_{2,0} + 2m_3(y_{s_3}'^2 + x_{s_3}'^2) + 2J_3\psi'^2 + m_5 S_5'^2 = J_0 + \tilde{J}_{пр}(\varphi), \quad (22)$$

где $J_0 = i_{\text{пм}}^2 J_D + J_1 + J_{2,0} = \text{const.}$

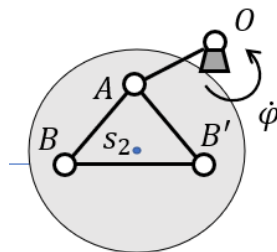


Рисунок 2. К расчету момента инерции маховика

Это значит, что не будет необходимости установки отдельного маховика на оси вращения ротора или кривошипа рабочего механизма, по крайней мере, массу маховика можно намного уменьшить за счет массы базисного звена. Теперь определим массу m_2 звена 2, который будет играть роль и определять значения массы маховика.

Первый способ. В работах [4,15] получено условие, что каждая из амплитуд $M_{\text{пл}}$, момент силы, возникающий в передаточном механизме, гармоник $\tilde{M}_{\text{п}}$ меньше амплитуды соответствующей гармоник L_l в $\tilde{L}$, поскольку $\vartheta > 0$

$$\left(\frac{M_{\text{пл}}}{L_l}\right)^2 = \frac{s^2 + J_D^2 l^2 v^2}{(s + \vartheta)^2 + J_0^2 l^2 v^2} < 1, \quad (23)$$

в силу того, что $s + \vartheta > s$ и $J_0 > J_D$.

В нашем случае $J_0 = i_{\text{пм}}^2 J_D + J_1 + J_{2,0} = J_{01} + J_{2,0}$, подставляя это в уравнение (23), получим

$$\left(\frac{M_{\text{пл}}}{L_l}\right)^2 = \frac{s^2 + J_D^2 l^2 v^2}{(s + \vartheta)^2 + (J_{01} + J_{2,0})^2 l^2 v^2}, \quad (24)$$

Найдем значение $J_{2,0}$, при котором достигается минимум функции (24). Приравняв к нулю производную с правой части уравнения (24) по $J_{2,0}$ получаем, что минимум достигается при

$$\frac{2(s^2 + J_D^2 l^2 v^2) l^2 v^2 (J_{01} + J_{2,0})}{[(s + \vartheta)^2 + (J_{01} + J_{2,0})^2 l^2 v^2]^2} = 0. \quad (25)$$

Отсюда имеет место $m_2 = -(i_{\text{пм}}^2 J_D + J_1)/r^2$. Знак «-» означает, что m_2 должен играть роль противовеса на кривошипе рабочего механизма.

Второй способ. Чтобы уменьшить динамические ошибки и динамические нагрузки при установившемся движении кривошипной машины, найдем значения дополнительной массы (момент инерции маховика), которая устанавливается на входном валу передаточного механизма на стороне двигателя. Тогда моменты инерции J_0 и J_D приобретают значения $J_0^* = J_{M0} + J_{Mx}$ и $J_D^* = J_D + J_{Mx}$, где $J_{M0} = J_1 + J_{2,0}$, поставив эти

значения (24) получим [4,15]

$$\left(\frac{M_{pl}}{L_l}\right)^2 = \frac{s^2 + (J_D + J_{Mx})^2 l^2 v^2}{(s + \vartheta)^2 + (J_{M0} + J_{Mx})^2 l^2 v^2}, \quad (26)$$

Из условия минимума (26) по J_{Mx} позволяет получить решение относительно момента инерции маховика [4,15]

$$J_{Mx} = -J_D + \frac{1}{2\omega^2 J_{M0}} \left[-(2s\vartheta + \vartheta^2 + J_{M0}^2 \omega^2) + \sqrt{(2s\vartheta + \vartheta^2 + \omega^2 J_{M0}^2)^2 + 4\omega^2 s^2 J_{M0}^2} \right], \quad (27)$$

где $\omega^2 = l^2 v^2$.

Если крутизна среднего момента сил сопротивления $\vartheta = 0$, то это выражение упрощается

$$J_{Mx} = -J_D - \frac{J_{M0}}{2} + \sqrt{\frac{J_{M0}^2}{4} + \frac{s^2}{\omega^2}}. \quad (28)$$

б) установившееся движение, связанное с изменением нагрузки. Чтобы обеспечить постоянство (стабилизацию) угловой скорости $\omega = \omega_0 = const$ необходимо изменять управление $u = u_{зд}(\omega)$, как это имеет место в асинхронных сервоприводах. В этом случае момент нагрузки на двигателе изменяется по времени и уравнение отличается от статической характеристики наличием в левой части слагаемого $\tau \dot{M}_D$ и может быть представлено в виде (12).

В этом случае уравнение динамики кривошипного пресс-автомата записывается в виде

$$J_0 \ddot{\varphi} - i_{пм} M_{Ds} \left(u, \frac{\dot{\varphi}}{i_{пм}} \right) - M_{C0}(\dot{\varphi}) = -\tilde{J}_{пр}(\varphi) \ddot{\varphi} - \frac{1}{2} \tilde{J}'_{пр}(\varphi) \dot{\varphi}^2 + \tilde{M}_C(\varphi, \dot{\varphi}), \quad (29)$$

$$\tau \dot{M}_D + M_D - M_{Ds} \left(u, \frac{\dot{\varphi}}{i_{пм}} \right) = 0, \quad u = u_{зд}(\omega). \quad (30)$$

При отсутствии возмущений, характеризующих членами, стоящими в правой части уравнения (16), рассматриваемая система имела бы стационарное решение вида

$$\varphi = \omega_0 t, \quad M_D = M_0 = const \quad (31)$$

Если возмущение остается близким к режиму равномерного вращения $|\psi|_{max} \ll \omega_0$, а движущий момент мало отличается от постоянного, тогда для решения системы (29) и (30) можно также применить метод последовательных приближений [4,15]. Нулевое приближение, как в предыдущем случае, используется для определения средней скорости ω_0 . Поставив значения переменных нулевого приближения в правую часть уравнения (29), получим систему уравнений для определения в первом приближении $\varphi = \varphi(t)$ и $M_D = M_D(t)$:

$$J_0 \ddot{\varphi}^{(1)} - i_{пм} M_{Ds} \left(u_0, \frac{\dot{\varphi}^{(1)}}{i_{пм}} \right) - M_{C0}(\dot{\varphi}^{(1)}) = L(t), \quad (32)$$

$$\dot{M}_D^{(1)} + M_D^{(1)} - M_{Ds} \left(u_0, \frac{\dot{\varphi}^{(1)}}{i_{\text{пм}}} \right) = 0, \quad u_0 = u_{\text{зд}}(\omega_0)$$

где $L(t) = -\frac{1}{2}\tilde{J}'_{\text{пр}}(\omega_0 t)(\omega_0)^2 + \tilde{M}_c(\omega_0 t, \omega_0)$ – возмущающий момент [6].

Если ввести новую переменную $\varphi^{(1)} - \omega_0 t = \psi(t)$ и $M_D^{(1)} - M_0 = \mu(t)$ с учетом $\dot{\psi} = \dot{\varphi}^{(1)} - \omega_0$ и $\ddot{\psi} = \ddot{\varphi}^{(1)}$ на основании (32), получатся дифференциальные уравнения вида [4,15]

$$J_0 \ddot{\psi} + \vartheta \dot{\psi} - \mu = L(t),$$

$$\tau \dot{\mu} + \mu + s\psi = 0, \quad (33)$$

где $s = -\frac{dM_{Ds}}{d\varphi(\omega_0)}$ – крутизна статической характеристики двигателя;

$\vartheta = -\frac{dM_{c0}}{d\varphi(\omega_0)}$ – крутизна среднего момента сил сопротивления.

Систему (33) путем преобразования [4,15] можно записать как одно дифференциальное уравнение третьего порядка относительно $\psi(t)$

$$\tau J_0 \ddot{\psi} + (J_0 + \tau \vartheta) \dot{\psi} + (\vartheta + s)\psi = \tau \dot{L}(t) + L(t). \quad (34)$$

Полагая, что в реальных машинах имеет место $\tau \vartheta \ll J_0$, уравнение (34) можно упростить в виде

$$\tau_m \tau \ddot{\psi} + \tau_m \dot{\psi} + \psi = \frac{1}{(\vartheta + s)} [\tau \dot{L}(t) + L(t)], \quad (35)$$

где $\tau_m = \frac{J_0}{(\vartheta + s)}$ [с] – механическая постоянная времени машины.

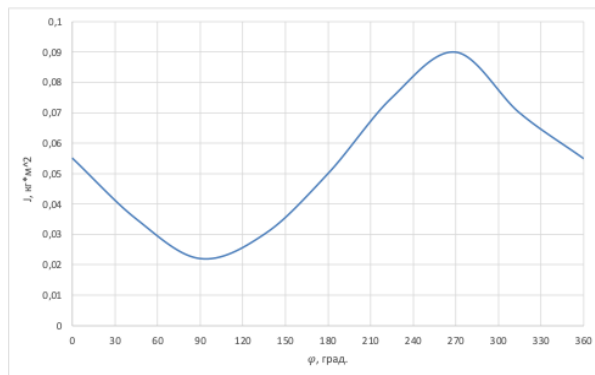


Рисунок 3. График зависимости момента инерции базисного звена механизма $J_{2,0}$ от угла поворота кривошипа

На примере кривошипного пресс-автомата путем замены переменных преобразовать уравнение (34) или (35) в систему дифференциальных уравнений первого порядка и решить численными методами. В работе [15] уравнение (35) решено аналитически с помощью разложения возмущающей силы $L(t)$ и решение $\psi(t)$ в ряды Фурье. Эти решения являются полезными для оценки динамических ошибок по угловому положению и

скорости, анализа амплитудной характеристики ряда Фурье, описывающего колебательный процесс около установившегося режима машины. Также оценки полученных решений на основе численного моделирования. На рисунке 3 представлен график зависимости момента инерции базисного звена механизма $J_{2,0}$ от угла поворота кривошипа φ для случая, когда центр масс базисного звена смещён (при $a \neq 0$). Видно, что момент инерции изменяется периодически, что создаёт вибрационные колебания в системе. Это подтверждает, что в конструкции необходимо минимизировать смещение, чтобы исключить эти флуктуации.

Результаты и Обсуждение

В результате проведенного исследования была разработана аналитическая методика динамического проектирования кривошипного пресс-автомата, основанная на модели шестизвенного механизма Стефенсона. Основное внимание уделено определению коэффициента неравномерности вращения, расчету возмущающего момента, скорости установившегося режима и момента инерции маховика. Разработанная модель позволяет учитывать колебательные характеристики привода и влияние конструктивных особенностей механизма на устойчивость его работы.

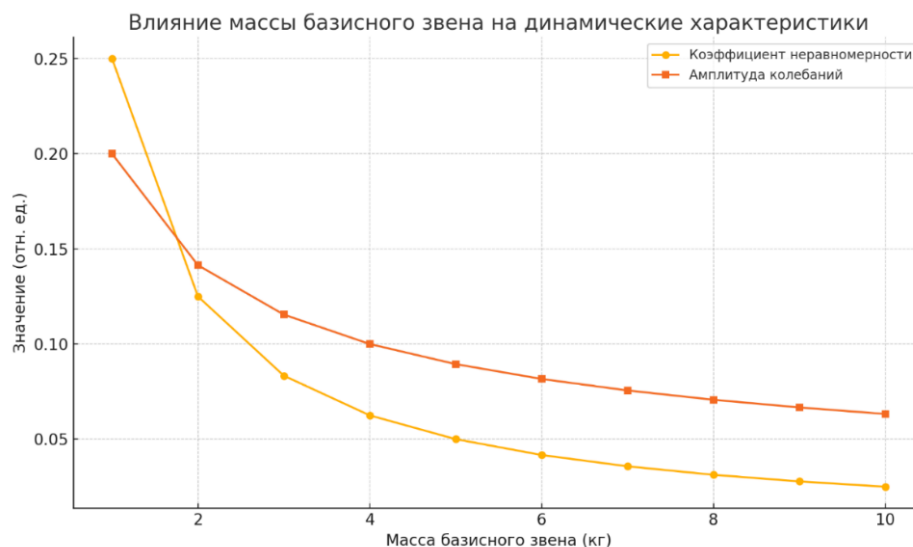


Рисунок 4. Влияние массы базисного звена на динамические характеристики

Одним из ключевых результатов стало выявление зависимости динамических погрешностей от массы и формы базисного звена. Было показано, что базисное звено, обладающее определенной геометрией и массой, может эффективно выполнять функцию встроенного противовеса, существенно снижая амплитуду колебаний и неравномерность вращения. Это подтверждено как аналитически, так и численно, включая расчет по методу последовательных приближений и разложению в ряды Фурье. Результаты сопоставлены с выводами других авторов, в том числе работами Jomartov et al. (2020, 2021), где рассматривалась структура и кинематика механизма Стефенсона II. В отличие от указанных исследований, данная работа впервые акцентирует внимание на интеграции массы базисного звена в общий инерционный баланс системы, снижая требования к

применению массивного маховика. Таким образом, предложенная методика демонстрирует существенное преимущество в аспекте предварительного динамического проектирования. Полученные аналитические выражения, в частности, формулы (25), (27) и (28), могут быть использованы конструкторами и инженерами для оптимизации конструкции привода пресс-автоматов. Метод позволяет формализованно определить оптимальные параметры маховика и базисного звена с учётом колебательной динамики. Внедрение предложенного подхода может повысить надёжность и точность работы кривошипных машин, особенно в условиях переменной нагрузки и высокой цикличности.

Заключение

В данной работе представлена аналитическая методика динамического проектирования кривошипного пресс-автомата, основанного на шестизвенном механизме Стефенсона. Проведён комплексный анализ влияния конструкции механизма на его динамические характеристики с акцентом на неравномерность вращения, амплитуду колебаний и момент инерции маховика. Ключевым результатом исследования стало доказательство того, что масса и форма базисного звена могут быть использованы в качестве встроенного противовеса, эффективно уменьшая колебательные процессы и снижая требования к дополнительным инерционным элементам. Применение разработанной методики позволяет проводить предварительный расчет критически важных параметров механизма и привода на ранней стадии проектирования. Разработанные уравнения и алгоритмы, включая метод последовательных приближений и разложение функций в ряды Фурье, обеспечивают точность оценок и универсальность применения. Представленные графики и численные результаты подтверждают высокую эффективность предложенного подхода и его практическую значимость для создания энергоэффективных и надёжных пресс-автоматов нового поколения.

Благодарность, конфликт интересов

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования МНВО РК AP23490285.

Вклад авторов

Тулешов А.К. – разработка концепции исследования, построение математической модели, формализация аналитических выражений, постановка задач и руководство проектом.

Куатова М.Ж. – аналитическая обработка результатов, реализация численных методов, оформление графического материала и участие в интерпретации полученных данных.

Хабиев А. – участие в анализе литературы, сравнение с предыдущими исследованиями, подготовка текста аннотации и обсуждения результатов. **Меркибаева Б.** – структурирование статьи, оформление таблиц и библиографического списка, участие в редактировании и корректуре окончательного варианта рукописи.

Список литературы

1. Ю. А. Бочаров, Кузнечно-штамповочное оборудование (Академия, Москва, 2008), 384 с.-книга

2. А. Жомартов, А. Тулешов, Н. Жамалов, М. Куатова, А. Каимов, Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev. 10, 501 (2020), <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr202053>.-статья
3. А. Жомартов, Р. Халиджиоглу, М. Куатова, Proc. Inst. Mech. Eng. B: J. Eng. Manuf. 236, 1113 (2021), <https://doi.org/10.1177/09544054211062976>.- статья
4. И. И. Вульфсон, М. Л. Ерихов, М. З. Коловский, Э. Е. Пейсах, Механика машин, под ред. Г. А. Смирнова (Высшая школа, Москва, 1996), 542 с.-книга
5. И. И. Вульфсон, М. З. Коловский, Нелинейные задачи динамики машин (Машиностроение, Ленинград, 1968), 300 с.-книга
6. И. И. Вульфсон, Динамика цикловых машин (Политехника, Санкт-Петербург, 2013), 464 с.-книга
7. М. З. Колосковский, А. Н. Евграфов, Ю. А. Семёнов, А. В. Слоущ, Теория механизмов и машин (Академия, Москва, 2006), 352 с.- статья
8. Н. И. Левитский, Колебания в механизмах (Наука, Москва, 1988), 296 с.- статья
9. А. Приходько, Actuators 10, 174 (2021), <https://doi.org/10.3390/act10080174>.- статья
10. М. Т. Орваньнос-Герреро, М. Асеведо, К. Н. Санчес и др., Mathematics 10, 1830 (2022), <https://doi.org/10.3390/math10111830>.- статья
11. А. Жомартов, А. Тулешов, М. Куатова, J. Math. Mech. Comput. Sci. 2(102), 22 (2019).- статья
12. А. К. Тулешов, Ю. М. Дракунов, Е. А. Тулешов, World Engineering Congress (Кучинг, Малайзия, 2010), с. 92.- статья
13. М. Куатова, А. Жомартов, Б. Меркибаева, Е. Тулешов, в Advances in Asian Mechanism and Machine Science, ред. А. Тулешов, А. Жомартов, М. Чеккарелли (Springer, 2024), т. 167, https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_56.- статья
14. А. К. Тулешов, Ю. М. Дракунов, А. А. Молдыбаева, Вестн. КазНУ 1(48), 61 (2006).- статья
15. Ю. М. Дракунов, Е. А. Тулешов, Материалы Междунар. конф. «Актуальные проблемы механики и машиностроения» (КазНТУ, Алматы, 2009), с. 132.- труды конференции
16. М. М. Молдабеков, А. К. Тулешов, Г. У. Уалиев, Математическое моделирование динамики механизмов и машин (Алматы, 1998), 184 с.- статья

А.К. Тулешов¹, М.Ж. Куатова^{*1,2}, А.Т. Хабиев¹, Б. Меркибаева¹

¹ У.А. Джолдасбеков атындағы механика және машинатану институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

² Халықаралық инженерлі-технологиялық университеті
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

Алты буынды механизм негізіндегі қосиінді баспақтың динамикалық сипаттамаларын және маховигін есептеудің аналитикалық тәсілі

Аңдатпа. Мақалада қазіргі сервопрестерде кеңінен қолданылатын Стефенсонның алты буынды механизмі негізіндегі гибриді қосиінді баспақтың динамикалық жобалау әдістемесі қарастырылады. Қозғалыстың біркелкі еместік коэффициенті, қоздырушы моменттің сипаттамалары, сондай-ақ маховиктің инерциялық моменті мен орныққан қозғалыс режимінің орташа жылдамдығын анықтау әдістемесі егжей-тегжейлі талданған. Негізгі буынның массасы мен пішінінің жүйенің динамикалық мінез-құлқына әсері ерекше

назарға алынған. Бұл параметрлерді дұрыс таңдаған жағдайда, негізгі буын кіріктірілген қарсы салмақтың рөлін атқара алатыны көрсетілген, бұл айнарудың біркелкі еместігін және механизмнің динамикалық қателіктерін едәуір азайтуға мүмкіндік береді. Өз кезегінде маховик массасына қойылатын талаптарды төмендетуге жол ашады, ал бұл энергия үнемдейтін машиналарды жобалауда аса маңызды. Жұмыста аналитикалық тәсіл, математикалық модельдеу және сандық талдау әдістері қолданылған. Қозғалыс теңдеулерін шешудің алгоритмдері әзірленіп, динамикалық қателіктерге баға берілген. Алынған формулалар мен сандық нәтижелер ұсынылған әдістеменің тиімділігін дәлелдейді және оның практикалық қолданбалығын көрсетеді. Бұл әдіс прерстерді алдын ала жобалау кезінде энергетикалық және вибродинамикалық сипаттамаларды ескере отырып, жобалаудың бастапқы кезеңдерінде өте пайдалы. Жұмыстың нәтижелері штамптау жабдықтарына арналған зияткерлік жетекті жүйелерді жасау кезінде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: қосиінді баспақ, алты буынды механизм, маховик, виброактивтілік, динамикалық қате, сандық модельдеу.

**A.K. Tuleshov¹, M.Zh. Kuvatova^{*1,2}, A.T. Khabiev¹,
B. Merkibayeva¹**

¹Institute of mechanics and engineering named after academician U.A. Dzholdasbekov, Republic of Kazakhstan, Almaty c.

²International Engineering and Technology University, Republic of Kazakhstan, Almaty c.

Analytical Approach to Calculating the Dynamic Characteristics and Flywheel of a Six-Link Crank Press Mechanism

Abstract. The paper presents a methodology for the dynamic design of a hybrid crank press based on the Stephenson six-link mechanism, which is widely used in modern servo presses. A detailed analysis is carried out on the motion nonuniformity coefficient, the characteristics of the disturbing torque, as well as the procedure for determining the flywheel's moment of inertia and the average velocity under steady-state conditions. Special attention is given to studying the influence of the mass and geometry of the base link on the system's dynamic behavior. It is shown that, with a proper selection of these parameters, the base link can act as a built-in counterweight, significantly reducing rotational nonuniformity and dynamic errors of the mechanism. This, in turn, allows for a reduction in the required flywheel mass, which is especially important when designing energy-efficient machines. The study employs an analytical approach incorporating mathematical modeling and numerical analysis techniques. Algorithms for solving the system's differential equations of motion are developed, and dynamic errors are evaluated. The derived formulas and numerical results confirm the effectiveness of the proposed methodology and demonstrate its practical applicability. The method is particularly useful for the preliminary design of presses, enabling consideration of energy and vibration-dynamic characteristics at early design stages. The results can be utilized in the development of intelligent drive systems for stamping equipment.

Keywords: crank press, six-link mechanism, flywheel, vibration activity, dynamic error, numerical modeling

References

1. Bocharov Yu.A. Kuznechno-shtampovochnoye oborudovaniye [Forging and stamping equipment]. – Moscow: Akademiya, 2008. – 384 p. [in Russian]
2. Jomartov A., Tuleshov A., Jamalov N., Kuatova M., Kaimov A. Designing of the Stephenson II six-link linkage actuator for servo mechanical press // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2020. – Vol. 10. – P. 501–512. – <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr202053>.
3. Jomartov A., Halicioglu R., Kuatova M. Kinetostatic analysis, manufacturing, and experimental application of a press machine based on Stephenson II mechanism // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2021. – Vol. 236(8). – P. 1113–1124. – <https://doi.org/10.1177/09544054211062976>.
4. Vul'fson I.I., Erikhov M.L., Kolovskiy M.Z., Peysakh E.E. Mekhanika mashin [Machine mechanics] / Ed. Smirnov G.A. – Moscow: Vysshaya shkola, 1996. – 542 p. [in Russian]
5. Vul'fson I.I., Kolovskiy M.Z. Nelineynnye zadachi dinamiki mashin [Nonlinear problems of machine dynamics]. – Leningrad: Mashinostroyeniye, 1968. – 300 p. [in Russian]
6. Vul'fson I.I. Dinamika tsiklovyykh mashin [Dynamics of cyclic machines]. – Saint Petersburg: Politehnika, 2013. – 464 p. [in Russian]
7. Koloskovskiy M.Z., Yevgrafov A.N., Semyonov Yu.A., Sloushch A.V. Teoriya mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. – Moscow: Akademiya, 2006. – 352 p. [in Russian]
8. Levitskiy N.I. Kolebaniya v mekhanizmax [Oscillations in mechanisms]. – Moscow: Nauka, 1988. – 296 p. [in Russian]
9. Prikhodko A. Dynamic Analysis of Intermittent-Motion Conveyor Actuator // Actuators. – 2021. – Vol. 10(8). – Article 174. – <https://doi.org/10.3390/act10080174>.
10. Orvañanos-Guerrero M.T., Acevedo M., Sánchez C.N., et al. Complete Balancing of the Six-Bar Mechanism Using Fully Cartesian Coordinates and Multiobjective Differential Evolution Optimization // Mathematics. – 2022. – Vol. 10. – Article 1830. – <https://doi.org/10.3390/math10111830>.
11. Jomartov A., Tuleshov A., Kuatova M. Simulation of the crank press dynamics by SimulationX software // Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science. – 2019. – No. 2(102). – P. 22–33.
12. Tuleshov A.K., Drakunov Yu.M., Tuleshov E.A. Computer dynamics of the internal-combustion engine considering elastic properties of links // World Engineering Congress. – 2010. – P. 92–96. – Kuching, Malaysia.
13. Kuatova M., Jomartov A., Merkiybayeva B., Tuleshov Y. Experimental Study of a Crank Press Based on a Stephenson II Six-Bar Linkage Mechanism // In: Tuleshov A., Jomartov A., Ceccarelli M. (eds) Advances in Asian Mechanism and Machine Science. – Springer, 2024. – Vol. 167. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_56.
14. Tuleshov A.K., Drakunov Yu.M., Moldybaeva A.A. Zadacha dinamiki rykhazhnykh mekhanizmov s uchetom uprugikh svoystv zven'ev [Dynamic problem of lever mechanisms considering the elastic properties of links] // Vestnik KazNU. – 2006. – No. 1(48). – P. 61. [in Russian]
15. Drakunov Yu.M., Tuleshov E.A. Dialogovaya sistema vyvoda i analiza uravneniy dinamiki mekhanizma press-avtomata [Dialogue system for deriving and analyzing the dynamic

- equations of a press mechanism] // Proc. of the Int. Conf. 'Actual Problems of Mechanics and Mechanical Engineering'. – Almaty: KazNTU, 2009. – P. 132–137. [in Russian]
16. Moldabekov M.M., Tuleshov A.K., Ualiev G.U. Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki mekhanizmov i mashin [Mathematical modeling of mechanisms and machines dynamics]. – Almaty, 1998. – 184 p. [in Russian]

Сведения об авторах

Тулешов Амандык Куатович - доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У.А.Джолдасбекова, ул. Шевченко, 28, город Алматы, Казахстан, 050010, aman_58@mail.ru;

Куатова Молдир Жангелдиевна - автор для корреспонденции, PhD, ведущий научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У.А.Джолдасбекова, ул. Шевченко, 28, город Алматы, Казахстан, 050010, e-mail: kuatova.moldyr@gmail.com;

Хабиев Алибек Талгатович - PhD, ведущий научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У.А.Джолдасбекова, ул. Шевченко, 28, город Алматы, Казахстан, 050010;

Меркибаева Бахыт Меркибаевна - научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У.А.Джолдасбекова, ул. Шевченко, 28, город Алматы, Казахстан, 050010;

Амандық Түлешов Қуатович – техника ғылымдарының докторы, профессор, академик У.А.Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институтының бас ғылыми қызметкері, Шевченко көшесі 28, Алматы қаласы, Қазақстан, 050010, aman_58@mail.ru
Қуатова Мөлдiр Жангелдиевна – хат алмасуға жауапты автор, PhD, академик У.А.Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институтының жетекші ғылыми қызметкері, Шевченко көшесі 28, Алматы қаласы, Қазақстан, 050010, e-mail: kuatova.moldyr@gmail.com;

Хабиев Алібек Талғатұлы – PhD, академик У.А.Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институтының жетекші ғылыми қызметкері, Шевченко көшесі 28, Алматы қаласы, Қазақстан, 050010;

Меркібаева Бақыт Меркібайқызы – академик У.А.Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институтының ғылыми қызметкері, Шевченко көшесі 28, Алматы қаласы, Қазақстан, 050010;

Amandyk Tuleshov Kuatovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher at the Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician U.A. Zholdasbekov, 28 Shevchenko Street, Almaty, Kazakhstan, 050010, aman_58@mail.ru;
Kuatova Moldir Zhangeldievna – Corresponding author, PhD, Leading Researcher at the Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician U.A. Zholdasbekov, 28 Shevchenko Street, Almaty, Kazakhstan, 050010, e-mail: kuatova.moldyr@gmail.com;
Khabiev Alibek Talgatovich – PhD, Leading Researcher at the Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician U.A. Zholdasbekov, 28 Shevchenko Street, Almaty, Kazakhstan, 050010;

Merkibayeva Bakhyt Merkibayevna – Researcher at the Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician U.A. Zholdasbekov, 28 Shevchenko Street, Almaty, Kazakhstan, 050010;



Copyright: © 2025 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>)



IRSTI 86.23.1

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-201-214>

Enhancing Construction Site Safety Using Computer Vision and Drones

A.R. Omarov * , A. Zh. Zhussupbekov  ¹, O. D. Bibalaev  ²,
D. M. Mikhailov  ³, G. K. Tanyrbergenova  ⁴, Ankit Garg  ⁵

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan

³Korkyt Ata Kyzylorda State University, Kyzylorda, Kazakhstan

⁴«Construction Management System» LLP

⁵Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, China

E mail: esentemir87@gmail.com

Abstract. Despite established requirements for the use of personal protective equipment (PPE), such as helmets and goggles, traditional methods of control at construction sites often fail to ensure the proper level of compliance with safety standards, resulting in increased injuries. The goal of the project is to develop an integrated system of face control, automatic verification of the presence of PPE, and alcohol level monitoring using computer vision technologies, machine learning, and drones. The system will perform face recognition, control the presence of helmets and glasses, as well as identify unsafe behavior and signs of alcohol intoxication, providing continuous monitoring of workers. It is expected that this will significantly improve the level of safety, reduce the number of accidents, and increase labor productivity. The development will be adaptable for various industries - from construction to mining and oil and gas. The project has high practical and socio-economic significance, contributes to the development of the scientific and technical potential of Kazakhstan, the creation of new jobs in the field of IT and automation, as well as strengthens the interaction between science and production.

Keywords: Drone, AI, alcohol test, QR code, PPE

Introduction

The relevance of this article is driven by the urgent need to enhance safety at construction sites, where non-compliance with occupational health and safety regulations remains one of the main causes of injuries and fatalities. The prerequisites for developing an integrated safety monitoring system are based on an analysis of existing technologies and scientific research confirming the effectiveness of computer vision and artificial intelligence. Preliminary results show that the use of such technologies significantly improves the efficiency of safety compliance monitoring and enables continuous worker condition tracking.

Previous studies have revealed shortcomings in existing systems, including a low level of automation, a lack of real-time monitoring, and fragmentation of solutions. The scientific novelty of this article lies in its comprehensive approach to occupational safety, integrating facial recognition, automatic verification of personal protective equipment (PPE), and real-time worker condition monitoring, including alcohol detection. International studies [5–10] confirm the effectiveness of such solutions; however, the example of Kazakhstan reveals specific challenges that require customized developments. National research [11–12] highlights the absence of comprehensive safety solutions in the construction sector. This article aims to fill that gap and proposes a system that could reduce the number of accidents by 30% within the first six months of implementation.

The project addresses modern scientific and technological needs related to the creation of a safe working environment. The high injury rate on construction sites, confirmed by statistical data, generates significant social and economic demand for innovative safety management systems. Moreover, the project's implementation is expected to reduce costs associated with treatment, insurance, and compensation while simultaneously improving labor productivity. At the national level, the project aligns with occupational safety program priorities, and at the international level, it has the potential for scaling and adaptation. Thus, the project is of strategic importance and can contribute to the development of new safety standards, increase the competitiveness of the construction industry, and improve the quality of life for workers.

The scientific novelty of the project lies in the integration of modern monitoring technologies and risk analysis at construction sites through the use of computer vision and artificial intelligence algorithms for automatic compliance control with safety standards. The unique approach to solving the injury problem involves creating a system capable of detecting violations related to PPE use and potential hazards in real time. The significance of the project lies in its potential to significantly reduce accident rates, which is critical for improving overall workplace safety. The study's outcomes can enhance safety management methods and introduce innovative solutions into Kazakhstan's construction sector, aligning with modern occupational safety requirements and contributing to the country's economic development.

The methodology

1) The prerequisites for the development of the project are based on the analysis of existing technologies and scientific research confirming the need for the integration of safety monitoring systems at construction sites. In particular, preliminary results show that the use of computer vision can significantly improve the efficiency of monitoring compliance with safety standards, reducing the number of accidents. Previous studies in the field of occupational safety have identified the shortcomings of current systems, such as a low degree of automation and the lack of real-time monitoring. In addition, the development of prototype systems using machine learning

algorithms has shown promising results, which creates the basis for the creation of an integrated system aimed at preventing injuries and improving working conditions. Existing developments in the field of patenting technologies and publishing scientific articles also confirm the readiness to implement this project, contributing to its scientific and practical significance.

2) The rationale for the scientific novelty of the project is related to current research in the field of occupational safety, especially at construction sites, where a high risk of injury requires the implementation of modern technologies. In international practice, studies by [13-14] have shown that the use of computer vision technologies can significantly reduce the number of accidents caused by non-compliance with safety rules. Similarly, the work of [15] highlights the effectiveness of facial recognition technologies in improving safety in various industries, including construction. However, despite significant advances, existing systems often do not provide a comprehensive approach and do not take into account the specific conditions of individual countries, such as Kazakhstan. At the level of Kazakhstan, studies conducted by [16] revealed serious deficiencies in the safety system at construction sites, indicating the need for stricter control measures. Also, the work of [17] confirms the need to integrate new technologies, such as breathalyzers and worker health monitoring systems. However, there are no developments that would combine face control, alcohol testing, and monitoring of compliance with personal protective equipment (PPE). This project aims to eliminate these shortcomings by developing an integrated system that uses computer vision and artificial intelligence to automatically monitor compliance with safety standards. The system is expected to improve the efficiency of monitoring the use of PPE and reduce the number of accidents on construction sites by 30% during the first six months of operation. Unlike existing analogues, our project offers a comprehensive approach that takes into account the unique working conditions in Kazakhstan and is focused on injury prevention.

3) Scientific and technological needs, justifying the importance of the project results, include the need to improve the level of occupational safety at construction sites, where the risk of injury remains high (see Figure 1). Existing statistics indicate that in Kazakhstan and worldwide, accidents at construction sites are one of the main causes of death and serious injury among workers. This creates an urgent social demand for the introduction of innovative technologies aimed at preventing these incidents.

Economic and industrial interest is also emphasized by the fact that the creation of effective monitoring systems can reduce the costs of treating injuries and compensating victims, as well as increase productivity by creating a safer working environment (Figure 1, photo was downloaded from the internet). According to experts, the introduction of modern safety technologies can lead to a decrease in insurance costs and an improvement in the overall efficiency of projects.

At the national level, the project is significant in the context of the implementation of the state program on labor protection and improvement of working conditions. On an international scale, the project results can be adapted for use in other countries with similar problems, which increases its relevance and potential market.

The applicability of the research results goes beyond the narrowly specialized field and covers such areas as economics, industry, and social relations. The development of an integrated monitoring system for compliance with safety standards can serve as a basis for the formation of new safety standards at construction sites, improving the overall state of the industry and promoting the introduction of advanced technologies. Thus, the project not only meets current requirements but also provides an opportunity to scale up the results at the level of both Kazakhstan and the international community, which contributes to the further development of

labor safety technologies.



Figure 1. A helmet saved a worker at a construction site

4) The project will have a significant impact on the level of research and development and scientific and technical potential in the field of occupational safety, stimulating the development of new technologies and methods, which in turn will increase the competitiveness of scientific organizations and their teams. It is expected that the introduction of an integrated system for monitoring compliance with safety standards will create opportunities for the publication of new scientific papers that can be used for further research in this area, thereby contributing to the formation of an expert community and strengthening the position of Kazakhstan in the international arena. The social effect of the project results is a decrease in the number of accidents at construction sites, which will directly improve working conditions and increase the safety of workers. This will contribute to the formation of a safety culture, which is also important for increasing employee satisfaction and reducing staff turnover. The economic effect can be manifested in reduced costs for medical care, insurance, and compensation, as well as increased productivity due to a safer working environment. To achieve the expected effect, conditions are necessary, such as government support in the form of legislative initiatives aimed at strengthening control over compliance with safety standards, as well as active cooperation with industrial partners to test and implement the developed technologies in practice. Additionally, the creation of educational programs and training for workers and safety managers on the use of new technologies will also contribute to the achievement of the set goals and ensure the sustainable development of the labor safety system in the country. This project focuses on integrating computer vision and worker monitoring systems, including hard hats, goggles, and alcohol level checks, to improve safety on construction sites. Unlike existing solutions, which often offer only fragmented approaches to monitoring compliance with safety standards, our project will use machine learning algorithms for real-time detection of unsafe actions, as well as checking for the presence of personal protective equipment (PPE) and alcohol level monitoring. This will not only improve compliance but also reduce the likelihood of accidents. The benefits of the project include higher efficiency and response time compared to traditional methods, as well as the ability to process large amounts of data, which confirms the need for funding. Today, most existing safety technologies on construction sites are either static or require significant costs for implementation and maintenance. The project proposes the development of lightweight and low-power equipment based on NPU (Neural Processing Unit), which will not only reduce implementation costs but also provide a higher degree of automation. Our product will focus on ease of use and accessibility for small and medium-sized enterprises, including automated checks for helmets and goggles, as well

as alcohol monitoring, which is a significant step forward compared to existing solutions. The project differs from previous studies in its broader approach, which includes both monitoring methods and the integrated use of computer vision technologies for helmet and goggle checks, as well as alcohol monitoring, making it more relevant and targeted in the context of the current market situation and social needs.

Main Project Hypotheses:

The flowchart shows three main project hypotheses related to the use of drones, neural processors, and artificial intelligence (AI) to improve safety at construction sites. The top part shows a drone monitoring a construction site, performing face control functions and checking personal protective equipment (PPE), such as helmets and glasses. Next, the processing of drone data using neural processors and AI is shown, which improves the accuracy and speed of detecting violations, such as the absence of PPE or signs of alcohol intoxication. The bottom of the diagram shows a 20-30% reduction in the number of accidents at the construction site due to the implementation of this system, which leads to a safer working environment (Table 1 clearly structures the hypotheses, providing a more visual and convenient perception of the key aspects of the project and expected results).

Table 1. Construction site safety monitoring system

Hypothesis	Description	Expected result
Hypothesis 1	The integration of drones with the face control and PPE monitoring system will increase the level of safety at construction sites by automating processes.	Improving automation and control over compliance with safety regulations on construction sites
Hypothesis 2	The use of neural processors and AI to analyze data from drones will increase the speed and accuracy of detecting violations (lack of PPE, alcohol intoxication).	Fast and accurate detection of violations on construction sites.
Hypothesis 3	The implementation of a system with drones and AI will reduce the number of accidents on construction sites by 20-30% compared to traditional control methods.	Reducing the number of incidents and improving the overall level of safety on construction sites.

The rationale behind the research strategy and approach is to apply a multi-layered approach to validate and optimize an integrated construction site safety system. This strategy includes integrating various technologies such as drones, artificial intelligence (AI), and neural processors, and testing them in real construction site conditions. A combination of descriptive, correlational, and experimental studies will be used to evaluate the effectiveness of the proposed system, allowing for a comprehensive analysis and improvement of the system's functionality.

Descriptive studies include an analysis of existing construction site safety issues, which helps identify key risks and threats to workers.

This stage collects data on typical violations and accidents, which allows for the creation of a comprehensive information base for further analysis. In addition, the state of the technologies used in face control and personal protective equipment (PPE) monitoring systems is assessed, which helps to understand their effectiveness and identify areas for improvement.

The correlation studies will examine the relationship between the use of drones for monitoring and the level of safety on construction sites, which will help to determine how the implementation

of this technology affects overall safety indicators. In addition, the impact of alcohol monitoring on production performance and accident reduction will be assessed, which will help to identify the importance of monitoring the condition of workers in the context of improving safety and efficiency on construction sites.

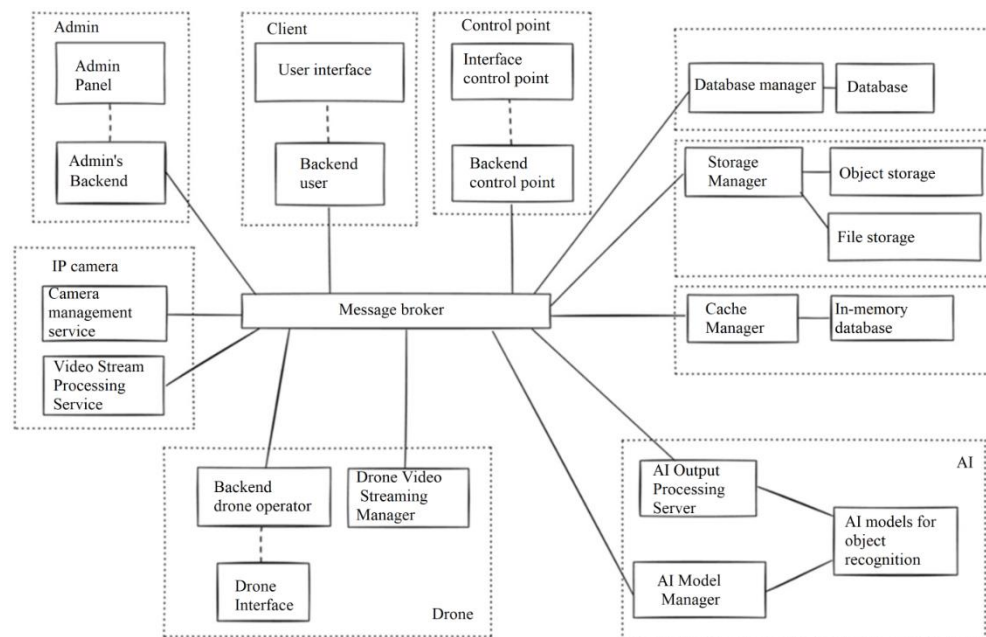


Figure 2. Scheme of data exchange buffer from the construction site to the control point

The pilot studies will include conducting field experiments with the integrated system at various construction sites to evaluate the effectiveness of drones and artificial intelligence (AI) algorithms compared to traditional monitoring methods.

The research will be carried out in several stages: the first stage - descriptive studies aimed at analyzing existing monitoring systems and collecting data on safety violations, which will form the basis for further research; the second stage - the development and integration of technologies, including the implementation of drones and the integration of AI and neural processing units (NPU) for the personal protective equipment (PPE) monitoring and inspection system;

The third stage will involve correlation studies that will focus on examining the data collected from drones and their correlation with safety indicators; the fourth stage will involve experimental studies that will involve field testing of the system and adjustment of algorithms; and the fifth stage will involve evaluation and conclusions that will include analysis of the collected data, testing of hypotheses, and evaluation of the effectiveness of the system in reducing the number of incidents at construction sites.

2) A brief description of the most important experiments includes the following key steps:

- Field monitoring experiment: Conduct field experiments at various construction sites using drones to monitor compliance with safety regulations and the availability of personal protective equipment (PPE). Evaluating their effectiveness in real-world conditions will help identify the main drawbacks and advantages of the system.
- Benchmarking of inspection methods: Evaluate the performance of drones and artificial intelligence (AI) algorithms compared to traditional inspection methods such as visual inspections. This study will determine to what extent the

implementation of new technologies improves the accuracy and speed of violation detection (Figure 2).

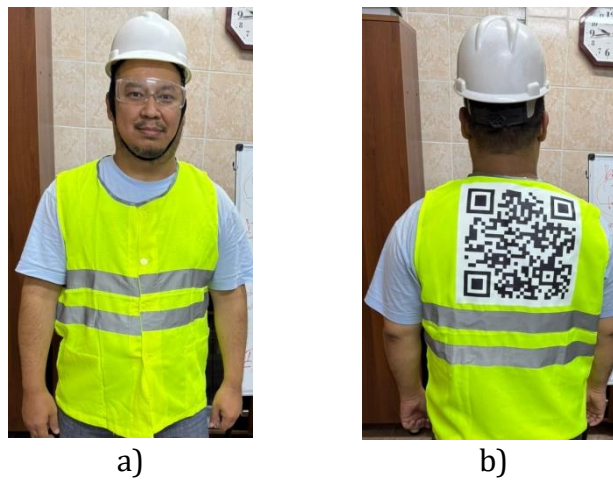


Figure 3. Example of a worker and manager at a construction site: a) Front view; b) rear view with QR code

- Alcohol monitoring: Conduct an experiment to test workers for alcohol using an automated system controlled by drones. Evaluate the impact of this monitoring on reducing accidents and increasing productivity on construction sites.

- Data correlation: Collect and analyze data obtained from the use of drones to identify the relationship between the use of the technology and changes in safety levels and the number of incidents. This will help confirm or refute hypotheses about the impact of technology on safety.

- Feedback and algorithm adjustment: Analyzing the collected data to adjust the algorithms of drones and AI, which will ensure their adaptation to the specific conditions of construction sites and increase the overall efficiency of the system.

3) The project uses several research methods; each aimed at achieving the set goals and objectives. Descriptive studies help to identify existing safety issues at construction sites, collect data on typical violations, and assess the current state of control technologies, which creates a basis for further decisions. Correlation studies allow us to establish the relationship between the use of drones and the level of safety, as well as the impact of alcohol monitoring on production indicators. Experimental studies, including field testing of new technologies, evaluate their effectiveness and help test hypotheses about reducing accidents. Finally, systematic analysis of the collected data helps to adjust the methods and algorithms, ensuring continuous improvement and optimization of the system. All these methods are interconnected and form a holistic approach to improving safety at construction sites through the integration of modern technologies. In order to improve the level of industrial safety and minimize the human factor, it is proposed to introduce a system of personalized QR codes for all employees of the construction site. Each employee will be given a unique QR code, which contains information about their current admission to perform certain types of work on a specific day. For example, by scanning a QR code, it will be possible to determine whether a given employee is allowed to perform (see Figure 3):

- excavation work;

- work at height;
- work with electrical equipment;
- welding or fireworks;
- work in confined spaces, etc.

The information will be synchronized with the production control system and updated depending on the daily medical examination, safety briefings, weather conditions and other factors. This approach will ensure precise control over the distribution of responsibilities, eliminate cases of unauthorized access to hazardous areas and improve the overall safety culture at the facility.

Conclusion

The methods for collecting primary (initial) information in the project will include several key approaches aimed at solving problems and ensuring the reliability and reproducibility of data. Observation and monitoring: Using drones to monitor construction sites will allow the collection of data on compliance with safety regulations, the availability of personal protective equipment (PPE), and the identification of violations in real time. The data will be collected in real-life conditions, which will ensure their relevance and applicability. Questionnaires and surveys: Conducting surveys among workers and managers of construction sites will provide information on the perception of existing safety measures, their shortcomings, and wishes for improvement. This will help collect high-quality data based on user opinions.

Analysis of documentary sources: Collecting and analyzing existing accident reports, inspection protocols, and safety standards at construction sites will create a database for further analysis and comparison with the results obtained. Field experiments: Implementation of field experiments with the introduction of new technologies and methods will allow us to evaluate their effectiveness in real conditions. The data collected during the experiments will serve as the basis for testing hypotheses. Data processing methods include statistical analysis, which will reveal patterns and relationships, as well as the use of machine learning algorithms to analyze large volumes of data collected from drones.

Ensuring the reliability and reproducibility of the data will be achieved through the use of standardized methods for collecting and processing information, as well as checking the results through repeated measurements and data verification using independent sources. This will ensure the reliability and accuracy of the conclusions made during the study. The introduction of a QR code system to determine employee access to specific types of work is an effective tool for improving safety at a construction site.

Such a system allows for daily operational control, reduces the risk of accidents, eliminates the participation of untrained or uncertified workers in hazardous work, and improves discipline and transparency in the distribution of tasks. In the future, this solution may become an integral part of the digital ecosystem for occupational safety management at large production and construction sites.

Funding

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan: AP26198207 - «Integrated security system on construction sites using drones for facial recognition, personal protective equipment inspection, and alcohol level monitoring».

The contribution of the authors

Omarov A.R. - concept, methodology, resources, data collection, testing of experimental samples;

Zhussupbekov A. Zh. - modeling;

Bibalaev O. D. - visualization, interpretation;

Mikhailov D. M. - writing;

Tanyrbergenova G. K. - analysis;

Ankit Garg - editing.

References

1. Jung, D.; Seo, Y.; Shin, S.; Kim, D. Analyzing the relationship between the critical safety management tasks and their effects for preventing construction accidents using IPA method. *Korean J. Constr. Eng. Manag.* 23, pp. 77–86 (2022) - Journal article <https://dx.doi.org/10.6106/KJCEM.2022.23.5.077>
2. Hussain, R.; Pedro, A.; Zaidi, S.F.A.; Abbas, M.S.; Soltani, M.; Park, C. Conceptual Framework for Safety Training for Migrant Construction Workers using Virtual Reality Techniques. "In Digitalization in Construction, Routledge", London, UK, pp. 93–103 (2023) - Proceedings of the conferences
3. Park, C.; Soltani, M.; Pedro, A.; Yang, J.; Lee, D.; Hussain, R. "Transforming Construction Site Safety with iSAFE: An Automated Safety Management Platform", Routledge: London, UK, pp. 213–234 (2023) - Proceedings of the conferences
4. Choi, S.D.; Guo, L.; Kim, J.; Xiong, S. Comparison of fatal occupational injuries in construction industry in the United States, South Korea, and China. *Int. J. Ind. Ergon.*, 71, pp. 64–74. (2019) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.02.011>
5. Xiao, B.; Kang, S.C. Development of an Image Data Set of Construction Machines for Deep Learning Object Detection. *J. Comput. Civ. Eng.*, 35, p. 05020005 (2020) - Journal article [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000945](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000945)
6. Chen, C.; Gu, H.; Lian, S.; Zhao, Y.; Xiao, B. Investigation of Edge Computing in Computer Vision-Based Construction Resource Detection. *Buildings*, 12, p. 2167 (2022) - Journal article <https://doi.org/10.3390/buildings12122167>
7. Suh, S. A Qualitative Study Understanding Unsafe Behaviors of Workers in Construction Sites. *Korean J. Constr. Eng. Manag.*, 24, pp. 91–98 (2023) - Journal article <https://doi.org/10.6106/KJCEM.2023.24.6.091>
8. Hussain, R.; Zaidi, S.F.A.; Pedro, A.; Lee, H.; Park, C. Exploring construction workers' attention and awareness in diverse virtual hazard scenarios to prevent struck-by accidents. *Saf. Sci.* 175, p. 106526 (2024) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106526>
9. Soltani, M.; Pedro, A.; Yang, J.; Zaidi, S.F.A.; Lee, D.; Park, C. Isafeguard: A Proactive Solution for Construction Job Site Safety Monitoring. "In Smart & Sustainable Infrastructure: Building a Greener Tomorrow; Banthia, N., Soleimani-Dashtaki, S., Mindess, S., Eds.; Springer: Cham, Switzerland", pp. 1150–1165 (2024) - Proceedings of the conferences https://doi.org/10.1007/978-3-031-53389-1_101
10. Zeng, L.; Li, R.Y.M. Construction safety and health hazard awareness in Web of Science and Weibo between 1991 and 2021. *Saf. Sci.* 152, p. 105790 (2022) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105790>

11. Wang, J.; Jiang, L.; Yu, H.; Feng, Z.; Castaño-Rosa, R.; Cao, S. Computer vision to advance the sensing and control of built environment towards occupant-centric sustainable development: A critical review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 192, p. 114165 (2024) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114165>
12. Fang, Q.; Li, H.; Luo, X.; Ding, L.; Luo, H.; Rose, T.M.; An, W. Detecting non-hardhat-use by a deep learning method from far-field surveillance videos. *Autom. Constr.* 85, pp. 1–9 (2018) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.018>
13. Fang, Q.; Li, H.; Luo, X.; Ding, L.; Luo, H.; Li, C. Computer vision aided inspection on falling prevention measures for steepjacks in an aerial environment. *Autom. Constr.* 93, pp. 148–164 (2018) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.022>
14. Huang, L.; Fu, Q.; He, M.; Jiang, D.; Hao, Z. Detection algorithm of safety helmet wearing based on deep learning. *Concurr. Comput. Pract. Exp.* 2021, 33, p. 6234 (2021) - Journal article <https://doi.org/10.1002/cpe.6234>
15. Han, K.; Zeng, X. Deep Learning-Based Workers Safety Helmet Wearing Detection on Construction Sites Using Multi-Scale Features. *IEEE Access*, 10, pp. 718–729 (2022) - Journal article <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3138407>
16. Hung, H.; Lan, L.; Hong, H. A Deep Learning-Based Method for Real-Time Personal Protective Equipment Detection. "Le Quy Don Tech. Univ.-Sect. Inf. Commun. Technol. LQDTU-JICT 2019", 199, pp. 23–34 (2019) - Proceedings of the conferences
17. Wu, J.; Cai, N.; Chen, W.; Wang, H.; Wang, G. Automatic detection of hardhats worn by construction personnel: A deep learning approach and benchmark dataset. *Autom. Constr.* 106, p. 102894 (2019) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102894>

**А. Р. Омаров^{*1}, А.Ж. Жусупбеков², О.Д. Бибалаев², Д. М. Михайлов³,
Г. К. Танырбергенова⁴, Анкит Карг⁵**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Е.А.Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан

³Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан

⁴«Construction management system» ЖШС, Астана, Қазақстан

⁵Сиань Цзяотонг - Ливерпуль университеті, Сучжоу, Қытай

Құрылыс саласында еңбек қауіпсіздігін компьютерлік көру және дрондар арқылы арттыру

Аңдатпа. Дулыға және көзілдірік сияқты жеке қорғану құралдарын (ЖҚҚ) пайдалануға белгіленген талаптарға қарамастан, құрылыс алаңдарында бақылаудың дәстүрлі әдістері қауіпсіздік нормаларын тиісті деңгейде сақтауды қамтамасыз етпейді, бұл жарақат алудың өсуіне әкеледі. Жобаның мақсаты – компьютерлік көру технологияларын, машиналық оқытуды және дрондарды пайдалана отырып, тұлғаны бақылаудың интеграцияланған жүйесін, ЖҚҚ бар-жоғын және алкоголь деңгейін бақылауды автоматты түрде тексеру. Жүйе бет-әлпетті тануды жүзеге асырады, дулыға мен көзілдіріктің болуын бақылайды, сондай-ақ жұмысшылардың үздіксіз мониторингін қамтамасыз ете отырып, қауіпті мінез-құлық пен алкогольдік мас болу белгілерін анықтайды. Бұл қауіпсіздік деңгейін айтарлықтай жақсартуға, жазатайым оқиғалардың санын азайтуға және еңбек өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді деп күтілуде. Әзірлеу құрылыстан бастап тау-кен өнеркәсібіне,

мұнай-газға дейін әртүрлі салаларға бейімделетін болады. Жобаның жоғары практикалық және әлеуметтік-экономикалық маңызы бар, Қазақстанның ғылыми-техникалық әлеуетін дамытуға, IT және автоматтандыру саласында жаңа жұмыс орындарын құруға, сондай-ақ ғылым мен өндірістің өзара әрекеттесуін нығайтуға ықпал етеді.

Түйін сөздер: дрон, ЖИ, алкоголь тесті, QR коды, ЖҚҚ.

**А. Р. Омаров*¹, А.Ж. Жусупбеков², О.Д. Бибалаев², Д. М. Михайлов³,
Г. К. Танырбергенова⁴, Анкит Карг⁵**

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

²Карагандинский университет им. академика Е.А.Букетова

³Кызылординский университет имени Коркым Ата

⁴ТОО «Construction management system»

⁵Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, China.

Повышение безопасности труда в строительстве с помощью компьютерного зрения и дронов

Аннотация. Несмотря на установленные требования по использованию средств индивидуальной защиты (СИЗ), таких как каски и очки, традиционные методы контроля на строительных площадках не обеспечивают должного уровня соблюдения норм безопасности, что приводит к росту травматизма. Цель проекта — разработка интегрированной системы фейс-контроля, автоматической проверки наличия СИЗ и мониторинга уровня алкоголя с применением технологий компьютерного зрения, машинного обучения и дронов. Система будет осуществлять распознавание лиц, контроль наличия касок и очков, а также выявление небезопасного поведения и признаков алкогольного опьянения, обеспечивая непрерывный мониторинг работников. Ожидается, что это позволит существенно повысить уровень безопасности, снизить количество несчастных случаев и повысить производительность труда. Разработка будет адаптируема для различных отраслей — от строительства до горнодобывающей и нефтегазовой промышленности. Проект имеет высокую практическую и социально-экономическую значимость, способствует развитию научно-технического потенциала Казахстана, созданию новых рабочих мест в сфере IT и автоматизации, а также укреплению взаимодействия между наукой и производством.

Ключевые слова: дрон, ИИ, алкотестер, QR код, СИЗ.

References

1. Jung, D.; Seo, Y.; Shin, S.; Kim, D. Analyzing the relationship between the critical safety management tasks and their effects for preventing construction accidents using IPA method. Korean J. Constr. Eng. Manag. 23, pp. 77–86 (2022) - Journal article <https://dx.doi.org/10.6106/KJCEM.2022.23.5.077>
2. Hussain, R.; Pedro, A.; Zaidi, S.F.A.; Abbas, M.S.; Soltani, M.; Park, C. Conceptual Framework for Safety Training for Migrant Construction Workers using Virtual Reality Techniques. "In Digitalization in Construction, Routledge", London, UK, pp. 93–103 (2023) - Proceedings of the conferences

3. Park, C.; Soltani, M.; Pedro, A.; Yang, J.; Lee, D.; Hussain, R. "Transforming Construction Site Safety with iSAFE: An Automated Safety Management Platform", Routledge: London, UK, pp. 213–234 (2023) - Proceedings of the conferences
4. Choi, S.D.; Guo, L.; Kim, J.; Xiong, S. Comparison of fatal occupational injuries in construction industry in the United States, South Korea, and China. *Int. J. Ind. Ergon.*, 71, pp. 64–74. (2019) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.02.011>
5. Xiao, B.; Kang, S.C. Development of an Image Data Set of Construction Machines for Deep Learning Object Detection. *J. Comput. Civ. Eng.*, 35, p. 05020005 (2020) - Journal article [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000945](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000945)
6. Chen, C.; Gu, H.; Lian, S.; Zhao, Y.; Xiao, B. Investigation of Edge Computing in Computer Vision-Based Construction Resource Detection. *Buildings*, 12, p. 2167 (2022) - Journal article <https://doi.org/10.3390/buildings12122167>
7. Suh, S. A Qualitative Study Understanding Unsafe Behaviors of Workers in Construction Sites. *Korean J. Constr. Eng. Manag.*, 24, pp. 91–98 (2023) - Journal article <https://doi.org/10.6106/KJCEM.2023.24.6.091>
8. Hussain, R.; Zaidi, S.F.A.; Pedro, A.; Lee, H.; Park, C. Exploring construction workers' attention and awareness in diverse virtual hazard scenarios to prevent struck-by accidents. *Saf. Sci.* 175, p. 106526 (2024) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106526>
9. Soltani, M.; Pedro, A.; Yang, J.; Zaidi, S.F.A.; Lee, D.; Park, C. Isafeguard: A Proactive Solution for Construction Job Site Safety Monitoring. "In Smart & Sustainable Infrastructure: Building a Greener Tomorrow; Banthia, N., Soleimani-Dashtaki, S., Mindess, S., Eds.; Springer: Cham, Switzerland", pp. 1150–1165 (2024) - Proceedings of the conferences https://doi.org/10.1007/978-3-031-53389-1_101
10. Zeng, L.; Li, R.Y.M. Construction safety and health hazard awareness in Web of Science and Weibo between 1991 and 2021. *Saf. Sci.* 152, p. 105790 (2022) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105790>
11. Wang, J.; Jiang, L.; Yu, H.; Feng, Z.; Castaño-Rosa, R.; Cao, S. Computer vision to advance the sensing and control of built environment towards occupant-centric sustainable development: A critical review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 192, p. 114165 (2024) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114165>
12. Fang, Q.; Li, H.; Luo, X.; Ding, L.; Luo, H.; Rose, T.M.; An, W. Detecting non-hardhat-use by a deep learning method from far-field surveillance videos. *Autom. Constr.* 85, pp. 1–9 (2018) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.018>
13. Fang, Q.; Li, H.; Luo, X.; Ding, L.; Luo, H.; Li, C. Computer vision aided inspection on falling prevention measures for steeplejacks in an aerial environment. *Autom. Constr.* 93, pp. 148–164 (2018) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.022>
14. Huang, L.; Fu, Q.; He, M.; Jiang, D.; Hao, Z. Detection algorithm of safety helmet wearing based on deep learning. *Concurr. Comput. Pract. Exp.* 2021, 33, p. 6234 (2021) - Journal article <https://doi.org/10.1002/cpe.6234>
15. Han, K.; Zeng, X. Deep Learning-Based Workers Safety Helmet Wearing Detection on Construction Sites Using Multi-Scale Features. *IEEE Access*, 10, pp. 718–729 (2022) - Journal article <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3138407>
16. Hung, H.; Lan, L.; Hong, H. A Deep Learning-Based Method for Real-Time Personal

Protective Equipment Detection. "Le Quy Don Tech. Univ.-Sect. Inf. Commun. Technol. LQDTU-JICT 2019", 199, pp. 23–34 (2019) - Proceedings of the conferences

17. Wu, J.; Cai, N.; Chen, W.; Wang, H.; Wang, G. Automatic detection of hardhats worn by construction personnel: A deep learning approach and benchmark dataset. Autom. Constr. 106, p. 102894 (2019) - Journal article <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102894>

Information about the authors:

Omarov A.R. – first author and author for correspondence, PhD, Senior lecturer, Department of «Construction», L.N. Gumilyov ENU, Kazhymukan str., 13, 010000, Astana, Kazakhstan.

Zhussupbekov A. Zh. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «Construction», L.N. Gumilyov ENU, Kazhymukan str., 13, 010000, Astana, Kazakhstan.

Bibalaev O. D. – Master of Technical Sciences and junior researcher, a software engineer at the «Applied Mechanics and Robotics» Research Laboratory, E.A. Buketov Karaganda University, Universitetskaya str, 28, 100000, Karaganda, Kazakhstan.

Mikhailov D. — Master of Technical Sciences, as well as a first-year PhD Student, Korkyt Ata Kyzylorda University, Aiteke bi 29A, 120000, Kyzylorda, Kazakhstan.

Tanyrbergenova G. K. — Master of Technical Sciences, analyst-expert in general construction works at «Construction Management System» LLP, 010000, Astana, Kazakhstan.

Ankit Garg — PhD, Professor, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, 215000, Suzhou, Republic of China.

Омаров А.Р. - первый автор и автор для корреспонденции, PhD, старший преподаватель кафедры «Строительство» Евразийского национального университета имени Л. Н.Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан

Жусупбеков А.Ж. - д.т.н., профессор кафедры «Строительство» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан

Бибалаев О. Д. - младший научный сотрудник и магистр технических наук, инженер-программист в научно-исследовательской лаборатории «Прикладная механика и робототехника» Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, ул. Университетская, 28, 100000, Караганда, Казахстан

Михаилов Д. - магистр технических наук, докторант первого курса Кызылординского университета имени Кorkyt Ata, ул. Айтеке Би, 29А, 120000, Кызылорда, Казахстан

Танырбергенова Г.К. - магистр технических наук, аналитик-эксперт по общестроительным работам в ТОО «Construction Management System, 010000, Астана, Казахстан

Анkit Гарг - PhD, профессор университета Сиань Цзяотонг-Ливерпуль, 215000, Сучжоу, Китайская Народная Республика

Омаров А. Р. — бірінші автор және хат-хабар авторы, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Құрылыс» кафедрасының аға оқытушысы, Қажымұқан көшесі, 13, 010000, Астана, Қазақстан.

Жүсіпбеков А. Ж. — т. ғ. д., Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ «Құрылыс» кафедрасының профессоры, Қажымұқан көшесі, 13, 010000, Астана, Қазақстан.

Бибалаев О. Д. — Академик Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды университетінің «Қолданбалы механика және робототехника» ғылыми-зерттеу зертханасының инженер-бағдарламашысы, кіші ғылыми қызметкер және техника ғылымдарының магистрі,

Университетская к-сі, 28, Қарағанды, Қазақстан.

Михаилов Д. — техника ғылымдарының магистрі, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университетінің бірінші курс докторанты, Әйтеке Би көшесі, 29А, Қызылорда, Қазақстан.

Танырбергенова Г. К. - техника ғылымдарының магистрі, «Construction Management System» ЖШС жалпы құрылыс жұмыстары бойынша сарапшы-талдаушы, 010000, Астана, Қазақстан.

Анкит Гарг – PhD, Сиань Цзяотун-Ливерпуль университетінің профессоры, 215000, Сучжоу, Қытай Халық Республикасы



Copyright: © 2025 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/>).



IRSTI 76.09.41

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-215-230>

Computational Fluid Dynamics Study and Experimental Verification of the Proposed Procedure for Luer Fitting to Catheter Shaft Attachment

B.T.Zhali , D.Wei , A.Mussayev , D.G.Igali* 

Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

E mail: dastan.igali@alumni.nu.edu.kz

Abstract. The objective of this study is to develop and design an efficient procedure for molding luer fittings and joining luer with an extruded catheter shaft. Unlike overmolding, this technology involves the process of injection molding the luer fittings separately from the catheter and their subsequent attachment to the extruded catheter shaft using adhesives and UV curing. The proposed methodology is empirically evaluated using an injection molding machine and manual assembly with an emphasis on evaluating the quality of the final product and manufacturing efficiency. As a result, unlike the traditional method of manufacturing fittings and connecting to catheters (via overmolding), luer fittings obtained using the proposed methodology have a low probability of short shots during the manufacturing process, do not compress the catheter lumen since they are not subject to shrinkage, and reduce labor costs by 4.9%, which makes this technology attractive. When designing the luer fitting, 3D modeling tools such as Solidworks were used, and calculations of the pressure and speed of the polymer melt inside the mold were analyzed using the finite element method in the Ansys Polyflow software. The absence of shrinkage, efficiency in labor costs, and compliance of the final product with the standards of ISO 10555-1 (2021) for intravascular catheters were experimentally verified.

Keywords: luer fittings, medical catheters, CFD, injection molding, extrusion, UV curing, materials and manufacturing, polymer processing

Received 06.09.2025. Revised 11.09.2025. Accepted 15.09.2025. Available online 30.09.2025

*the corresponding author

Introduction

Polymers are widely used in various products that we use in our daily lives. These include apparel produced from synthetic fibers, cups made from polyethylene, fiberglass, nylon bearings, plastic bags, sheets and films manufactured from polypropylene, medical catheters, infusion lines, and silicone heart valves (Choudhury et al., 2022).

The polymer market is vast and experiencing tremendous growth due to the convenience of working with these materials. Furthermore, polymers are characterized by their exceptional mechanical and chemical attributes, including their affordability, lightweight nature, strength, flexibility, transparency, ease of sterilization, permeability, and remarkable resistance to physical aging and biological deterioration. Hence, polymer processing technologies are widely employed in several sectors such as packaging, building & construction, electronics, medicine, and aerospace. As an illustration, the automobile industry is currently focusing on decreasing the weight of its vehicles by substituting some components with polymers. This is because polymers are both cost-effective and lightweight, resulting in reduced fuel consumption for cars. Furthermore, the medical sector is increasingly adopting disposable plastic medical equipment due to their cost-effectiveness and reduced danger, in contrast to reusable medical devices, which are costly and recognized as potential sources of infections like HIV and hepatitis. (Choudhury et al., 2022; Czuba, 2014).

Injection molding is a prominent manufacturing process used to produce a variety of high-volume commercial products. These products include spools, bottle caps, vehicle dashboards, automotive parts, chairs, tables, plastic containers, medical catheter hubs, fittings for infusion lines, syringes, and other plastic-based products that are currently available (Dizon et al., 2019).

Overmolding is a specific use of the injection molding method where the molten polymer is directly poured onto the surface of a solidified substrate (Aliyeva et al., 2021). Nevertheless, the viscoelastic properties of the polymer melt as it solidifies might lead to deformation effects in the manufacturing process (Zeppenfeld et al., 2019). Overmolding or insert molding is employed to attach a polymer luer fitting to the proximal end of the extruded catheter (Kucklick, 2012). Although this process is extensively employed by catheter makers, the solidifying polymer fitting often experiences non-linear viscoelastic behavior, which leads to shrinkage and compression of the extruded catheter tubing. The shape irregularities of the fabricated part are caused by the high demolding temperature of the material (Michels, 2022). Consequently, the inner diameter of the compressed catheter decreases, making it challenging to introduce other devices via the catheter lumen.

Catheter luer fitting overmolding process steps are as follows:

1. The extruded catheter shaft is installed on mold inserts.
2. Luer fittings are insert molded around the extruded catheter shaft.

As a result, the solidifying luer fitting shrank and reduced the lumen of the soft catheter tubing (see Figure 1).

Aside from shrinkage, there exist numerous other faults in injection molding, including flow lines, sink marks, burn markings, and short shots. The faults primarily stem from factors such as excessive moisture in the material, suboptimal mold design, mold deterioration, and inappropriate machine parameter settings (Mourya et al., 2023).

Finding the ideal shape that matches the rheological properties of the melt and prevents mold deformation or external faults in the final product is the primary problem. Numerous optimization techniques for extrusion die designs that take deflection analysis and uniform

polymer flow into account are equally relevant to the injection molding procedure (Igali et al., 2020; Razeghiyadaki et al., 2020; Razeghiyadaki et al., 2021; Igali et al., 2023).



Figure 1. Shrinkage of the luer fitting

For instance, it has been shown that the adjoint optimization approach helps resolve problems with die-shape optimization for polymer melt extrusion (Igali et al., 2023). The adjoint optimization approach is a potent computational methodology for extrusion dies that minimizes flow-related problems such as non-uniform velocity at the outlet and stagnation, improving die design. Using this approach, the sensitivities of an objective function (such as pressure drop or flow uniformity) concerning design factors may be computed by solving the adjoint equations obtained from the governing fluid dynamics equations. The adjoint approach allows for the exact modification of the die shape to attain ideal flow characteristics by repeatedly modifying these variables. By guaranteeing a more consistent and regulated polymer melt flow through the die, this method substantially enhances both processing efficiency and product quality, making it very effective for intricate die designs.

The objective of this paper is to numerically and experimentally create a streamlined catheter luer fitting manufacturing process utilizing 3D modeling tools, which will enable the production of catheter luer fittings of superior quality that comply with ISO 10555-1:2023 requirements for intravascular catheters, while eliminating any previously noted flaws such as shrinkage and short shots. This technology involves the process of individually injection molding the luer fittings and then attaching them to the extruded catheter shaft using adhesives and UV curing. The proposed methodology will be empirically evaluated by utilizing an injection molding machine and manual assembly, with a focus on assessing the quality of the final product and the efficiency of

manufacturing. The results obtained from the suggested methodology will be compared to the results from overmolding or insert molding in terms of shrinkage and labor cost.

The methodology

This paper aims to use 3D modeling software, such as Solidworks, to generate the catheter luer fitting seen in Figure 2, while complying with ISO 10555-1:2023 requirements for intravascular catheters. In addition, a mold design with several cavities will be developed to facilitate the concurrent manufacturing of 6 to 8 luer fittings. The mold design will be tailored to suit the precise viscoelastic characteristics of the selected material, as well as the capabilities of the injection molding machine, cooling and heating systems, gate/runner design, and ejection mechanisms. The design will undergo computational validation utilizing Ansys Polyflow software, renowned for their efficacy in studying the characteristics of polymer melts (Igali et al., 2020).

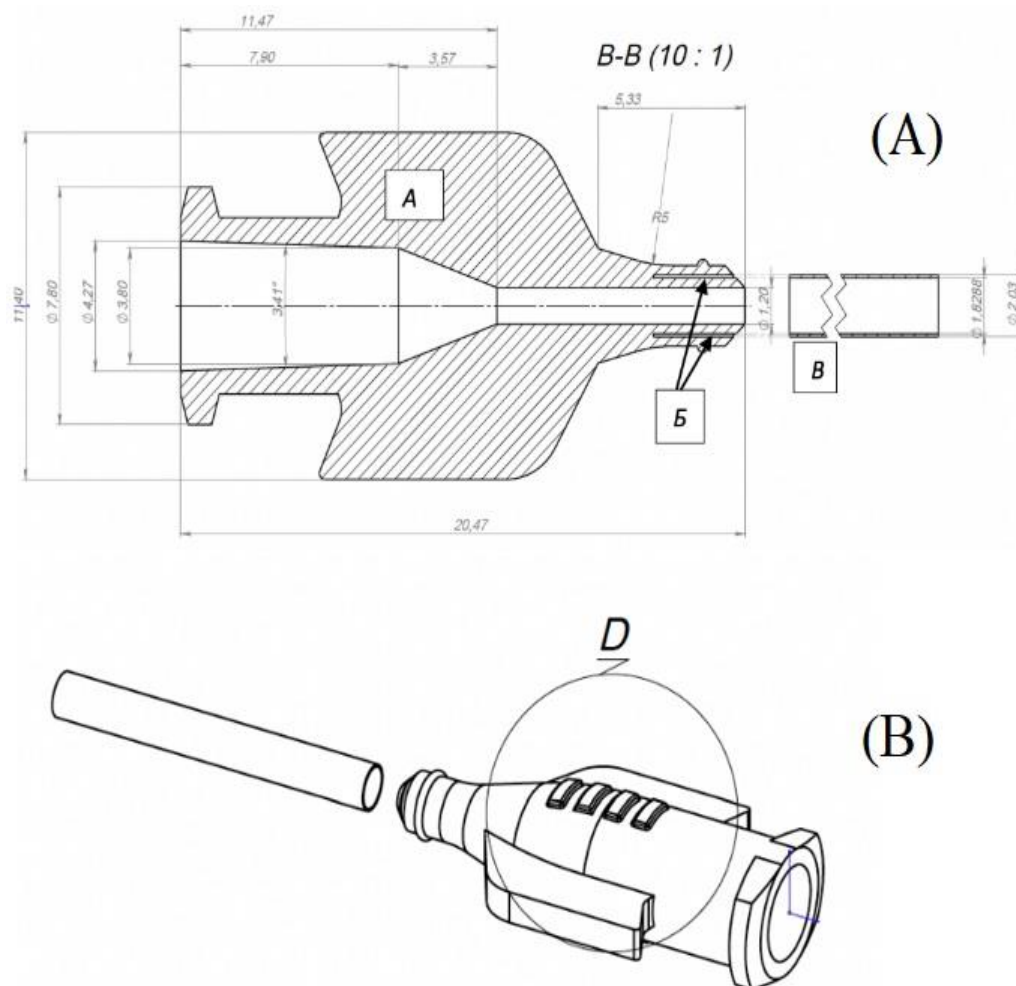


Figure 2. Cross-sectional view (A) and isometric view (B) of the luer fitting

In this study, the results of the pressure and velocity have been obtained to investigate the polymer melt behavior inside the luer fitting mold. Figure 3A illustrates that the inside of the mold

comprises the sprue, runner, gates, and component cavities. Typically, the molten material flows into the mold from the nozzle of the injection machine, then passes through the sprue and fills the mold cavities through runners and gates.

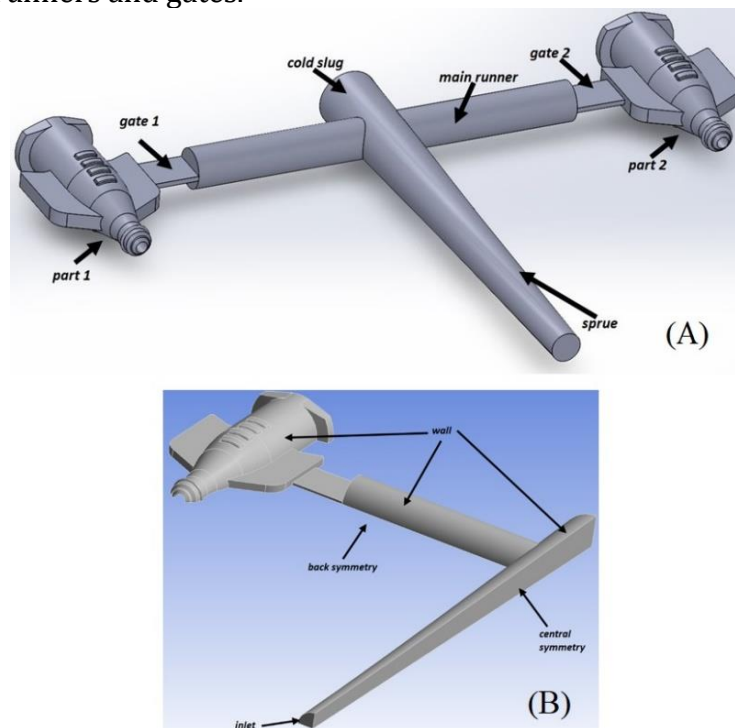


Figure 3. Interior of the mold (fluid body) (A) and one-fourth of the fluid body (B)

To minimize calculation time, just one-fourth of the fluid body's shape, which includes the inlet, wall, and symmetry faces, is evaluated due to its symmetric characteristic (see Figure 3B).

The mesh generated for this computational fluid dynamics (CFD) analysis has 165,480 nodes and 514,408 elements, as shown in Figure 4.

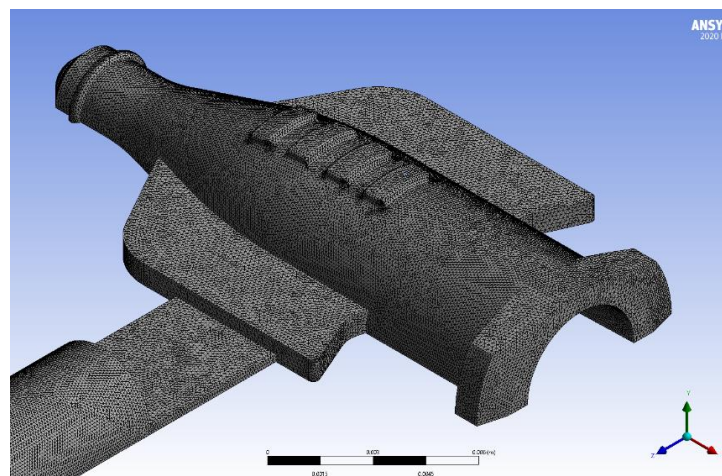


Figure 4. Mesh

Boundary conditions are as follows:

- Inlet: the flow is assumed to be fully developed with the volumetric flow rate of 1.46 m³/s;
- Wall: no-slip boundary conditions.

Some basic assumptions were made for the computations:

- Steady state flow;
- Isothermal flow;
- Hydrodynamically fully developed flow;
- Incompressible fluid;
- No external forces (e.g., the effect of gravity is neglected);
- No slip boundary condition at the walls.

In this study, the medical grade PP (LB6331) with the following mechanical properties and power-law viscosity parameters has been used:

Table 1. Simulation parameters for PP (LB6331) (Zaki et al., 2022)

Material	Medical grade (LB6331)
Inlet temperature (°C)	190.00
Inlet pressure (MPa)	38.22
Density (kg/m ³)	900
Zero shear viscosity (kg/m s)	2160.00
Power law index	0.2590
Time constant (s)	0.0573

Figure 5 illustrates the pressure and velocity distribution of the medical-grade PP melt inside the mold after injection.

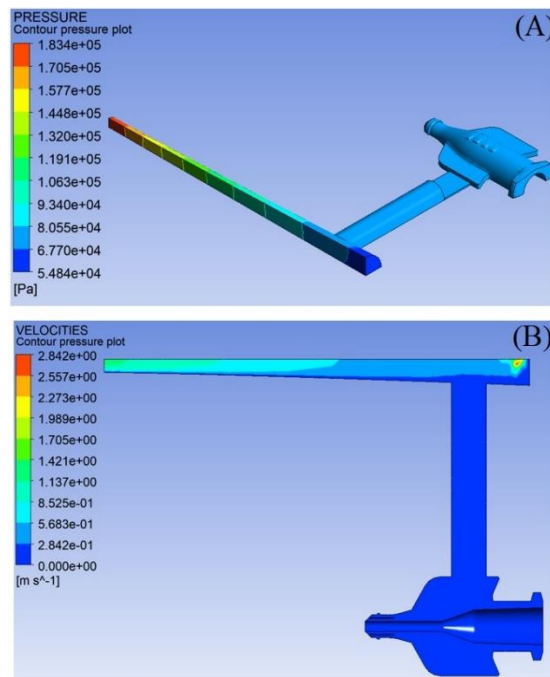


Figure 5. Pressure (A) and velocity (B) contour plots

These results have been produced using Ansys Polyflow. As anticipated, the intake experiences a maximum pressure of 0.183 MPA, which gradually decreases as it progresses into the part cavities. Furthermore, the velocity reaches its peak at the intake as a result of the substantial flow rate at the entry. However, the velocity gradually decreases from 2.842 m/s to 0 m/s as the molten material fills the cavities and eventually comes to a halt. According to the results shown in Figure 5, the luer fitting cavities are completely filled, and there are no signs of deformation and short shots, because the pressure and velocity values are distributed evenly.

This study also provides instructions for the experimental procedure of bonding a luer to the proximal end of a catheter using UV-cure adhesive. This procedure must be performed in a minimum of a Class 8 Clean room. The following equipment and fixtures were used in this procedure:

- Fixture for Holding Parts;
- Luer Lock Dispensing Tips (disposable; hooked to syringe of adhesive to control the adhesive flow);
- EFD Precision Fluid Dispenser with adapters for syringe (optional, requires pressurized air hookup);
- UV Light Source with required Light Guide;
- UV Cure Adhesive.

The proximal end of the catheter shaft is placed over the mandrel and into the bore of the luer fitting until it bottoms out, as shown below.

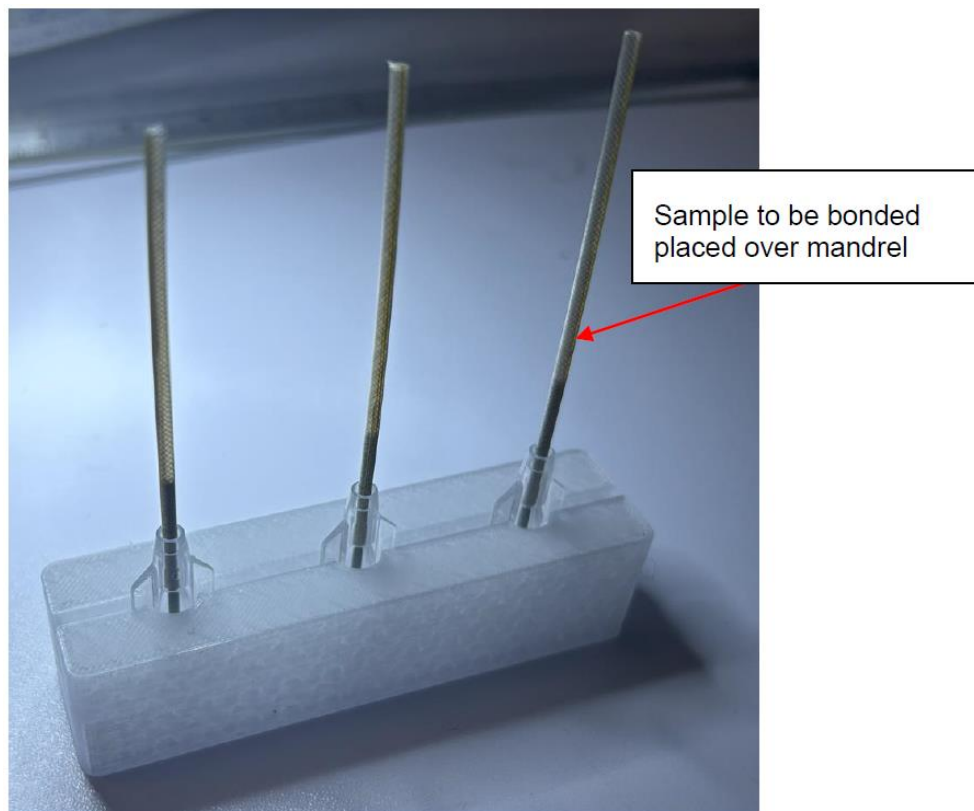


Figure 6. Loading parts into the fixture

The dispensing tip is positioned between the luer fitting and the catheter shaft.

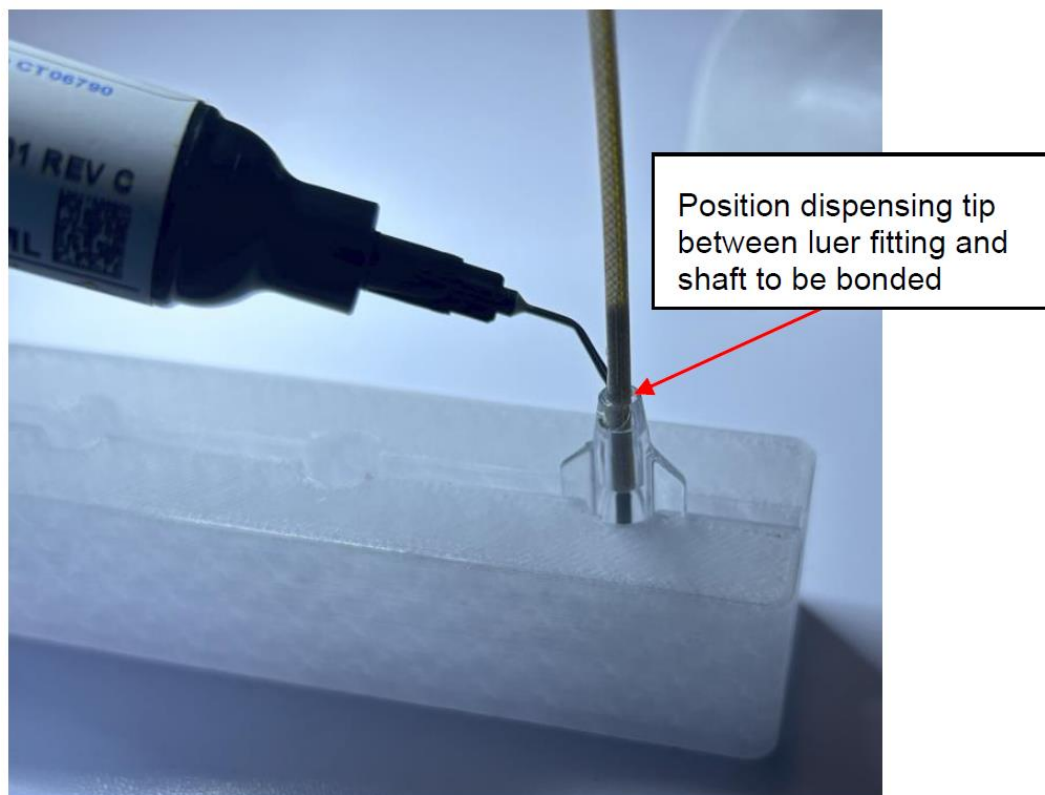


Figure 7. Adding adhesive

Slowly dispense adhesive, allowing it to flow into the gap between the luer fitting and the shaft. It can be helpful to rotate the shaft while dispensing to better distribute the adhesive around the circumference of the shaft.

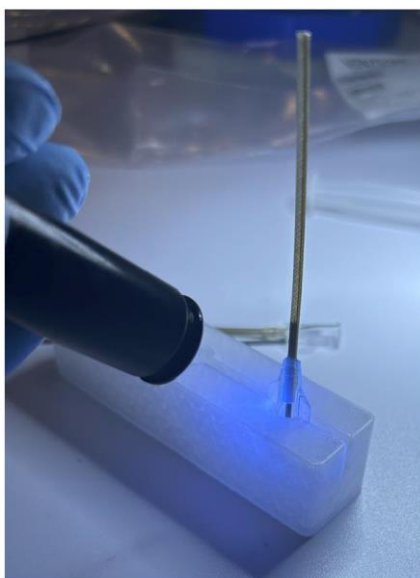


Figure 8. Curing (putting the wand too close to the part will result in the part heating up)

Note:

- Depending on the viscosity of the adhesive, adjust the dispensing speed.
- The tip may be positioned near the top or bottom, depending on the viscosity, size of the gap, and geometry of the parts.

Once the adhesive has reached the bottom of the bore/shaft, stop dispensing adhesive. Use a cleanroom swab or cleanroom wipe to clean away any spilled adhesive. Depending on the viscosity of the adhesive, it may be necessary to carry out the next UV curing step very quickly.

Position the UV Cure Wand about 25mm from the part and cure for 10 seconds as shown in Figure 8.

Then, rotate the fixture 180 degrees, and cure for 10 more seconds.

The last step is to add a fillet of adhesive around the junction of the luer and the tubing, as shown in the figure below.

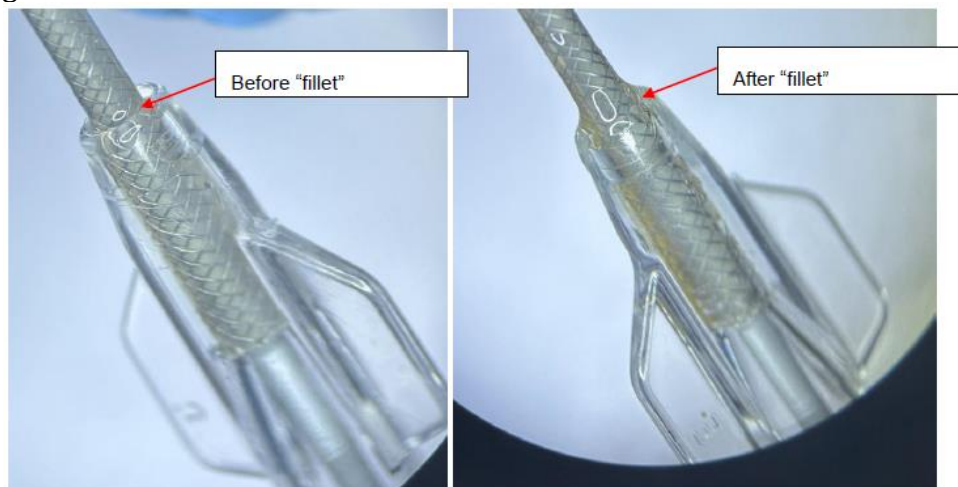


Figure 9. Adding a fillet (it may be advantageous to remove the part from the fixture for this step so that it can be done fully under a microscope)

Finding/Discussion

After visual inspection, it can be clearly noticed that the luer fitting was not subject to shrinkage since the lumen of the catheter was not compressed, as shown in Figure 8.



Figure 10. Observation of the catheter lumen

Also, there are no excessively large voids in the luer fittings. The figures below show examples of acceptable and unacceptable voids in the fittings because of the short shots.

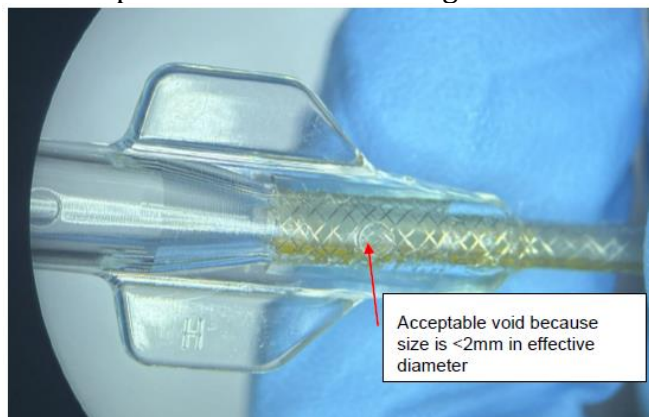


Figure 11. Observation of the acceptable voids

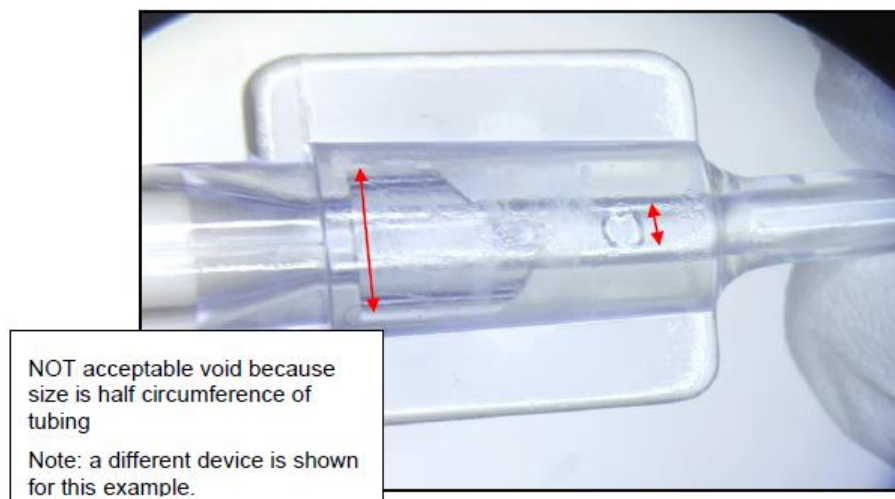


Figure 12. Observation of the unacceptable voids

According to ISO 10555-1 (2021) for intravascular catheters, the junction of the luer fitting with the catheter must withstand a load of up to 15 N. The tensile test was carried out on 11 samples, and the obtained average strength value is about 108 N. All samples passed the test successfully, as shown in the table below. Furthermore, the labor costs for manufacturing one luer fitting were experimentally estimated. The aforementioned technological process of manufacturing a luer by the traditional method (overmolding) consists of two stages: placing the catheter shaft on the insert and the luer injection molding process around the shaft. Installation of the catheter shaft on the inserts takes 3 sec. (0.00083 man-hours), while the luer molding process around the shaft takes 20 sec. (0.0055 man-hours). The technological process of manufacturing luer by the proposed method consists of three stages: the process of molding luer on an injection molding machine separately without using inserts, adding adhesive, and UV curing. The process of injection molding by this method takes 6.67 sec. (0.0019 man-hours), and the adding adhesive and UV curing processes take 15 sec. (0.0042 man-hours). It is important to consider that the overmolding process using an injection molding machine with inserts takes more production time, since this method allows you to manufacture only 2 pcs. of luer fittings at one shot, while the

proposed method allows you to produce a minimum 6-8 pcs. at one shot, since the absence of an insert on the mold frees up space for additional part cavities in the mold.

Table 2. Tensile strength testing results

Sample #	Force to Failure (lbf)	Force to Failure (N)
1	23.4	104.0
2	19.8	88.2
3	23.1	102.5
4	31.6	140.6
5	25.3	112.5
6	21.1	94.0
7	14.6	64.9
8	25.6	113.7
9	30.8	136.9
10	23.5	104.7
11	28.6	127.2
Avg	24.3	108.1
Standard Deviation	4.70	20.93
Min	14.6	64.9
Max	31.6	140.6

Comparative data for the two methods of manufacturing catheter fittings are given below:

Table 3. Comparative analysis

Criteria	Traditional method of manufacturing luer fittings (overmolding)	Proposed manufacturing method of luer fittings (adding adhesive + UV curing)
Labor costs, man-hours	0.0064	0.0061
Number of cavities on the mold, pcs.	2	6-8
Compression of the internal lumen of the catheter	yes	no

Conclusion

The conducted research highlights the effectiveness of developing an alternative approach to the manufacturing of intravascular catheters by introducing a modified process for producing and assembling luer fittings. Unlike traditional overmolding, where the fitting is formed directly on the catheter shaft, the proposed methodology involves independent injection molding of the luer component, followed by its attachment to the extruded catheter shaft using medical-grade

adhesives combined with UV curing. This separation of processes as only reduces technological risks associated with polymer shrinkage and dimensional instability but also provides improved control over both the quality of the fitting and the assembly procedure.

The empirical evaluation, carried out using industrial injection molding equipment and manual assembly techniques, revealed significant benefits of the new method. The probability of short-shot defects during injection molding was minimized, while the absence of shrinkage ensured that the catheter lumen remained uncompromised, thereby preserving the functional characteristics of the device. Furthermore, comparative analysis demonstrated a 4.9% increase in labor efficiency, which, although modest, represents an important contribution to overall manufacturing productivity when scaled to industrial volumes.

From a design perspective, the study integrated advanced engineering tools, including 3D modeling in SolidWorks for geometrical optimization and finite element simulations in Ansys Polyflow to analyze polymer melt flow parameters within the mold cavity. These computational analyses provided valuable insights into the pressure and velocity distribution of the polymer, enabling improved mold design and minimizing the likelihood of processing defects. The experimental outcomes validated these theoretical models, confirming that the final product consistently meets the structural and functional requirements of ISO 10555-1 (2021) for intravascular catheters.

In summary, the proposed technology offers a promising alternative to conventional overmolding by combining manufacturing flexibility, reduced defect rates, and improved cost-efficiency. Beyond the direct technical advantages, this approach also opens opportunities for further automation of catheter assembly, integration with novel adhesive formulations, and adaptation to other classes of medical devices where precise dimensional stability and lumen preservation are critical. Consequently, this study establishes the feasibility of the method but also lays the groundwork for scaling its application in modern medical device production, potentially influencing industry practices toward more reliable and resource-efficient manufacturing strategies.

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to "ZAN Logistic" LLP for their unwavering support and provision of resources throughout the course of this research.

The contribution of the authors

Zhali B.T. is responsible for literature review and scientific consulting.

Wei D. developed the concept and methodology.

Mussayev A. is responsible for literature review and scientific consulting.

Igali D.G. worked on data collection, 3D modeling, CFD study, experimental verification, analysis, interpretation, drafting, editing.

References

1. Choudhury M., Bindra H. S., Singh K., Singh A. K., Nayak R., Antimicrobial polymeric composites in consumer goods and healthcare sector: A healthier way to prevent infection, *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, Vol. 33, P. 1997–2024, DOI: 10.1002/pat.5660. – article
2. Czuba L., Application of plastics in medical devices and equipment, *Handbook of Polymer*

3. Applications in Medicine and Medical Devices, (William Andrew Publishing, 2014), p. 9–19. – book
4. Dizon J. R. C., Valino A. D., Souza L. R., Espera A. H., Chen Q., Advincula R. C., Three-dimensional-printed molds and materials for injection molding and rapid tooling applications, MRS Communications, 2019, Vol. 9, P. 1267–1283, DOI: 10.1557/mrc.2019.132. – article
5. Aliyeva N., Sas H. S., Okan B. S., Recent developments on the overmolding process for the fabrication of thermoset and thermoplastic composites by the integration of nano/micron-scale reinforcements, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, Vol. 149, P. 106525, DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106525. – article
6. Zeppenfeld M., Müller B., Heyl S., Influence of insert component position and geometry on shrinkage in thermoplastic insert molding, AIP Conference Proceedings, 2019, Vol. 2139, No. 1, DOI: 10.1063/1.5121533. – conference proceedings
7. Kucklick T. R., Basics of Catheter Assembly, in The Medical Device R&D Handbook, (CRC Press, 2012), p. 107. – book
8. Michels P., Bruch O., Evers-Dietze B., Grotenburg D., Ramakers-van Dorp E., Altenbach H., Shrinkage simulation of blow molded parts using viscoelastic material models, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2022, Vol. 53, P. 449–466, DOI: 10.1002/mawe.202100282. – article
9. Mourya A., Nanda A., Parashar K., Kumar R., An explanatory study on defects in plastic molding parts caused by machine parameters in injection molding process, Materials Today: Proceedings, 2023, Vol. 78, P. 656–661, DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.070 – article
10. Igali D., Perveen A., Zhang D., Wei D., Shear rate coat-hanger die using Casson viscosity model, Processes, 2020, Vol. 8, P. 1524, DOI: 10.3390/pr8121524. – article
11. Razeghiyadaki A., Zhang D., Wei D., Perveen A., Optimization of polymer extrusion die based on response surface method, Processes, 2020, Vol. 8, P. 1043, DOI: 10.3390/pr8091043. – article
12. Razeghiyadaki A., Wei D., Perveen A., Zhang D., A multi-rheology design method of sheeting polymer extrusion dies based on flow network and the Winter–Fritz design equation, Polymers, 2021, Vol. 13, P. 1924, DOI: 10.3390/polym13121924. – article
13. Igali D., Clifford O., Perveen A., Zhang D., Wei D., Optimization of non-Newtonian flow through a coat-hanger die using the adjoint method, Designs, 2023, Vol. 7, P. 138, DOI: 10.3390/designs7060138. – article
14. Igali D., Wei D., Zhang D., Perveen A., A comparative analysis of sheeting die geometries using numerical simulations, Advances in Computational Design, 2020, Vol. 5, No. 2, P. 111–125, DOI: 10.12989/acd.2020.5.2.111. – article
15. Zaki M. Z. M., Rusdi M. S., Xiao C. L. T., Abidin N. S. Z., Shafee M. A. F. M., Vimalraj A., Tharumaalingam L., The comparison of medical grade PP with common grade PP in injection moulding process, CFD Letters, 2022, Vol. 14, P. 1–13, DOI: 10.37934/cfdl.14.4.113. – article

Б.Т.Жали, Д.Уей, А.Д.Мусаев, Д. Ғ.Иғали*

¹ Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан, Қазақстан

Сұйықтық динамикасын есептеуді зерттеу және катетер білігіне Луер фитингін орнатудың ұсынылған процедурасын эксперименттік тексеру

Аңдатпа. Бұл зерттеудің мақсаты - экструдталған катетердің шафтына Луер фитингтері мен қосылымдарын өндірудің тиімді процедурасын әзірлеу және жобалау. Дәстүрлі қалыптаудан (овермолдингтен) айырмашылығы, бұл технология Луер фитингтерін катетерден бөлек инъекциялық қалыптау процесін қамтиды, содан кейін оларды жабысқақ және ультракүлгін сәулелену арқылы экструдталған катетердің шафтына қосу болып табылады. Ұсынылған әдістеме соңғы өнімнің сапасы мен өндіріс тиімділігін бағалауға баса назар аудара отырып, қалыптау машинасы мен қолмен құрастыру арқылы эмпирикалық түрде бағаланады. Нәтижесінде, фитингтерді дайындаудың және катетерге қосудың дәстүрлі әдісінен айырмашылығы (овермолдингтен), ұсынылған әдіспен алынған Луер фитингтері өндіріс процесінде толымсыз құйылу ықтималдығы төмен, катетердің люменін қыспайды, өйткені олар шөгуге ұшырамайды және бұл технология жұмыс күші бойынша 4,9 %-ға тиімді. Луер фитингінің дизайны Solidworks сияқты 3D модельдеу құралдары арқылы жасалды және қалып ішіндегі полимердің қысымы мен балку жылдамдығының есептеулері Ansys Polyflow бағдарламалық құралында соңғы элементтерді талдау арқылы талданды. Шөгудің жоқтығы, еңбек өнімділігі және түпкілікті өнімнің ISO 10555-1 (2021) тамырішілік катетерлер стандарттарына сәйкестігі тәжірибе жүзінде расталды.

Түйін сөздер: Луер втулкасы, Катетерлер, CFD, Инъекциялық құю, Медициналық құрылғылар өндірісі, Экструзия

Б.Т.Жали, Д.Уей, А.Д.Мусаев, Д. Г.Игали*

Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан, Қазақстан

Исследование динамики жидкости с помощью компьютерных вычислений и экспериментальная проверка предлагаемой процедуры установки Луер фитинга на шaft катетера

Аннотация. Целью данного исследования является разработка и проектирование эффективной процедуры изготовления фитингов Луер и соединения с экструдированным шaftом катетера. В отличие от овермолдинга, данная технология включает в себя процесс литья под давлением фитингов Луер отдельно от катетера и их последующего соединения к экструдированному шaftу катетера с помощью клея и УФ-отверждения. Предлагаемая методика эмпирически оценена с использованием термопластавтомата и ручной сборки с акцентом на оценку качества конечного продукта и эффективности производства. В результате, в отличие от традиционного способа изготовления фитингов и соединения с катетерами (с помощью овермолдинга), фитинги Луер, полученные с использованием предлагаемой методики, имеют низкий риск недоливов в процессе производства, не сдавливают просвет катетера, поскольку не подвержены усадке, и обеспечивают снижение трудозатрат на 4,9%, что делает данную технологию привлекательной. При проектировании Луер фитинга использовались инструменты 3D-моделирования, такие как Solidworks, а расчеты давления и скорости расплава полимера внутри формы

анализировались методом конечных элементов в программном обеспечении Ansys Polyflow. Отсутствие усадки, эффективность по трудозатратам и соответствие конечного продукта стандартам ISO 10555-1 (2021) для внутрисосудистых катетеров было экспериментально подтверждено.

Ключевые слова: Втулка Луер, Катетеры, CFD, Литье под давлением, Производство медицинских изделий, Экструзия

References

1. Choudhury M., Bindra H. S., Singh K., Singh A. K., Nayak R., Antimicrobial polymeric composites in consumer goods and healthcare sector: A healthier way to prevent infection, *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, Vol. 33, P. 1997–2024, DOI: 10.1002/pat.5660. – article
2. Czuba L., Application of plastics in medical devices and equipment, *Handbook of Polymer Applications in Medicine and Medical Devices*, (William Andrew Publishing, 2014), p. 9–19. – book
3. Dizon J. R. C., Valino A. D., Souza L. R., Espera A. H., Chen Q., Advincula R. C., Three-dimensional-printed molds and materials for injection molding and rapid tooling applications, *MRS Communications*, 2019, Vol. 9, P. 1267–1283, DOI: 10.1557/mrc.2019.132. – article
4. Aliyeva N., Sas H. S., Okan B. S., Recent developments on the overmolding process for the fabrication of thermoset and thermoplastic composites by the integration of nano/micron-scale reinforcements, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, Vol. 149, P. 106525, DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106525. – article
5. Zeppenfeld M., Müller B., Heyl S., Influence of insert component position and geometry on shrinkage in thermoplastic insert molding, *AIP Conference Proceedings*, 2019, Vol. 2139, No. 1, DOI: 10.1063/1.5121533. – conference proceedings
6. Kucklick T. R., Basics of Catheter Assembly, in *The Medical Device R&D Handbook*, (CRC Press, 2012), p. 107. – book
7. Michels P., Bruch O., Evers-Dietze B., Grotenburg D., Ramakers-van Dorp E., Altenbach H., Shrinkage simulation of blow molded parts using viscoelastic material models, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2022, Vol. 53, P. 449–466, DOI: 10.1002/mawe.202100282. – article
8. Mourya A., Nanda A., Parashar K., Kumar R., An explanatory study on defects in plastic molding parts caused by machine parameters in injection molding process, *Materials Today: Proceedings*, 2023, Vol. 78, P. 656–661, DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.070 – article
9. Igali D., Perveen A., Zhang D., Wei D., Shear rate coat-hanger die using Casson viscosity model, *Processes*, 2020, Vol. 8, P. 1524, DOI: 10.3390/pr8121524. – article
10. Razeghiyadaki A., Zhang D., Wei D., Perveen A., Optimization of polymer extrusion die based on response surface method, *Processes*, 2020, Vol. 8, P. 1043, DOI: 10.3390/pr8091043. – article
11. Razeghiyadaki A., Wei D., Perveen A., Zhang D., A multi-rheology design method of sheeting polymer extrusion dies based on flow network and the Winter–Fritz design equation, *Polymers*, 2021, Vol. 13, P. 1924, DOI: 10.3390/polym13121924. – article
12. Igali D., Clifford O., Perveen A., Zhang D., Wei D., Optimization of non-Newtonian flow through

a coat-hanger die using the adjoint method, Designs, 2023, Vol. 7, P. 138, DOI:

10.3390/designs7060138. – article

14. Igali D., Wei D., Zhang D., Perveen A., A comparative analysis of sheeting die geometries using numerical simulations, Advances in Computational Design, 2020, Vol. 5, No. 2, P. 111–125, DOI: 10.12989/acd.2020.5.2.111. – article

15. Zaki M. Z. M., Rusdi M. S., Xiao C. L. T., Abidin N. S. Z., Shafee M. A. F. M., Vimalraj A., Tharumaalingam L., The comparison of medical grade PP with common grade PP in injection moulding process, CFD Letters, 2022, Vol. 14, P. 1–13, DOI: 10.37934/cfdl.14.4.113. – article

Information about the authors

Zhali B.T. - bachelor degree in economics, Nazarbayev University, Kabanbay Batyr Avenue, 53, Z05H0P9, Astana, Kazakhstan

Wei D. - PhD in mathematics, full Professor, Nazarbayev University, Kabanbay Batyr Avenue, 53, Z05H0P9, Astana, Kazakhstan

Mussayev A. - master of science in Mining Engineering, Nazarbayev University, Kabanbay Batyr Avenue, 53, Z05H0P9, Astana, Kazakhstan

Igali D.G. - corresponding author, master of science in Mechanical & Aerospace Engineering, project manager, Nazarbayev University, Kabanbay Batyr Avenue, 53, Z05H0P9, Astana, Kazakhstan

Жали Б.Т. - степень бакалавра экономики, Назарбаев Университет, проспект Кабанбай батыра, 53, Z05H0P9, Астана, Казахстан

Уей Д. - доктор наук по математике, профессор, Назарбаев Университет, проспект Кабанбай батыра, 53, Z05H0P9, Астана, Казахстан

Мусаев А.Д. - магистр наук в области горного дела, Назарбаев Университет, проспект Кабанбай батыра, 53, Z05H0P9, Астана, Казахстан

Игали Д. Г. - автор-корреспондент, магистр наук в области машиностроения и аэрокосмической техники, менеджер проектов, Назарбаев Университет, проспект Кабанбай батыра, 53, Z05H0P9, Астана, Казахстан

Жали Б.Т. - экономика бакалавры, Назарбаев Университеті, Қабанбай батыр даңғылы, 53, Z05H0P9, Астана, Қазақстан

Уей Д. - математика ғылымдарының докторы, Назарбаев Университетінің профессоры, Қабанбай батыр даңғылы, 53, Z05H0P9, Астана, Қазақстан

Мусаев А.Д. - тау-кен ісі саласындағы ғылым магистрі, Назарбаев Университеті, Кабанбай батыр даңғылы, 53, Z05H0P9, Астана, Қазақстан

Иғали Д. Г. - корреспондент-автор, машина жасау және аэроғарыштық инженерия магистрі, жоба менеджері, Назарбаев Университеті, Қабанбай батыр даңғылы, 53, Z05H0P9, Астана, Қазақстан



Copyright: © 2024 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/>)



XFTAP 53.49.05

Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-231-246>

Бейниттік түрлену механизмі мен бейниттік құрылымды машина жасау болаттарының термиялық беріктендіру сапасы туралы

М.А. Джаксымбетова * ¹, А.Т. Канаев ¹, Б.У. Байхожаева ¹,
Е.Ю. Ремшев ²

¹Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Д.Ф. Устинов атындағы «ВОЕНМЕХ» Балтық мемлекеттік техникалық университеті, Санкт-Петербург, Ресей

E mail: dzhaksymbetov@list.ru

Аңдатпа. Бейнит құрылымдарын талдаудың дәстүрлі әдістерінде бейниттік түрленудің құрылымдық ерекшеліктерін анықтауға және сандық сипаттауға мүмкіндік бермейтін ескірген тәсілдер қолданылған. Сондықтан соңғы жылдары бейнит құрылымы жоғары рұқсатты сканерлеуші электрондық микроскоп және кері электрондық дифракция әдісі арқылы зерттелуде. Бұл әдістер бейниттің әртүрлі микроструктуралық түрлерін жоғары дәлдікпен сипаттауға мүмкіндік береді. Бейниттік түрлену бірнеше мәрте зерттелгеніне қарамастан, оның механизмі әлі күнге дейін даулы болып қалуда. Даулы болып табылатын мәселелерге жақтарында центрленген кубтық тордың көлемді-орталықтандырылған куб торына айналу механизмі, көміртектің қайта бөлінуіне және көміртегімен қаныққан ферриттің пайда болуына алып келетін көміртегі диффузиясының рөлі, сондай-ақ карбидтердің бөліну процестері жатады. Бейнит құрылымы механикалық қасиеттердің сапалық көрсеткіштерін – беріктік, пластикалық қасиеттер мен тұтқырлықты жоғары деңгейде қамтамасыз етеді. Перлитпен, сорбитпен және трооститпен салыстырғанда төменгі бейнит қаттылығы мен беріктігі жоғары бола отырып, пластикалық қасиеттері мен тұтқырлығы да жоғары деңгейде сақталады. Бұл ферриттегі көміртек мөлшерінің жоғары болуымен, бейниттегі дислокация тығыздығының артқандығымен, сондай-ақ дисперстік карбидтердің түзілуімен түсіндіріледі.

Түйін сөздер: ($\gamma \rightarrow \alpha$) түрленуі, кинетика, механизм, аустениттің ыдырауы, изотермиялық, термокинетикалық, микроструктура

Кіріспе

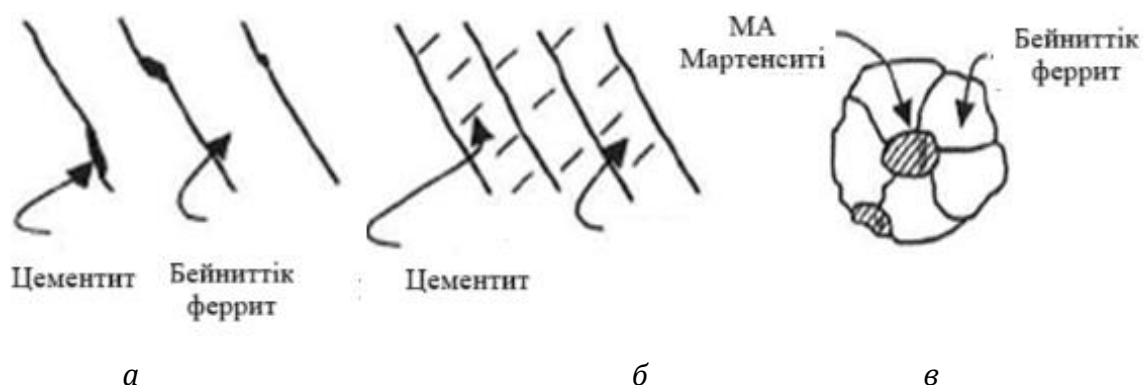
Бейниттік құрылымды машина жасау болаттары жоғары беріктік пен тұтқырлық қасиеттерінің үйлесіміне ие, бұл олардың осындай микроструктурамен дайындалатын машина бөлшектерін өндіруде үлкен сұранысқа ие болуына себеп болады. Сондықтан қазіргі уақытта бейниттік құрылымды ыстықтай илемдеу технологиялық ағынында немесе аустениттік күйге дейін қыздырып, ауамен салқындату арқылы жүзеге асырылатын қарапайым термиялық өңдеу арқылы алу жолдары кеңінен қолданылуда, бұл экономикалық тұрғыдан тиімді болып саналады [1,2].

Бейниттің микроструктурасы ультражұқа феррит түйірлерінен тұрады, олардың түйір шекараларында немесе ішкі бөлігінде екінші фазаның бөлшектері орналасады. Бейнит микроструктурасының ерекшелігі — оның қайталанатын жіңішке параллель кристалдардан немесе түйіршіктерден тұратындығы, олардың типтік ені 0,1–0,5 мкм. Мұндай құрылымды дәстүрлі оптикалық микроскопия әдістерімен сипаттау қиын. Сондықтан бейниттің микро- және субқұрылымын қазіргі уақытта жоғары ажыратымдылықтағы сканерлеуші электрондық микроскоп және кері электрондық дифракция әдісі арқылы зерттейді. Бұл кезде микроструктура элементтері мен түйірлер арасындағы дезориентация бұрыштары өлшенеді, бұл бейниттік ферриттің әртүрлі пішіндерін ажыратуға мүмкіндік береді. Кері электрондық дифракция әдісі арқылы алынған кристаллографиялық бағдарлар сипаттамасы электрондық микроскоппен микроструктураны талдауды толықтырады. Бұл әдістер бейниттің күрделі микроструктурасын жоғары дәлдікпен сипаттауға мүмкіндік береді. Мұндай жоғары дәлдіктегі микроструктура бейнесінің болуы бейнит құрылымының анықтамасын қайта қарауды және түзетуді талап етеді [3-5]. Бейнит аралас микроструктураның бір бөлігі болып табылады, бұл оның жіктелуін қиындатады. Сондықтан бейниттің микроструктурасы мен механикалық қасиеттері арасындағы өзара байланысты анықтау оңай емес.

Зерттеушілер [6–10] бейниттік микроструктураға тән бірнеше белгілердің бар екенін және олардың механикалық қасиеттермен байланысты екенін атап өтеді. Мысалы, D.V. Edmonds, K.J. Irvine [6,7] еңбектерінде, кристалдық торда атомдардың енуі мен орын алмасу процестері бейниттегі дислокациялар тығыздығының жоғары болуына байланысты болаттың беріктігін арттыратыны көрсетілген. [8–10] жұмыстарда бейниттің беріктігі екі айнымалының функциясы ретінде түсіндіріледі: феррит пластинкасының ені және цементит бөлшектері арасындағы арақашықтық. Алайда бұл параметрлер бір-бірінен тәуелсіз, сондықтан механикалық сынақтар барысында олардың әсерін жеке-жеке ажырату қиын. Бхадеша ұсынған классикалық жіктемеге сәйкес [11], изотермиялық түрленуге ұшыраған болаттар үшін бейнит жоғарғы және төменгі болып екіге бөлінеді. Жоғарғы бейнит реекалы типтегі ферриттен, ал төменгі бейнит пластинкалы типтегі ферриттен тұрады.

Үздіксіз салқындатуға ұшыраған болаттар үшін Браммит пен Спир [12–14] бейнит құрылымының үш түрлі анықтамасын ұсынады: түйір ішілік карбидтік бөлшектері бар бейнит (төменгі бейнит), түйір шекараларында карбидтік бөлшектері бар бейнит (жоғарғы бейнит), екінші фазаның жеке орналасқан бөлшектері бар бейнит (гранулалық бейнит). Төменгі бейнит екі шағын топқа бөлінеді: реекалы типтегі төменгі бейнит аз көміртекті болаттарға тән болса, пластинкалы типтегі төменгі бейнит жоғары көміртекті болаттарға тән. Сондықтан төменгі бейниттің механикалық қасиеттері жоғарғы бейнитпен

салыстырғанда жоғары болады. Бейниттегі карбид бөлшектері перлиттегі сияқты параллель пластинкалар түрінде емес, оқшауланған және қысқа (жіңішке) бөлшектер түрінде бөлінеді. Жоғарғы бейнит деп карбид бөлшектері орнына мартенсит-аустениттік құрамдас бөліктер болатын бейнитті айтады. Жоғарғы бейнитті төменгі бейниттен цементит (карбид) бөлшектерінің таралу сипатымен ажыратуға болады. Жоғарғы бейнитте карбид бөлшектері феррит түйірлері шекараларында орналасады, ал төменгі бейнитте карбид бөлшектері феррит пластинкаларының ішінде орналасып, дислокациялардың қозғалысына анағұрлым күшті кедергі жасайды. Гранулярлық бейнит деп құрамында карбидтер жоқ, көміртекпен қаныққан феррит пен мартенсит-аустениттік құрамдас бөліктерден тұратын бейниттің микроструктурасын айтады (1-сурет).



1-сурет. Бейниттік құрылымдардың морфологиясы мен сыртқы келбетінің сұлбалары.
а – жоғарғы бейнит, б – төменгі бейнит, в – гранулярлық бейнит

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [15]

Бақыланатын илемдеу және жеделдетілген салқындату кезінде аз көміртекті және аз легирленген болаттарда түзілетін бейнит, орта және жоғары көміртекті болаттарда түзілетін бейниттен ерекшеленетіні анықталды. Аз көміртекті болаттарда түзілетін бейнит рекалы құрылымға ие. Жоғары көміртекті болаттардағы бейнитке инелі (пластина тәрізді) құрылым тән.

Бейниттік түрлену механизмі келесі негізгі процестерден тұрады: кристалдық тордың ($\gamma \rightarrow \alpha$) қайта құрылуы, көміртектің қайта бөлінуі және карбидтердің бөлінуі. Бейниттік түрлену бірнеше рет зерттелгеніне қарамастан, оның механизмі әлі күнге дейін даулы күйінде қалып отыр [16].

Келесі маңызды мәселелер даулы болып табылады: 1) жақтарында центрленген кубтық торды көлемді-орталықтандырылған куб торына айналдыру механизмі (кристалдық торлардың қайта құрылуында диффузиялық және диффузиясыз механизмдер қарастырылады); 2) көміртектің қайта бөлінуіне және көміртегімен қаныққан ферриттің пайда болуына әкелетін көміртегі диффузиясының рөлі; 3) карбидтің қай фазадан — аустениттен бе, әлде ферриттен бе — бөлінетіні (карбидтердің ферриттен бөлінетініне дәлелдер болғанымен, бұл мәселе бойынша ғылыми пікірталастар жалғасуда).

Көптеген зерттеушілер ферриттің аустениттен мартенситтік механизм бойынша түзілетінін алға тартады. Мұны келесі деректер дәлелдейді:

1) жылтырлатылған бетте рельефтің пайда болуы;

- 2) бейниттік түрленуден кейін қалдық аустениттің болуы;
- 3) төменгі бейнит пен жібітілген мартенситтің микроструктураларының ұқсастығы;
- 4) жоғарғы бейнит пен аз көміртекті мартенситтің микроструктураларының ұқсастығы.

Бейниттік түрлену механизмі перлиттік (диффузиялық) те, мартенситтік (диффузиясыз) те түрленудің белгілеріне ие. Бұл түрленудің салыстырмалы түрде төмен температурада ($\sim 500-250^{\circ}\text{C}$) жүруімен түсіндіріледі. Мұндай жағдайда темір атомдарының диффузиясы баяулайды, ал көміртек атомдарының диффузиясы салыстырмалы түрде оңай өтеді. Бұл құбылыс темірдің атомдық радиусы $r_{\text{Fe}}=0,127\text{nm}$ және көміртектің атомдық радиусы $r_{\text{C}}=0,077\text{nm}$ арасындағы айырмашылықпен (шамамен екі есе) түсіндіріледі [17]. Осы ерекшелік бейниттік түрленуді мартенситтік және перлиттік түрленулерден принципті түрде ажыратады. Оның нәтижесінде бейнит түзіледі – ол көміртекпен сәл артық қаныққан α -тұрақты қатты ерітіндіден (ферриттен) және карбид бөлшектерінен тұратын құрылым болып табылады.

Металлографиялық зерттеулер жоғары үлкейткіштермен жүргізілгенде жоғарғы және төменгі бейнит құрылымдарының бір-бірінен айырмашылығы бар екенін көрсетеді. Жоғарғы бейнит әдетте $\sim 500-350^{\circ}\text{C}$ температуралар аралығында түзіледі және перьелі пішінге ие болады, мұнда карбид бөлшектері перлиттегідей пластинка түрінде емес, оқшауланған жіңішке бөлшектер түрінде бөлінеді (1а-сурет). Төменгі бейнит 350°C -тан мартенситтік түрленудің басталу температурасы M_n ($\sim 260^{\circ}\text{C}$) дейінгі аралықта түзіледі және пластина тәрізді (ине тәрізді) құрылымға ие болады (1б-сурет). Айта кету керек, төменгі бейниттегі карбид бөлшектері α -фаза (феррит) пластинкаларының ішінде орналасады.

Мұқият жүргізілген тәжірибелер бейниттік түрленудің басталуы аустениттегі көміртек атомдарының диффузиялық қайта бөлінуімен сипатталатынын көрсетеді. Бұл аустенитте көміртекке кедей және көміртекке бай аймақтардың түзілуіне әкеледі [18].

Көміртекке кедей аустенит аймақтары ($\gamma \rightarrow \alpha$) түрленуге мартенситтік механизм бойынша ұшырайды. Осы кезде түзілетін аз көміртекті мартенсит бірден босатылып, реекалы типтегі бейнит құрылымын түзеді.

Көміртекке бай аустенит аймақтарында карбид бөлшектері бөлінуі мүмкін, бұл осы аймақтардағы көміртек концентрациясының төмендеуіне және жоғарыда көрсетілген мартенситтік механизм бойынша түрленудің жүруіне себеп болады. α -фаза (феррит) мартенситтік механизм арқылы түзілетінін және оның инелі құрылымын микрошлифтер бетіндегі тән рельефтің пайда болуы дәлелдейді.

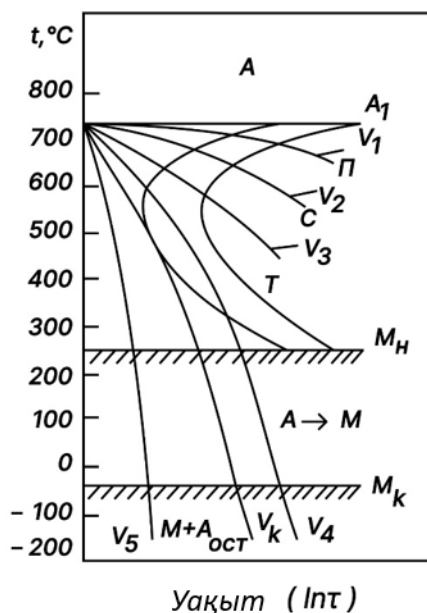
Тәжірибелік зерттеулер көрсеткендей, ($\gamma \rightarrow \alpha$) түрленуден кейін көміртекпен аса қаныққан ферриттен карбид бөлшектері бөлінеді. Жоғарғы және төменгі бейниттің түзілу механизмі, негізінде, бірдей сипатта болады. Айырмашылығы — жоғарғы бейниттің түзілу аймағында алдымен аустенит түйірлерінде көміртек концентрациясының анағұрлым айқын бөлінуі жүреді, бұл аустениттің кейбір аймақтарының көміртекпен едәуір байытылуына және, тиісінше, көміртекке аса кедей ферриттің түзілуіне әкеледі. Осы себепті жоғарғы бейниттің құрылымы ірілеу болады, бұл аустениттен карбидтердің бөлінуімен де байланысты.

Төменгі бейниттің түзілуі кезінде, керісінше, аустениттің көміртекпен байытылуы салыстырмалы түрде аз, ал ферриттің көміртекпен аса қанығуы неғұрлым айқын болады. Бұл карбидтердің феррит кристалдарынан бөлінуіне әкеледі, сондықтан төменгі бейниттің

құрылымы ұсақ түйірлі болады. Бейниттік түрленудің кинетикасы перлиттік түрлену кинетикасына ұқсас, тек инкубациялық кезеңнің болуымен ғана емес, сонымен қатар мартенситтік түрленуге тән маңызды ерекшелігімен де — аустениттің толық жойылуына дейін жетпей, түрленбеген (қалдық) аустениттің сақталуымен сипатталады.

Бейниттік түрлену, перлиттік түрлену сияқты, тек изотермиялық ұстау жағдайында ғана емес, термокинетикалық диаграммаға сәйкес, үздіксіз салқындату кезінде де жүре алады.

Эвтектоидты көміртекті болатты әртүрлі салқындату жылдамдығымен салқындату кезінде түзілетін құрылымдық құрамдастарға салқындату жылдамдығының әсерін көрсететін сызбалық диаграмма 2-суретте берілген. Салқындату жылдамдығы неғұрлым жоғары болып, аустениттің ыдырау температурасы неғұрлым төмен болса, түзілетін феррит-цементиттік құрылым соғұрлым дисперстік болады. Төмен салқындату жылдамдығы кезінде V_1 перлит түзіледі, одан жоғары жылдамдықта V_2 – сорбит, одан да жоғары жылдамдықта V_3 – троостит түзіледі. Көміртекті болатты үздіксіз салқындату кезінде бейнит, әдетте, түзілмейді. Бұл аустениттің ыдырау процесін үздіксіз салқындату жағдайында сипаттау кезінде (аустениттің термокинетикалық диаграммасы) ескерілуі тиіс. Жоғары салқындату жылдамдығы кезінде V_4 аустениттің бір бөлігі M_n (~250°C) температурасына дейін аса суытылады және мартенситке айналады.



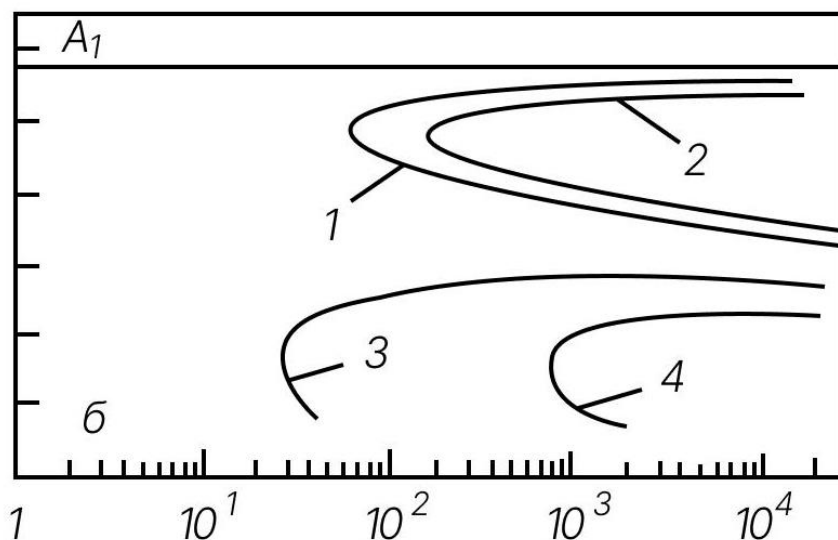
2-сурет. Эвтектоидты болаттың аустенитінің әртүрлі салқындату жылдамдықтарында түрленуінің сызбалық диаграммасы

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [19]

Бұл жағдайда құрылым троостит пен мартенситтен тұрады. Салқындатудың критикалық жылдамдығында аустениттің перлиттік ыдырауы мүмкін болмайды және аустенит тікелей мартенситке айналады V_5 .

Шынықтырудың критикалық жылдамдығы көміртекті және легирленген болаттар үшін бірдей емес және аустениттің тұрақтылығына байланысты. Аустенит неғұрлым тұрақты болса, шынықтырудың критикалық жылдамдығы соғұрлым төмен болады. Көміртекті болаттар жоғары критикалық шынықтыру жылдамдығына ие ($800\text{--}200^\circ\text{C}/\text{с}$). Ең төмен критикалық шынықтыру жылдамдығы эвтектоидты болатта – $0,8\text{ \% C}$ ($200^\circ\text{C}/\text{с}$). Төмен және орта көміртекті болаттарда ($\sim 0,1\text{--}0,6\text{ \% C}$) критикалық жылдамдық айтарлықтай жоғары ($800\text{--}300^\circ\text{C}/\text{с}$).

Легирленген болаттарда бейниттік түрлену перлиттік түрленуден өзгеше. Эксперименттік зерттеулер көрсеткендей, карбид түзетін элементтермен (Cr, W, Mo және т.б.) легирленген және аса суытылған аустениттің жоғары тұрақтылығына ие болаттарда перлиттік ыдыраудың C-қисықтарының астында бейниттік түрленудің басталуы мен аяқталуының C-қисықтары орналасады. 3-суретте көрсетілгендей, көміртегі мөлшері $0,43\text{ \%}$ және хром мөлшері $3,52\text{ \%}$ болатын легирленген болаттың аустенит ыдырау диаграммасында перлиттік және бейниттік түрлену қисықтары температуралық интервалмен бөлінген ($\sim 450\text{--}550^\circ\text{C}$) [16, 18].



3-сурет. Жоғары тұрақтылыққа ие легирленген болат аустенитінің перлиттік және бейниттік түрленуінің температуралық аймақтары (Розе және Петер)
1 – перлиттің түзілуінің басталуы, 2 – перлиттің түзілуінің аяқталуы, 3 – бейниттің түзілуінің басталуы, 4 – перлиттің түзілуінің аяқталуы
Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [20]

Әдіснама

Осы зерттеуде бейниттік (изотермиялық) шынықтыруға көміртекті болат ($0,77\text{ \% C}$) және төмен легирленген 30ХГС маркалы болат (ГОСТ 4543-91) ұшыратылды. Бейниттік шынықтыруға арналған селитралы ваннаның құрамы: $50\text{ \% KNO}_3 + 50\text{ \% NaNO}_3$, балқу температурасы — 220°C , жұмыс температурасы — $240\text{--}550^\circ\text{C}$ аралығында.

Бейниттің қаттылығы Роквелл әдісімен өлшенді, мұнда индентора алмаз конусы қолданылады. Механикалық қасиеттері — беріктік шегі (σ_b , МПа) және салыстырмалы ұзаруы (δ_5 , $\text{\%}$) — Instron 5966 сынау құрылғысында анықталды, сынамалар ГОСТ 1497-94

«Металдар. Созылу кезіндегі сынау әдістері» стандартына сәйкес дайындалды. Соққы тұтқырлығы (KCU, Дж/см²) ГОСТ 9454-78 «Соғу иілуге сынау әдістері» бойынша маятникті соққы қондырғысында анықталды. Электронды-микроскопиялық зерттеулер үшін JEOLJSM-5910 модельді рентгено-энергетикалық анализаторы бар растауыш (сканерлеуші) микроскоп қолданылды, ол нысан бетінің электронды зондпен сканерленуі нәтижесінде кескін қалыптастырады. Қысқа толқынды электрондық сәулелерді қолдану бұл микроскоптардың айыру қабілетін едәуір арттыруға мүмкіндік береді (үлкейту диапазоны 50 000 есеге дейін), құрылымның ұсақ бөлшектерін зерттеуге жол ашады. Бейниттің дисперстілігі (пластинкалар арасындағы арақашықтық — Δ) 350°C және 240°C температураларда өлшенді. Ферриттегі көміртек мөлшерін анықтау бойынша зерттеулер 300°C, 400°C және 723°C температураларда SPECTROLAB Jr^{CCD} ұшқындық спектрометрінде, спектрді ұшқынмен қоздыру арқылы жүргізілді.

Нәтижелер және талқылау

Бейнит перлитке қарағанда беріктірек, оның беріктік қасиеттері температура төмендеген сайын артады. Бұл феррит түйірлерінің ұсақ болуымен, карбидтердің дисперстік бөлінуімен және дислокациялар тығыздығының жоғары болуымен түсіндіріледі.

Өлшеулер көрсеткендей, 0,77 % C мөлшері бар болаттың бейнитінің Роквелл әдісі бойынша қаттылығы 550–300°C температура аралығында төмендеген сайын мынадай түрде өзгереді (1-кесте).

1-кесте. Болат бейнитінің Роквелл әдісі бойынша қаттылығының өзгеруі

T, °C	550	500	400	300
HRC	45	47	49	55

Ескерту: жүргізілген зерттеу негізінде құрастырылған

Осы болатта изотермиялық түрлену кезінде 550–400°C температура аралығында Роквелл бойынша қаттылығы HRC $\approx$ 45–49 болатын жоғарғы бейнит түзіледі, ал 400–300°C аралығында HRC $\approx$ 55 болатын төменгі бейнит қалыптасады. Бейниттегі феррит перлиттегі ферриттен пішіні мен құрамының ерекшелігімен өзгешеленеді: жоғары температурада ол перьелі формада болса, төмен температурада біртіндеп инелі түрге айналады, сондай-ақ құрамында көміртек мөлшері жоғары болады: $\Phi_{\text{п}}$ - 0,025 % C при 723 °C; $\Phi_{\text{ж.б}}$ - 0,10 % C при 400°C; $\Phi_{\text{т.б}}$ - 0,2% C при 300°C.

Бейниттің дисперстілігін перлиттегі сияқты, феррит пен цементиттің екі көршілес пластинасының қалыңдықтарының қосындысы болып табылатын пластинкалар арасындағы арақашықтық — Δ шамасы арқылы сипаттауға болады. 0,77 % C көміртек мөлшері бар болат үшін температура 550°C-тан 400°C-қа өзгергенде пластинкалар арасындағы арақашықтық іс жүзінде өзгермейді — $0,116 \cdot 10^{-3}$ мм-ден $0,110 \cdot 10^{-3}$ мм-ге дейін; ал 350°C-тан 240°C-қа дейін төмендегенде бұл арақашықтық $0,095 \cdot 10^{-3}$ мм-ден $0,080 \cdot 10^{-3}$ мм-ге дейін азаяды. Жоғарыда айтылғандай, температура төмендеген сайын қаттылық үздіксіз артады — 45 HRC-тан 55 HRC-қа дейін. Төменгі бейнит құрылымына ие болаттар мартенситке шынықтырылған болатпен салыстырғанда жоғары тұтқырлыққа

ие, бұл бейниттік (изотермиялық) шынықтыруды қолдануда үлкен практикалық маңызға ие. 550–450°C температура аралығында жоғарғы бейниттің түзілуі болаттың пластикалылығын перлиттік құрылыммен салыстырғанда төмендетеді (2-кесте).

2-кесте. Жоғары көміртекті болаттың механикалық қасиеттерінің аустениттің феррит-цементиттік құрылымға түрлену температурасына тәуелділігі

$T_{пр}, ^\circ C$	350	450	550	650
Құрылымы	Төменгі бейнит	Төменгі + жоғарғы бейнит	Жоғарғы бейнит	Перлит
$\sigma_B, \text{МПа}$	1510	1390	1315	1090
HRC	50	42	45	26
$\delta_5, \%$	14	11	12	18

Ескерту: жүргізілген зерттеу негізінде құрастырылған

Жоғарғы бейниттің пластикалылығының төмендігі феррит түйірлері шекараларында салыстырмалы түрде ірі карбидтердің бөлінуімен байланысты. Аустениттің ыдырауы нәтижесінде аралық түрленудің төменгі аймағында түзілетін бейнит жоғары деңгейдегі механикалық қасиеттерді – беріктік, қаттылық және пластикалылықты – қамтамасыз етеді. Бұл бейнит ферритіндегі көміртек мөлшерінің жоғары болуымен, дислокациялар тығыздығының артуымен және осы фазаның түйірлерінде орналасқан дисперстік карбидтердің түзілуімен түсіндіріледі. Бейниттің ағым шегі феррит түйірлерінің өлшемімен Холл–Петч қатынасы бойынша байланысты, өйткені феррит шекаралары дислокациялардың қозғалысына тиімді тосқауыл болып табылады [21].

Изотермиялық түрлену температурасы бейниттік аралықта төмендеген сайын, α/γ шекарасынан көміртек атомдарының баяу шығуына байланысты феррит түйірлері ұсақ түзіледі. Бұл бейниттің беріктік қасиеттерінің артуының басты себептерінің бірі болып табылады. Ферриттің ішінде орналасқан карбид бөлшектері дислокациялардың қозғалысын неғұрлым тиімді тежейді, егер олардың көлем бірлігіндегі саны көп болса.

Жоғарғы бейнитте карбид бөлшектері негізінен феррит түйірлері шекараларында орналасады, сондықтан олар беріктендіруге айтарлықтай үлес қоспайды. Түрлену температурасы төмендеген сайын карбидтердің дисперстілігі артып, олар негізінен феррит түйірлерінің ішінде орналасады, бұл бейниттің беріктігін арттырады. Бейниттегі феррит эвтектоидтыға дейінгі болаттағы артық ферритпен салыстырғанда дислокациялар тығыздығының жоғары болуымен ерекшеленеді. Ферриттегі дислокациялар көміртек атомдарынан құралған Коттрелл атмосфераларымен бекітіледі және олар беріктендіруге елеулі үлес қосады.

Феррит түйірлері шекараларында орналасқан карбид бөлшектері бейниттің пластикалылығын төмендетеді. Ал төменгі бейнитте карбид бөлшектері α -фазаның ішінде орналасады, бұл жоғары пластикалылықты қамтамасыз етеді [22–24]. Бейниттік құрылым алу бейниттік (изотермиялық) шынықтырудың негізінде жатыр, ол машина жасау болаттарынан (30ХГС, 9ХС, ХВГ) жасалған бөлшектерге беріктік беретін термиялық өңдеуде кеңінен қолданылады. Алайда бейниттік шынықтырудың кемшілігі — ыстық ортада салқындату жылдамдығының төмендігі, бұл оның қолданылуын кіші қималы бұйымдармен шектейді.

Бейниттік шынықтырудың маңызды артықшылықтарының бірі — шынықтыру

кернеулері мен бұйымның деформациясын едәуір төмендету. Мұндай болаттарды бейниттік шынықтыру жоғары соққы тұтқырлығын қамтамасыз етеді және мартенситке шынықтыру мен кейінгі босатумен салыстырғанда ойыққа сезімталдықты күрт азайтады. Сондықтан бейниттік шынықтыру машина жасау болаттарының конструкциялық беріктігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл 30ХГС болатының әдеттегі шынықтыру мен босатудан кейінгі және бейниттік шынықтырудан кейінгі қасиеттерін салыстырған 3-кестедегі деректермен расталады.

3-Кесте. 30ХГС болатының қалыпты және бейниттік шынықтырудан кейінгі қасиеттері

Термиялық өңдеу	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	KCU, Дж/см ²
880 °C суда шынықтыру, 520 °C босату	1100	850	45
Майда шынықтыру, 500 °C босату	1200	1140	78
Майда шынықтыру, 300 °C босату	1630	1520	69
300°C селитрада ұстап 880°C бейниттік шынықтыру	1650	1300	60

Ескерту: жүргізілген зерттеу негізінде құрастырылған

Қорытынды

1. Бейниттік түрлену механизмін талдауда бұрын қолданылған тәсілдер ескірген болып табылады. Практика көрсеткендей, олар бейнит құрылымының ерекшеліктерін анықтап, сандық тұрғыда сипаттауға қабілетсіз. Сондықтан соңғы жылдары бейниттің микроструктурасы мен материал қасиеттері арасындағы өзара байланысты дәлірек сипаттау үшін жоғары айқындықтағы сканерлеуші электрондық микроскоп пен кері электрондық дифракция әдісі қолданылады. Бұл әдістер бейниттің күрделі микроструктурасын жоғары дәлдікпен сипаттауға мүмкіндік береді.

2. Бейниттік түрлену келесі негізгі процестерден тұрады: ($\gamma \rightarrow \alpha$) кристалдық тордың қайта құрылуы; аустениттегі көміртектің атомдарының қайта таралуы; көміртектің қаныққан аустениттен карбидтің бөлінуі. Бейниттік түрлену бірнеше рет зерттелгенімен, оның механизмі әлі күнге дейін даулы болып табылады.

3. Келесі маңызды мәселелер даулы болып табылады: 1) жақтарында центрленген кубтық торды көлемді-орталықтандырылған куб торына айналдыру механизмі (кристалдық торлардың қайта құрылуында диффузиялық және диффузиясыз механизмдер қарастырылады); 2) көміртектің қайта бөлінуіне және көміртегімен қаныққан ферриттің пайда болуына әкелетін көміртегі диффузиясының рөлі; 3) карбидтің қай фазадан — аустениттен бе, әлде ферриттен бе — бөлінетіні (карбидтердің ферриттен бөлінетініне дәлелдер болғанымен, бұл мәселе бойынша ғылыми пікірталастар жалғасуда).

4. Бейнит құрылымы жоғары механикалық қасиеттермен ерекшеленеді: беріктік, пластикалық және тұтқырлық. Перлитпен, сорбитпен және трооститпен салыстырғанда, төменгі бейнит жоғары қаттылық пен беріктікке, сондай-ақ жақсы пластикалық пен тұтқырлыққа ие. Мұндай қасиеттер бейниттің α -фазасында көміртектің мөлшерінің жоғары болуымен, дислокация тығыздығының артуымен және осы фазадағы кристалдардың ішінде дисперстік күйде орналасқан карбидтердің түзілуімен түсіндіріледі.

5. Бейниттік шынықтырудың маңызды артықшылықтарының бірі – қалдық кернеулер мен бұрмаланудың айтарлықтай азаюы, бұл термиялық өңдеу сапасын едәуір арттырады. Сонымен қатар, бейниттік шынықтыру жоғары соққы тұтқырлығын қамтамасыз етіп, мартенситке шынықтырылған және жібітілген болатпен салыстырғанда бұйымның ойыққа сезімталдығын төмендетеді. Бұл болаттың конструкциялық беріктігін арттыруға мүмкіндік береді.

Авторлар қосқан үлесі

М.А. Жақсылымбетова – Концепциялау, Әдістеме, Алғашқы нұсқасын жазу.

А.Т. Қанаев – Деректерді жинақтау, Формальды талдау, Валидация.

Б.У. Байқожаева – Визуализация, Зерттеу, Редакциялау және түзету.

Е.Ю. Ремшев – Ғылыми жетекшілік, Жобаны басқару, Ресурстар.

Әдебиеттер тізімі

1. Kanaev A.T., Bogomolov A.V., Kanaev A.A., Reshotkina E.N. Influence of Intermittent Quenching and Self-Tempering on the Mechanical Properties of Rebar Steel // Steel in Translation. – 2018. – Vol.48(2). – P. 130-134. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218020079> - конференция материалдары
2. Qin X., Cheng C., Li Y., Zhang C., Jin Y., Numerical study on a new swirling flow pocket brick for tundish upper nozzle during continuous casting of steel // Ironmaking& Steelmaking. – 2023. - Vol. 50. – P. 1489-1501. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2023.2266262> - конференция материалдары
3. Jaxymbetova M., Kanayev A., Kossanova I., Mazur I., Akhmedyanov A., Kirgizbayeva K. Improvement of the Mechanical Properties of Reinforcing Bar Steel by Combined Deformation-Heat Treatment // International Review of Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 16(9). – P. 460–466. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i9.21521> - конференция материалдары
4. Zhakupova A., Zhakupov A., Bogomolov A. Research of Initial Billets Structure for Seamless Pipe Production // International Review of Mechanical Engineering. - 2024. – Vol. 18. – P. 50-61. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v18i8.25704> - конференция материалдары
5. Jayakrishna P., Chakraborty S., Ganguly S. and Talukdar P. Modelling of thermofluidic behaviour and mechanical deformation in thin slab continuous casting of steel: an overview // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2021. - Vol. 60. – P. 320-349. DOI: <https://doi.org/10.1080/00084433.2021.2014712> - конференция материалдары
6. Furumai K., Aramaki N., Oikawa K. Influence of heat flux different between wide and narrow face in continuous casting mould on unevenness of hypo-peritectic steel solidification at off-corner // Ironmaking& Steelmaking. – 2022. - Vol. 49. - P. 845-859. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2063654> - конференция материалдары
7. Allaoui A., Guedri A., Darsouni L., Belyamna M. Fracture Mechanisms of C-Mn(V-Nb-Ti) Microalloyed Steel Under a Decreasing Temperature Cycle // International Review of Mechanical Engineering (IREME). – 2023. – Vol. 17(10). – P. 495-501. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v17i10.23853> - конференция материалдары
8. Fadeev V., Kondrushin A. Special aspects of determining parameters for continuous deformation of pipe billets for the specified pipes size range // Materials Today:

- Proceedings. 2021. - Vol. 38. – P. 1322-1325.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.093> - конференция материалдары
9. Murillo-Marrodán A., Gamin Y., Kaputkina L., García E., Aleshchenko A., Derazkola H., Pashkov A., Belokon E. Microstructural and mechanical analysis of seamless pipes made of superaustenitic stainless steel using cross-roll piercing and elongation // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. - Vol. 7(5). – P. 700-707.
DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7050185> - конференция материалдары
10. Shahidul M. I., Malcolm M. L., Hashmi M.S.J., Alhaji M. H. Waste resources recycling in achieving economic and environmental sustainability: review on wood waste industry // Proc. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2020. – P. 964-975. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11275-5> - конференция материалдары
11. Wu X., Chen L., Li H., Xu J. Experimental study of the mechanical properties of reinforced concrete compression members under the combined action of sustained load and corrosion // Construction and Building Materials. – 2019. - Vol. 202. – P. 11-22.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.156> - конференция материалдары
12. Joshua O., Olusola K. O., Oyeyemi K. D., Ogunde A. O., Amusan L. M., Nduka D. O. Data of the properties of rebar steel brands in Lagos // Nigerian market used in reinforced concrete applications, Data in Brief. 2018. - Vol. 17. – P. 1428-1431.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.01.083> - конференция материалдары
13. Kanaev A. T., Bogomolov A. V., Kanaev A. A., Reshotkina E. N. Influence of intermittent quenching and self-tempering on the mechanical properties of rebar steel // Steel in Translation. – 2018. - Vol. 48(2). – P.130-134.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218020079> - конференция материалдары
14. Alhassan M., Al-Rousan R., Hejazi M. Novel Nonlinear Model for Analysis of RC Slabs with Various Boundary Conditions Under Monotonic Loading // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2018. – Vol.9(6). – P.218-233.
DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v9i6.15558> - конференция материалдары
15. Ahmed, A., Ali, M., Abbas, A. Recycling of Disposal Syringe Needles to Produce Fiber Reinforced Concrete // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2018. – Vol. 9 (4). – P. 148-153. DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v9i4.15275> - конференция материалдары
16. Ali A., Chiang Y.W., Santos R.M. X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization // A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. Minerals. – 2022. – Vol. 12(2), 205. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12020205> - конференция материалдары
17. Kanayev A.T., Jaxymbetova M.A., Kossanova I.M. Quantitative assessment of the yield stress of ferrite-pearlitic steels by structure parameters // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences This link is disabled. – 2021. – Vol. 3(447). – P. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.64> - конференция материалдары
18. Lahtin YU.M. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals] (Moscow: Metallurgiya, 1984, 360 p.) [in Russian] - кітап
19. Al-Quraishi H., Abdulkhudhur R., Abdulazeez A. Shear Strength Behavior of Fiber

- Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2021. – Vol. 12 (5). – P. 314-322.
DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v12i5.19972> - конференция материалдары
20. Gadalov, V. N. Metallografiya metallov, poroshkovykh materialov i pokrytij, poluchennykh elektroiskrovymi sposobami [Metallography of Metals, Powder Materials and Coatings Obtained by Spark Discharge Methods] (Moscow: Infra-M, 2011, 468 p.) [in Russian] - кітап
21. Sapountzakis E. An Improved Model for the Analysis of Plates Stiffened by Parallel Beams Including Creep and Shrinkage Effects: Application to Concrete or to Composite Steel-Concrete Structures // International Journal on Engineering Applications (IREA). 2018. – Vol. 6 (2). P. 57-70. DOI: <https://doi.org/10.15866/irea.v6i2.15377> - конференция материалдары
22. Kanaev A.T., Muhambetov D.G., Kanaev A.A. Mekhanizmy uprochneniya ferrito-perlitnykh stalej [Mechanisms of Strengthening of Ferrite-Pearlite Steels] // Aktualnye problemy mashinostroeniia i metallurgii: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Actual Problems of Mechanical Engineering and Metallurgy: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference] (Almaty, 2002, pp. 14–18) [conference proceedings, in Russian] - конференция материалдары
23. Achamyelch T., Sahin Y. Investigation of mechanical properties of ribbed reinforcement steel bars. a case study on ethiopian construction industry // International Journal of Steel Structures. 2019. – Vol. 19(5). – P.1682-1693. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00236-0> - конференция материалдары
24. Sangmin S., Seungchan C., Donghyun L., Yangdo K., Sang-Bok L., Sang-Kwan L., Ilguk J. Microstructural evolution and strengthening mechanism of sic/al composites fabricated by a liquid-pressing process and heat treatment // Materials. 2019. Vol. 12(20). P.3374. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12203374> - конференция материалдары

**М.А. Джаксымбетова^{*1}, А.Т. Канаев¹, Б.У. Байхожаева¹,
Е.Ю. Ремшев²**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Д.Ф. Устинов атындағы «ВОЕНМЕХ» Балтық мемлекеттік техникалық университеті,
Санкт-Петербург, Ресей

О механизме бейнитного превращения и качестве термоупрочнения машиностроительных сталей с бейнитной структурой

Аннотация. В традиционных методах анализа структур бейнита использовались устаревшие подходы, с помощью которых сложно идентифицировать и количественно характеризовать особенности структур бейнитного превращения. Поэтому в последние годы структура бейнита изучается с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения и метода обратной дифракции электронов. Эти методы позволяют характеризовать различные типы бейнитных микроструктур с высокой точностью. В работе приведены краткий анализ исследований механизма бейнитного превращения последних лет и экспериментальные результаты, полученные авторами при бейнитной закалке в машиностроительных сталях. Подчеркнуто, что несмотря на неоднократные

исследования механизм бейнитного превращения все еще остается дискуссионным. Спорными являются механизм превращения ГЦК решетки в ОЦК, роль диффузии углерода, приводящая к его перераспределению и образованию феррита, пересыщенного углеродом, а также процессы выделения карбидов. Бейнит обеспечивает высокий уровень качественных показателей механических свойств: прочности, пластичности и вязкости. По сравнению с перлитом, сорбитом и трооститом нижний бейнит имеет более высокую твердость и прочность при высокой пластичности и вязкости. Это объясняется повышенным содержанием углерода в феррите и большей плотностью дислокации в бейните, а также образованием дисперсных карбидов.

Ключевые слова: ($\gamma \rightarrow \alpha$) превращение, кинетика, механизм, распад аустенита, изотермический, термокинетический, микроструктура.

**M.A. Jaxsymbetova*¹, A.T. Kanaev¹, B.U. Baikhozhayeva¹,
E.Yu. Remshev²**

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Baltic State Technical University "VOENMECH" named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia

On the mechanism of bainitic transformation and the quality of heat treatment in engineering steels with a bainitic structure

Abstract. Traditional approaches to analyzing bainitic structures often rely on outdated methods, which pose challenges for the accurate identification and quantitative characterization of the features of bainitic transformation. In recent years, therefore, high-resolution scanning electron microscopy and electron backscatter diffraction (EBSD) techniques have been increasingly employed to study bainite structures. These advanced methods enable precise characterization of various types of bainitic microstructures. This paper presents a brief review of recent studies on the mechanism of bainitic transformation, along with the authors' own experimental findings from bainitic hardening of engineering steels. It is emphasized that, despite numerous investigations, the bainitic transformation mechanism remains a subject of ongoing debate. Unresolved issues include the transformation of the face-centered cubic (FCC) lattice into body-centered cubic (BCC), the role of carbon diffusion leading to its redistribution and the formation of carbon-supersaturated ferrite, as well as the processes of carbide precipitation. Bainite provides a high level of mechanical performance in terms of strength, ductility, and toughness. Compared to pearlite, sorbite, and troostite, lower bainite exhibits higher hardness and strength while maintaining excellent ductility and toughness. These properties are attributed to the higher carbon content in ferrite, increased dislocation density in bainite, and the formation of fine carbide precipitates.

Keywords: ($\gamma \rightarrow \alpha$) transformation, kinetics, mechanism, austenite decomposition, isothermal, thermokinetic, microstructure.

References

1. Kanaev A.T., Bogomolov A.V., Kanaev A.A., Reshotkina E.N. Influence of Intermittent

- Quenching and Self-Tempering on the Mechanical Properties of Rebar Steel // Steel in Translation. – 2018. – Vol.48(2). – P. 130-134.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218020079>
2. Qin X., Cheng C., Li Y., Zhang C., Jin Y., Numerical study on a new swirling flow pocket brick for tundish upper nozzle during continuous casting of steel // Ironmaking& Steelmaking. – 2023. – Vol. 50. – P. 1489-1501. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2023.2266262>
 3. Jaxymbetova M., Kanayev A., Kossanova I., Mazur I., Akhmedyanov A., Kirgizbayeva K. Improvement of the Mechanical Properties of Reinforcing Bar Steel by Combined Deformation-Heat Treatment // International Review of Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 16(9). – P. 460–466. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i9.21521>
 4. Zhakupova A., Zhakupov A., Bogomolov A. Research of Initial Billets Structure for Seamless Pipe Production // International Review of Mechanical Engineering. – 2024. – Vol. 18. – P. 50-61. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v18i8.25704>
 5. Jayakrishna P., Chakraborty S., Ganguly S. and Talukdar P. Modelling of thermofluidic behaviour and mechanical deformation in thin slab continuous casting of steel: an overview // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2021. – Vol. 60. – P. 320-349.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00084433.2021.2014712>
 6. Furumai K., Aramaki N., Oikawa K. Influence of heat flux different between wide and narrow face in continuous casting mould on unevenness of hypo-peritectic steel solidification at off-corner // Ironmaking& Steelmaking. – 2022. – Vol. 49. – P. 845-859.
DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2063654>
 7. Allaoui A., Guedri A., Darsouni L., Belyamna M. Fracture Mechanisms of C-Mn(V-Nb-Ti) Microalloyed Steel Under a Decreasing Temperature Cycle // International Review of Mechanical Engineering (IREME). – 2023. – Vol. 17(10). – P. 495-501.
DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v17i10.23853>
 8. Fadeev V., Kondrushin A. Special aspects of determining parameters for continuous deformation of pipe billets for the specified pipes size range // Materials Today: Proceedings. 2021. – Vol. 38. – P. 1322-1325.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.093>
 9. Murillo-Marrodán A., Gamin Y., Kaputkina L., García E., Aleshchenko A., Derazkola H., Pashkov A., Belokon E. Microstructural and mechanical analysis of seamless pipes made of superaustenitic stainless steel using cross-roll piercing and elongation // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7(5). – P. 700-707.
DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7050185>
 10. Shahidul M. I., Malcolm M. L., Hashmi M.S.J., Alhaji M. H. Waste resources recycling in achieving economic and environmental sustainability: review on wood waste industry // Proc. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2020. – P. 964-975. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11275-5>
 11. Wu X., Chen L., Li H., Xu J. Experimental study of the mechanical properties of reinforced concrete compression members under the combined action of sustained load and corrosion // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 202. – P. 11-22.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.156>
 12. Joshua O., Olusola K. O., Oyeyemi K. D., Ogunde A. O., Amusan L. M., Nduka D. O. Data of the properties of rebar steel brands in Lagos // Nigerian market used in reinforced concrete applications, Data in Brief. 2018. – Vol. 17. – P. 1428-1431.

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.01.083>
13. Kanaev A. T., Bogomolov A. V., Kanaev A. A., Reshotkina E. N. Influence of intermittent quenching and self-tempering on the mechanical properties of rebar steel // Steel in Translation. – 2018. – Vol. 48(2). – P.130-134.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218020079>
 14. Alhassan M., Al-Rousan R., Hejazi M. Novel Nonlinear Model for Analysis of RC Slabs with Various Boundary Conditions Under Monotonic Loading // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2018. – Vol.9(6). – P.218-233.
DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v9i6.15558>
 15. Ahmed, A., Ali, M., Abbas, A. Recycling of Disposal Syringe Needles to Produce Fiber Reinforced Concrete // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2018. – Vol. 9 (4). – P. 148-153. DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v9i4.15275>
 16. Ali A., Chiang Y.W., Santos R.M. X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization // A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. Minerals. – 2022. – Vol. 12(2), 205. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12020205>
 17. Kanayev A.T., Jaxymbetova M.A., Kossanova I.M. Quantitative assessment of the yield stress of ferrite-pearlitic steels by structure parameters // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences This link is disabled. – 2021. – Vol. 3(447). – P. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.64>
 18. Lahtin YU.M. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals] (Moscow: Metallurgiya, 1984, 360 p.) [in Russian]
 19. Al-Quraishi H., Abdulkhudhur R., Abdulazeez A. Shear Strength Behavior of Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2021. – Vol. 12 (5). – P. 314-322. DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v12i5.19972>
 20. Gadalog, V. N. Metallografiya metallov, poroshkovykh materialov i pokrytij, poluchennykh elektroiskrovymi sposobami [Metallography of Metals, Powder Materials and Coatings Obtained by Spark Discharge Methods] (Moscow: Infra-M, 2011, 468 p.) [in Russian]
 21. Sapountzakis E. An Improved Model for the Analysis of Plates Stiffened by Parallel Beams Including Creep and Shrinkage Effects: Application to Concrete or to Composite Steel-Concrete Structures // International Journal on Engineering Applications (IREA). 2018. – Vol. 6 (2). P. 57-70. DOI: <https://doi.org/10.15866/irea.v6i2.15377>
 22. Kanaev A.T., Muhambetov D.G., Kanaev A.A. Mekhanizmy uprochneniya ferrito-perlitnykh stalej [Mechanisms of Strengthening of Ferrite-Pearlite Steels] // Aktualnye problemy mashinostroeniia i metallurgii: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Actual Problems of Mechanical Engineering and Metallurgy: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference] (Almaty, 2002, pp. 14–18) [conference proceedings, in Russian]
 23. Achamyeleh T., Sahin Y. Investigation of mechanical properties of ribbed reinforcement steel bars. a case study on ethiopian construction industry // International Journal of Steel Structures. 2019. – Vol. 19(5). – P.1682-1693. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00236-0>
 24. Sangmin S., Seungchan C., Donghyun L., Yangdo K., Sang-Bok L., Sang-Kwan L., Ilguk J. Microstructural evolution and strengthening mechanism of sic/al composites fabricated by

a liquid-pressing process and heat treatment // Materials. 2019. Vol. 12(20). P.3374. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12203374>

Авторлар туралы мәлімет

Джаксымбетова М.А. - хат-хабар авторы, философия докторы (PhD), Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының аға оқытушысы

Канаев А.Т. - т.ғ.д., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының профессоры

Байхожаева Б.У. - т.ғ.д., профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының меңгерушісі

Ремшев Е.Ю. - т.ғ.к., Д.Ф.Устинов атындағы «ВОЕНМЕХ» Балтика мемлекеттік техникалық университетінің доценті, Красноармейская көшесі, 1, 190005, Санкт-Петербург, Ресей.

Джаксымбетова М.А. - автор для корреспонденции, доктор философии (PhD), старший преподаватель кафедры "Стандартизация, сертификация и метрология" Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева"

Канаев А.Т. - д.т.н., профессор кафедры "Стандартизация, сертификация и метрология" Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева

Байхожаева Б.У. - д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Стандартизация, сертификация и метрология» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева

Ремшев Е.Ю. - к.т.н., доцент БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, улица Красноармейская, 1, 190005, Санкт-Петербург, Россия.

Jaxymbetova M.A. - corresponding author, PhD, Senior Lecturer of the Department of Standardization, Certification and Metrology, L.N. Gumilyov Eurasian National University

Kanayev A.T. - d.t.s., Professor of the Department of Standardization, Certification and Metrology, L.N. Gumilyov Eurasian National University

Baikhozhayeva B.U. - d.t.s., professor, head of the Department of Standardization, Certification and Metrology, L.N. Gumilyov Eurasian National University

Remshev Ye. U.- c.t.s., associate professor of the BSTU "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov, Krasnoarmeiskaya str., 1, 190005, Saint Petersburg, Russia.



Copyright: © 2025 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/>).



МРНТИ 67.09

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-247-256>

Оценка влияния модифицированной добавки на физико-механические свойства инъекционных растворов

Ж.Б. Жантлесова *, Р.Е. Лукпанов , А.Д. Алтынбекова ,
Д.В. Цигулев , А. Е. Джексембаева 

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

E mail: proyekt.2022@bk.ru

Аннотация. Целью данного исследования является оценка влияния модифицированной добавки, содержащей парафиновый компонент, на физико-механические свойства инъекционных растворов, применяемых для глубокой цементации грунтов. Применение инъекционных растворов широко используется в практике геотехнического строительства, особенно при необходимости укрепления слабых и водонасыщенных грунтов. Качество и долговечность упрочнения во многом зависят от состава раствора и его устойчивости в процессе твердения. В ходе лабораторных испытаний при различной концентрации добавки (от 0,2 до 1,0%) были исследованы такие ключевые параметры, как подвижность смеси, склонность к водоотделению и прочностные характеристики полученного материала. Результаты экспериментов показали, что введение парафиновой добавки способствует повышению подвижности раствора, облегчает процесс его инъекции, одновременно снижает водоотделение и обеспечивает более равномерное распределение смеси в грунтовом массиве. Кроме того, наблюдалось заметное увеличение механической прочности по сравнению с контрольными образцами.

Оптимальный диапазон концентраций добавки, определённый в ходе исследований, составил 0,6–0,8%. Такой состав обеспечивает наилучший баланс между улучшенными свойствами раствора и его стабильностью. Полученные данные подтверждают возможность практического применения данной добавки для повышения эффективности цементации грунтов в сложных инженерно-геологических условиях.

Ключевые слова: Модифицированная добавка, стабилизация грунта, цементно-песчаный раствор, парафин, механические свойства

Введение

Глубинная цементация является одним из наиболее эффективных методов укрепления слабых грунтов, особенно в условиях сложной геологической обстановки [1]. Этот метод активно используется в строительстве транспортной и промышленной инфраструктуры, при стабилизации склонов и защите от оползней [2]. Однако традиционные цементные растворы подвержены расслоению и снижению прочности из-за высокой пористости и водоотделения [3].

Современные исследования показывают, что модифицированные добавки, такие как наночастицы и полимеры, значительно улучшают механические свойства растворов. Однако применение парафиновых компонентов в инъекционных растворах остается малоизученным направлением, несмотря на их потенциал для повышения пластичности и снижения водоотделения [4]. История метода глубинной цементации уходит корнями в начало XX века, когда инженеры впервые начали применять инъекционные растворы для стабилизации оснований зданий и инфраструктурных объектов. Первоначально использовались простые цементные смеси, однако с развитием науки и технологий начали появляться различные модифицированные добавки, направленные на улучшение механических свойств растворов. В середине XX века активно исследовались полимерные и химические добавки, а в XXI веке на смену им пришли наноматериалы и биоактивные компоненты, повышающие прочность и долговечность укрепленных грунтов.

Современные исследования в области глубинной цементации показывают, что применение модифицированных добавок позволяет добиться значительного улучшения характеристик инъекционных растворов. В странах с высокой сейсмической активностью, таких как Япония и США, цементные растворы с нанодобавками и полимерами стали стандартной практикой. Например, исследования Университета Токио показали, что введение наночастиц диоксида кремния увеличивает плотность и прочность инъекционного цементного камня на 15-20%. В аналогичных работах, проведенных в США, использование полимерных добавок позволило снизить усадку и водоотделение растворов, что улучшает их долговечность. Сравнивая существующие исследования, можно отметить, что применение парафиновых компонентов в инъекционных растворах до сих пор остается малоизученной областью. В отличие от наноматериалов и полимеров, парафин позволяет улучшить подвижность растворов, снижая риск их расслоения. Однако исследования в данном направлении ограничены, что обуславливает актуальность данной работы. Введение парафиновой добавки в цементный раствор может стать альтернативным решением для укрепления слабых грунтов в различных климатических и геологических условиях [5]. Цель исследования – оценить влияние модифицированной добавки на основе парафинового компонента на физико-механические свойства инъекционных растворов, применяемых для метода глубокой цементации, и определить оптимальный диапазон концентраций для повышения эффективности укрепления грунтов.

Методология

Для анализа эффективности модифицированной добавки были проведены лабораторные испытания подвижности, сроков схватывания, прочности на сжатие и изгиб, а также водоотделения инъекционного раствора. Методика определения подвижности выполнена по ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения подвижности»,

водоотделения – по ГОСТ 310.6-85 «Цементы. Методы определения водоотделения» [6]. Контрольным образцом являлся цементный раствор без добавки. Контрольный образец без добавки показал водоотделение 10,5%, что соответствует условно-стабильному состоянию. Введение добавки в количестве 0,2% снизило водоотделение до 9,1%, а при 0,6% – до 7,7%, что соответствует переходу в категорию стабильных растворов. В отличие от полимеров, парафиновые компоненты обеспечивают снижение водоотделения без изменения прочности. Это объясняется формированием гидрофобной пленки на границах цементных частиц, что уменьшает скорость выделения свободной воды.

Методологическая основа исследований включала:

- Проведение испытаний на подвижность методом расплыва конуса:
- Испытания проводились в соответствии с Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения подвижности» [7]. Метод заключается в измерении диаметра расплыва цементного раствора при его нанесении на гладкую поверхность.
 - Использовался стандартный металлический конус с высотой 300 мм и диаметром основания 100 мм.
 - Раствор замешивался в течение 3 минут и выливался через конус на стеклянную пластину.
 - После удаления конуса измерялся диаметр расплыва раствора в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а затем рассчитывалось среднее значение.
 - Эксперименты проводились на растворах с различным содержанием добавки (0,2–1,0%) и контролем водоцементного отношения (0,3–0,5).
 - Анализ результатов позволил выявить влияние добавки на текучесть и пластичность раствора [9]



Рисунок 1. Характеристики испытания на проницаемость

Анализ водоотделения с использованием стандартной методики фильтрации. Для

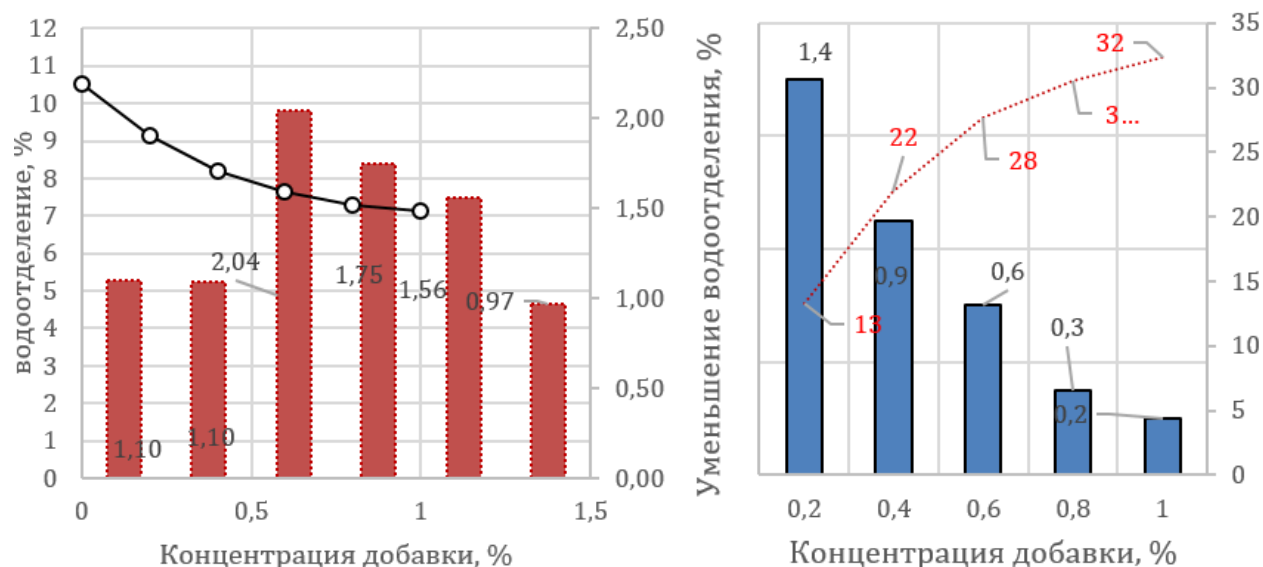
определения степени водоотделения инъекционного раствора были проведены испытания с использованием стандартной методики фильтрации, соответствующей ГОСТ 310.6 «Цементы. Методы определения водоотделения» [8].

Методика включает:

- Приготовление контрольных образцов раствора с различными концентрациями добавки (0,2–1,0%).
- Заливку смеси в мерные цилиндры объемом 500 мл.
- Удержание смеси в статичном состоянии при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 3 часов.
- Измерение объема выделенной воды с последующим расчетом процентного содержания водоотделения.

На рисунке 2 показаны результаты испытаний цементных образцов на водоотделение. На рисунке 2А по оси абсцисс показано процентное содержание добавки в растворе, по оси ординат водоотделение и коэффициенты вариаций каждой серии испытаний определенного процентного содержания добавки.

На рисунке 2Б по оси ординат показаны значения уменьшения водоотделения при пошаговом увеличении добавки в составе смеси, а также процентное снижение показателя водоотделения относительно контрольного образца (смеси без добавки).



А – Контрольные образцы

В – Смесь 0,2% добавок

Рисунок 2. Результаты измерения прочности образцов на сжатие

Результаты и Обсуждение

- Контрольный образец без добавки показал водоотделение 10,5%, что соответствует условно-стабильному состоянию раствора.
- Добавка в концентрации 0,2% снизила водоотделение до 9,1%.

- При концентрации 0,4% водоотделение составило 8,2%, что является нижней границей условно-стабильных растворов.
 - При концентрации 0,6% водоотделение уменьшилось до 7,7%, что свидетельствует о переходе в категорию стабильных растворов.
 - При концентрации 0,8% водоотделение составило 7,3%, а при 1,0% – 7,1%, что показывает минимальный эффект при дальнейших увеличениях концентрации добавки.
- Подвижность раствора: Добавка увеличивает расплыв конуса раствора с 150 мм (контрольный образец) до 187 мм при максимальной концентрации 1,0%.
- Максимальный прирост подвижности наблюдается при концентрации 0,6%.
- При дальнейшем увеличении концентрации эффект насыщения снижает динамику увеличения подвижности.

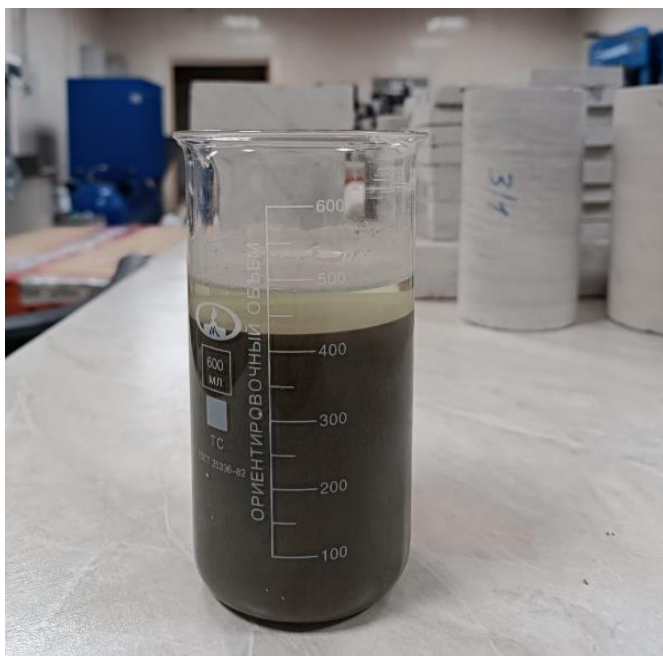


Рисунок 3. Результаты измерения водоотделение

Водоотделение: контрольный образец показал водоотделение 10,5%.

При добавке 0,6% водоотделение снизилось до 7,7%, что соответствует стабильным растворам.

Дальнейшее увеличение концентрации добавки незначительно снижает водоотделение, но не оказывает значимого эффекта.

Данные результаты согласуются с исследованиями в области модифицированных цементных растворов. Например, исследования Казахского научно-исследовательского института строительных материалов показали, что применение гидрофобных добавок на основе полимерных компонентов снижает водоотделение цементных смесей до 6-7%, однако при этом возможны изменения в прочностных характеристиках. В отличие от полимерных добавок, парафиновые компоненты позволяют добиться схожего эффекта без значительного изменения прочности.

Анализ данных показал, что наиболее эффективная концентрация добавки для уменьшения водоотделения без существенного влияния на прочностные характеристики составляет 0,6–0,8%. При дальнейшем увеличении концентрации наблюдается снижение эффекта, что свидетельствует о достижении предела влияния парафиновой добавки на этот показатель.

Исследования показывают, что введение модифицированной добавки на основе парафинового компонента положительно влияет на физико-механические свойства инъекционных растворов. Оптимальная концентрация добавки составляет 0,6–0,8%, поскольку при этом достигается баланс между повышением подвижности, снижением водоотделения и увеличением прочностных характеристик.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния добавки на долговечность раствора и его взаимодействие с различными типами грунтов.

Применение инновационных материалов и технологий, таких как наночастицы и геополимерные компоненты, может значительно повысить эффективность цементных растворов в строительстве, а также снизить их воздействие на окружающую среду. Это открывает перспективы для дальнейших исследований и совершенствования методик глубокой цементации грунтов.

Заключение

Установлено, что модифицированная добавка на основе парафинового компонента оказывает комплексное влияние на свойства инъекционных растворов, повышая их подвижность и снижая водоотделение.

Выявлен диапазон оптимальной концентрации добавки (0,6–0,8%), при котором достигается баланс между повышением подвижности и устойчивостью структуры раствора.

Полученные результаты позволяют рекомендовать применение добавки для повышения эффективности глубокой цементации слабых грунтов в сложных инженерно-геологических условиях.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант BR21882278 «Создание строительно-технического инжинирингового центра по оказанию полного цикла аккредитованных услуг строительного, дорожно-строительного сектора Республики Казахстан»).

Вклад авторов.

Жибек Жантлесева — методология, ресурсы, сбор данных, тестирование, моделирование, анализ.

Рауан Лукпанов — концепция, методология, анализ.

Алтынбекова Алия — анализ, интерпретация, составление.

Денис Цигулев — сбор данных, визуализация, тестирование.

Джексембаева Асель — редактирование.

Список литературы

1. А. Алтынбекова, Р. Лукпанов, С. Енкебаев, Д. Цыгулев, М. Нурбаева, Комплексные лабораторные исследования влияния модифицированных добавок на физико-

- механические свойства бетона, *International Journal of GEOMATE*, Том 23, Выпуск 100, стр. 26–33 (декабрь, 2022). – журнал
2. А. Алдунгарова, А. Мухамеджанова, Н. Алибекова, С. Караулов, Д. Ахметов, Методология геотехнической интерполяции для определения промежуточных значений свойств грунта, *Technobius*, Том 4, № 1, стр. 0053 (2024). – журнал
3. ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения подвижности, Москва: Стандартиздат, https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30039052 – ГОСТ
4. Н. Консоли, Ф. Роса, Р. Круз, Роль добавок в улучшении характеристик цементных инъекционных растворов, *Cement and Concrete Research*, стр. 1257–1278, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.10.004> (2011). – журнал
5. Р. Лукпанов, Д. Цыгулёв, Ж. Жантлесова, А. Алтынбекова, С. Енкебаев, М. Кожахмет, Подбор эквивалентного материала для испытаний грунта с использованием свай на модельном стенде, *International Journal of GEOMATE*, стр. 33–41 (2024). – журнал
6. ГОСТ 310.6-85 «Цементы. Методы определения водоотделения», <https://meganorm.ru/Data1/3/3534/index.htm> – ГОСТ
7. ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения подвижности», <https://meganorm.ru/Index2/1/4294853/4294853167.htm> – ГОСТ
8. ГОСТ 310.6 «Цементы. Методы определения водоотделения», <https://meganorm.ru/Data/738/73884.pdf> – ГОСТ
9. Ж. Жантлесова, Р. Е. Лукпанов, Д. Дусембинов, Д. В. Цыгулёв, С. Б. Енкебаев, М. Каракасу, Влияние парафинового воска на подвижность цементных инъекционных растворов, *Technobius*, Том 5, № 2, статья 0080 (2025), DOI: <https://doi.org/10.54355/tbus/5.2.2025.0080> – журнал

Ж.Б. Жантлесова*, Р.Е. Лукпанов, А.Д. Алтынбекова,

Д.В. Цигулев, А.Е. Джексембаева

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

Модификацияланған қоспаның инъекциялық ерітінділердің физика-механикалық қасиеттеріне әсерін бағалау

Аңдатпа. Бұл зерттеудің мақсаты – парафин компонентін қамтитын модификацияланған қоспаның топырақты тереңдетіп цементациялау үшін қолданылатын инъекциялық ерітінділердің физика-механикалық қасиеттеріне әсерін бағалау. Зертханалық сынақтар барысында қоспаның әртүрлі концентрацияларында (0,2–1,0%) қоспаның жылжымалылығы, су бөлуі және ерітіндінің беріктік сипаттамалары зерттелді. Зерттеу нәтижелері қоспаны енгізу ерітіндінің жылжымалылығын арттыратынын, су бөлінуін азайтатынын және оның механикалық беріктігін жоғарылататынын көрсетті. Эксперимент барысында анықталған қоспаның оңтайлы концентрация диапазоны 0,6–0,8% құрады, бұл ерітінді қасиеттерін жақсарту мен оның тұрақтылығын сақтаудың оңтайлы тепе-теңдігін қамтамасыз етеді. Зерттеу барысында алынған деректер күрделі геологиялық жағдайларда топырақты нығайту тиімділігін арттыру үшін осы қоспаны

қолдануды ұсынуға сенімді негіз береді.

Түйін сөздер: Модификацияланған қоспа, топырақты тұрақтандыру, цемент-құм ерітіндісі, парафин, механикалық қасиеттер

Zh.B. Zhantlessova*, R.E. Lukpanov, A.D. Altynbekova, D.V. Tsigulev, A.E. Jeksembayeva

¹ *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

Evaluation of the Effect of a Modified Additive on the Physico-Mechanical Properties of Injection Grouts

Abstract. The aim of this study is to evaluate the effect of a specially modified additive containing a paraffin component on the physico-mechanical properties of injection grouts used for deep soil cementation. Soil reinforcement by injection grouting is a widely applied technique in geotechnical engineering, particularly in conditions where conventional methods are limited due to high groundwater levels or unstable soils. Improving the performance characteristics of grouts can significantly enhance the reliability and durability of soil stabilization. In this research, a series of laboratory experiments was conducted to determine how different concentrations of the additive (ranging from 0.2% to 1.0% by weight) influence key parameters of the grout mixture, including workability, bleeding tendency, and strength development. The experimental results demonstrated that the introduction of the paraffin-based additive leads to increased workability of the grout mixture, which facilitates injection and improves penetration into fine soil pores. At the same time, bleeding was noticeably reduced, contributing to better homogeneity and stability of the hardened material. Mechanical strength measurements indicated a consistent improvement compared to control samples without the additive.

Keywords: Modified additive, soil stabilization, cement-sand grout, paraffin, mechanical properties

References

1. A. Altynbekova, R. Lukpanov, S. Yenkebayev, D. Tsygulyov, M. Nurbayeva. Complex laboratory studies of modified additive influence on concrete physical and mechanical properties. *International Journal of GEOMATE*, Dec. 2022, Vol. 23, Issue 100, pp. 26–33. – Journal
2. Aldungarova, A., Mukhamejanova, A., Alibekova, N., Karaulov, S., Akhmetov, D. Geotechnical interpolation methodology for determining intermediate values of soil properties. *Technobius*, 2024, Vol. 4, No. 1, p. 0053. – Journal
3. **GOST 310.4-81.** Cements. Methods for Determining Flowability. Moscow: Standard Publishing. – Standard
4. Consoli, N. C., Rosa, F. V., & Cruz, R. C. The Role of Additives in Improving the Performance of Cement-Based Grouts. *Cement and Concrete Research*, 2011, pp. 1257–1278. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.10.004> – Journal
5. R. Lukpanov, D. Tsygulyov, Zh. Zhantlessova, A. Altynbekova, S. Yenkebayev, M. Kozhahmet. Selection of equivalent material for soil testing using piles on a scale model testing apparatus. *International Journal of GEOMATE*, 2024, pp. 33–41. – Journal
6. **GOST 310.6-85.** Cements. Methods for Determining Bleeding. Moscow: Standard Publishing. – Standard
7. **GOST 310.4-81.** Cements. Methods for Determining Flowability. Moscow: Standard Publishing. – Standard

8. **GOST 310.6.** Cements. Methods for Determining Bleeding. Moscow: Standard Publishing. – Standard
9. Zh. Zhantlessova, R. E. Lukpanov, D. Dusembinov, D. V. Tsigulyov, S. B. Yenkebayev, M. Karacasu. Effect of paraffine wax on the mobility of injection cement mortars. *Technobius*, 2025, 5(2), 0080. <https://doi.org/10.54355/tbus/5.2.2025.0080> – Journal

Сведения об авторах:

Жибек Жантлессова – PhD студент, Астана, Казахстан. Кафедра «Технологии промышленного и гражданского строительства», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, 010008, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан, zhibek81@mail.ru

Рауан Лукпанов - доктор технических наук, профессор, «Технологии промышленного и гражданского строительства», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, 010008, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан, rauan_82@mail.ru

Алия Алтынбекова - PhD, кафедра «Технологии промышленного и гражданского строительства», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, 010008, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан, kleo-14@mail.ru Денис Цыгулев - кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительство» Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, denis_72@mail.ru

Джексембаева А. Е. -PhD, Директор Департамента развития инноваций, Адрес: 010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул.Сатпаева 2, E-mail: dzhexembayeva_aye@enu.kz

Zhibek Zhantlesova – PhD student, Astana, Kazakhstan. Department of Industrial and Civil Engineering Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010008, 2 Satpayeva Street, Astana, Kazakhstan, zhibek81@mail.ru

Rauan Lukpanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Industrial and Civil Engineering Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010008, 2 Satpayeva Street, Astana, Kazakhstan, rauan_82@mail.ru

Aliya Altynbekova - PhD, Department of Industrial and Civil Engineering Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010008, 2 Satpayeva Street, Astana, Kazakhstan, kleo-14@mail.ru

Denis Tsygulev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, denis_72@mail.ru
A. E. Dzheksembayeva, PhD, Director of the Department of Innovation Development, Address: 010008, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayeva Street 2, E-mail: dzhexembayeva_aye@enu.kz

Жібек Жантлессова-PhD студенті, Астана, Қазақстан. "Өнеркәсіптік және азаматтық құрылыс технологиялары" кафедрасы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 010008, Сәтпаев көшесі, 2, Астана, Қазақстан, zhibek81@mail.ru

Рауан Лұқпанов-техника ғылымдарының докторы, профессор, "өнеркәсіптік және азаматтық құрылыс технологиялары" кафедрасының профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 010008, Сәтпаев көшесі, 2, Астана, Қазақстан, rauan_82@mail.ru

Әлия Алтынбекова-PhD, "Өнеркәсіптік және азаматтық құрылыс технологиялары" кафедрасы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 010008, Сәтпаев көшесі, 2, Астана, Қазақстан, kleo-14@mail.ru

Денис Цигулев-техника ғылымдарының кандидаты, доцент, "құрылыс" кафедрасы Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан. denis_72@mail.ru
А. Е. Джексембаева. - PhD, инновацияларды дамыту департаментінің директоры, мекенжайы: 010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев к-сі, 2, E-mail: dzhexembayeva_aye@enu.kz



Copyright: © 2025 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/>).



IRSTI 73.43.11

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-257-267>

Detailed transport analysis and modelling focused on the key network of streets in Satpayev city

A.M. Saiynov* , S.K. Tashenov , M.V. Kartashov ,
A.M. Bulgynova , B.M. Yeszhanov 

LLP «Universal Tech Decisions», Astana, Kazakhstan

E mail: science@utd.kz

Abstract. The range of research of this paper is the central area of Satpayev city with a radius of around 150 hectares. The first problem was to define the possible effect of expanding Satpayev Avenue via Miners Square on the current transport network of the city. Based on the established traffic simulation software, researchers were able to model two different urban planning scenarios. These were then benchmarked against real traffic data that was recorded in the 80 intersections referred to as the key intersections in the city to measure the changes in the traffic performance. It was found that traffic in the evenings was extremely more delayed compared to the morning traffic; an average of about 20 percent more congestions. The avenue extension under consideration had a favorable influence on the state of the total traffic, providing significantly better travel times. In addition, the findings indicate that the extension would aid in relieving transit traffic out of residential areas, thereby enhancing the living conditions in those places. The analysis has affirmed that the suggested extension is likely to boost mobility, reduce congestions, and improve accessibility of emergency and municipal services.

Keywords: road network, transport modelling, motorization growth, pedestrian square, through traffic, courtyard road

Introduction

City of Satpaev is one of the major industrial cities of the region, which is located in Ulytau Region. The number of the city population has not changed much in the past years, estimated at around 70,000 people [1]. This negligible growth of the population is evidence of the demographic equilibrium and lack of drastic changes. Simultaneously with this demographic stability, the level of motorization in Kazakhstan has increased at an accelerated pace. From 2020 to 2025, the number of passenger cars in the country increased from 3.87 million to 6.37 million (approximately 11% per year) [2].

As long as this trend persists, the number of passenger vehicles in the country can rise to above 6.4 million by early 2026. It is reported on the official basis of the Ulytau Regional Police Department that 3,537 additional vehicles were registered in the region from 2023 to 2025. By the end of March 2025, the total number of registered vehicles in Satpaev reached almost 16,000 vehicles. This equates to a motorization rate of about 200-230 cars per 1000 residents.

One of the major transport problems of the city of Satpaev is the discontinuity of the through passage along Satpaev Avenue in the central part of the city due to a break in the road at Gorniaikov Square. The interruption of through connectivity on this important arterial road causes much hassle to the residents and jeopardises the efficiency of the city's transport system. The main negative consequences include:

- An increase in transit traffic through nearby residential neighbourhoods, with residents' complaints about increased levels of noise, aggravated environmental conditions, and lowered safety of courtyard areas.
- Reduced levels of efficiency of emergency services – especially the ambulances and fire services – because of the lack of direct and continuous access along the route selected.

Such issues become severe at the peak hours, because of the high traffic load and decreased speed of the vehicles. Restoring, through connectivity, is crucial to enhancing the flow of transport as well as response to emergencies and safety.

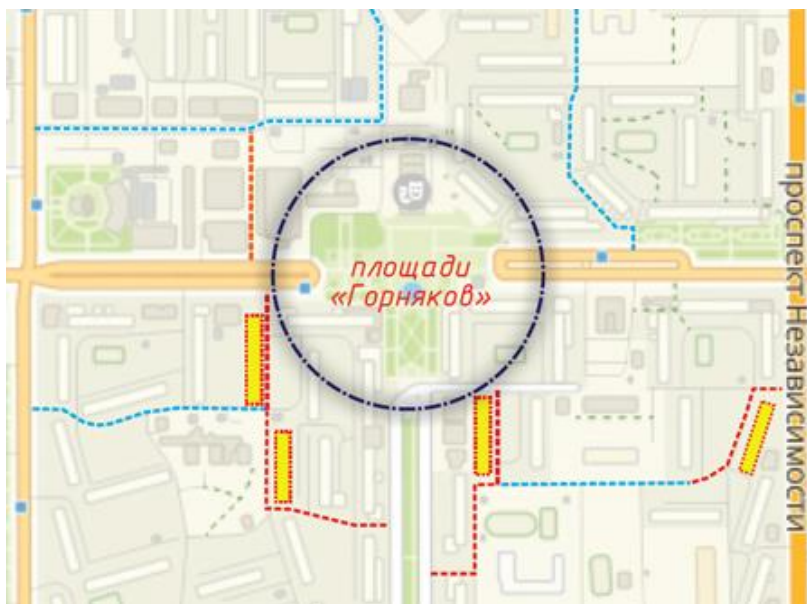


Figure 1. Load distribution scheme for courtyard driveways

The methodology

This research is based on the detailed analysis of traffic streams, using modern methods of data collection and data processing, and computer modelling. To be accurate and objective, traditional field research and the use of innovative devices were employed. The model was developed utilizing the open source mapping services such as OpenStreetMap, Yandex. Maps and Google Earth services. The collection of traffic load data was made using the following methods:

- Direct observation – manual observing of vehicles at chosen road segments.
- Aerial photography (with the help of unmanned aerial vehicles (UAVs) which was utilized to acquire fine-grained facts on traffic density, connection, and conflict points.
- Video recording process followed by automatic processing with the use of specialized software.

In order to achieve complete control over the most important directions, there was designed a network of 80 observation points. Recording was made in peak hours (8:00–9:00 and 18:15–19:15) on weekdays to ensure representativeness of data.

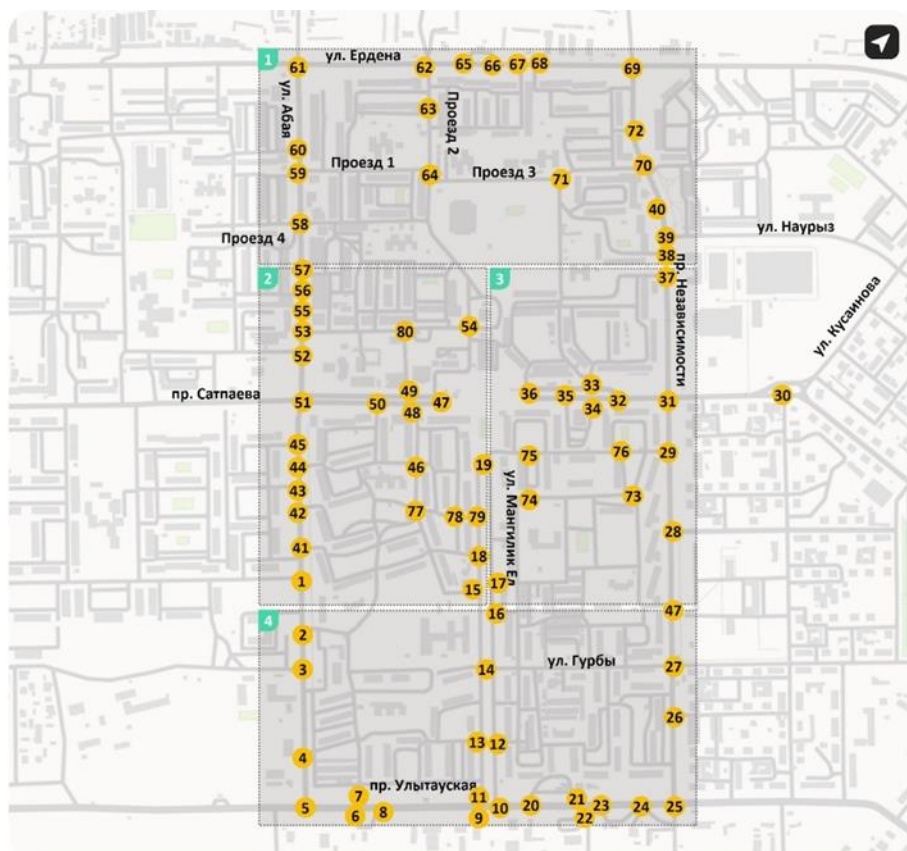


Figure 2. Control sections of the study

The collected materials were systematized by the following: the direction of travel, the kind of vehicles used, and the time passed. Using video footage with graphic schemes, it was concluded that the following were: volume of traffic, average speed, and delay duration. For the traffic situation analysis, the Aimsun software package was implemented with the capabilities of micro- and mesoscopic analysis of the traffic flows. Its functionality allowed for:

- Reconstruction of the existing situation of roads;
- Testing of potential modernization scenarios;
- Imagining congestion and flow patterns.
- Comparison of simulated and real traffic parameters.

The result of the study led to the development of proposals to achieve the best traffic conditions. The used methodology has shown extremely high effectiveness in the analysis of transport systems and the provision of scientifically justified solutions.

Findings/Discussion

The urban area of 1.5 km² (150 hectares), including main city roads (Yerden Street, Abay Street, Mangilik El Street, Ulytau Street, etc.) as well as Satpaev Avenue and Independence Avenue, was covered by the study. A central urban hub is Gorniakov Square, which divides Satpaev Avenue into two parts. During morning and evening peak times, traffic movement is slowed by an increased concentration of both pedestrian and vehicular flows in the city center [3].

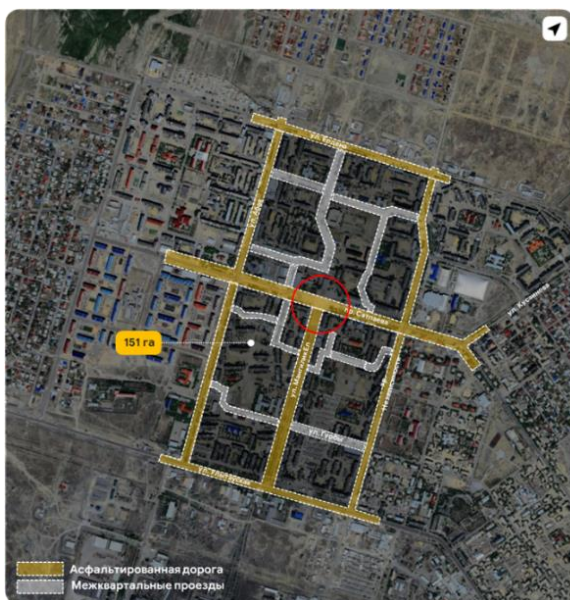


Figure 3. Study Area

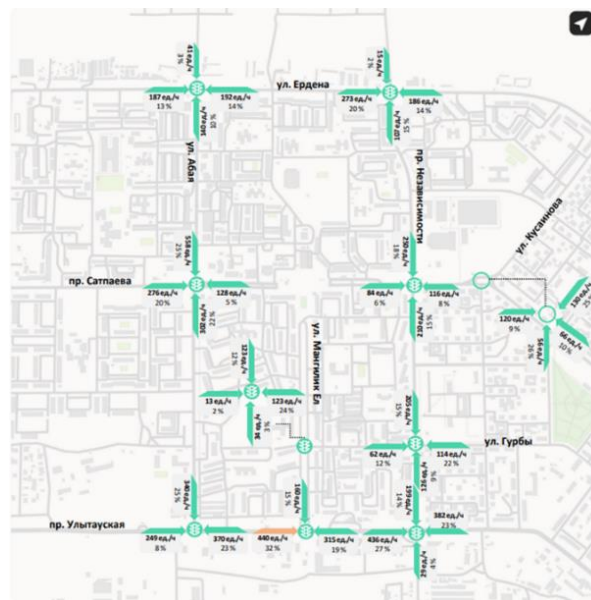


Figure 4. Reserve Capacity during Evening Peak Hour

It was found out through the analysis of the current traffic load that the evening peak hour is 20% more severe than the morning one in relation to the time of delay. Thus, modelling was performed based on the data for the evening peak period. Two major development scenarios were established based on the conducted study:

1. Baseline Scenario – There are no changes in the existing road infrastructure.
2. Optimized Scenario – carrying out the recommended traffic organization improvements.

This approach made it possible to make a direct comparison of the efficacy of potential solutions. One of the most important in the transport system analysis of Satpaev was the reconstruction of Abay Street, a major urban road that was scheduled for 2015. The consideration of this planned upgrade was made in all calculations of the traffic modeling undertaking.

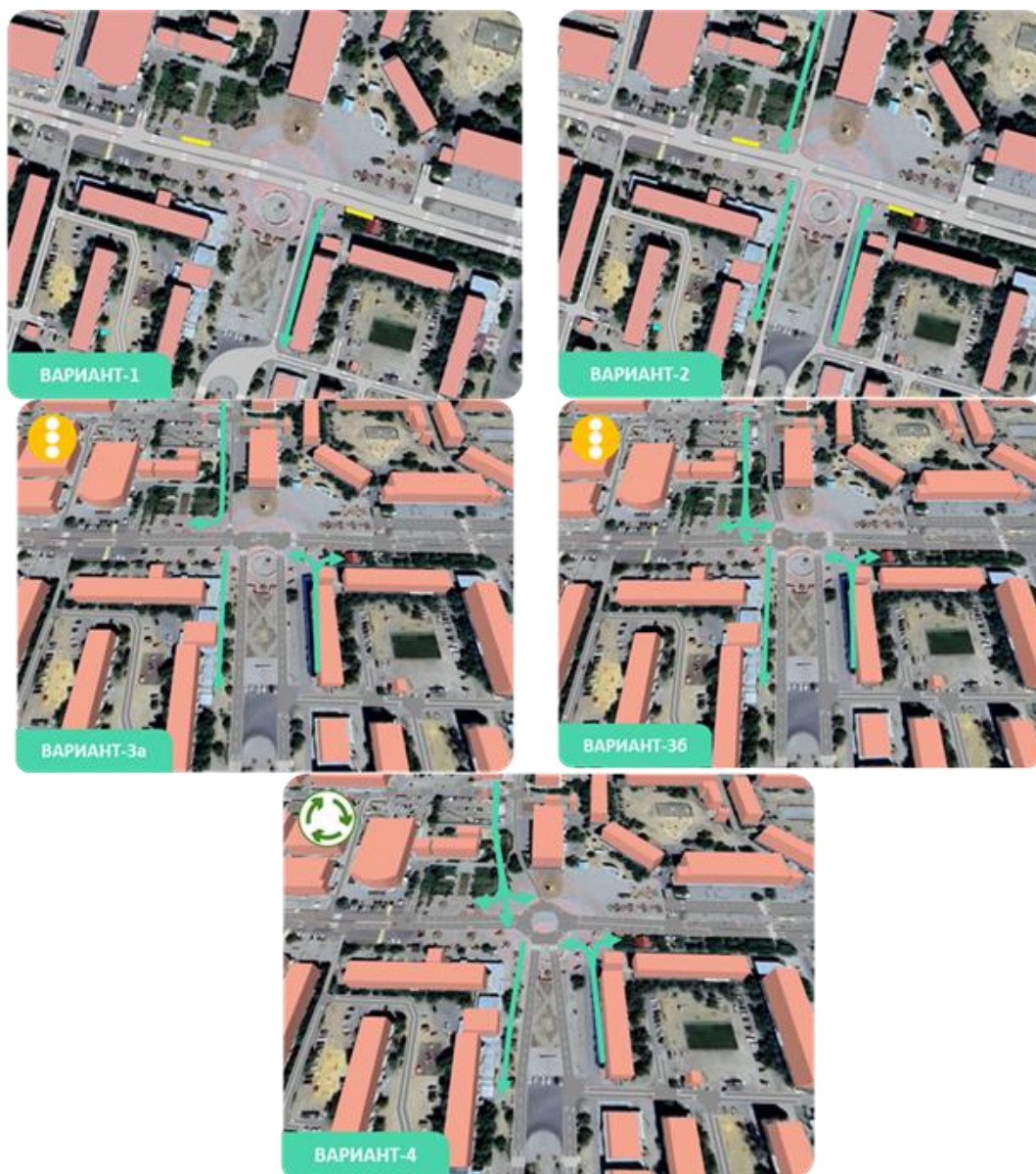


Figure 5. Traffic Flow Simulation Results

For optimizing traffic on Satpaev Avenue, four alternative options of development scenarios were developed. The first option, which was associated with relatively small changes to the square, showed a serious drawback: increased pressure on intra-block routes. This led to the creation of additional solutions (Scenarios 2, 3a, 3b, and 4), which suggested different schemes of traffic, both signalized and unsignalized intersections, and possible utilization of roundabouts. These steps intend to minimise transit traffic in areas with residential buildings and courtyard roads.

Suggested Measures to Decrease the Load on Interblock Networks:

1. One-Way Traffic Mangilik El Street, along with an exit towards Satpaev Avenue. This alternative is for rerouting clustered traffic away from the south and the east inner-yard roads; however, it keeps the possibility of overloading the other segments.

2. Unsignalized Exit – Boulevard Connection between Mangilik El Street and Satpaev Avenue without a traffic light. Allows entry as well as exit into the area around the Akimat.

Signalized Intersections:

3a. The T-Crossing has a one-way traffic towards Akimat and a return route to the rear end of Ulytau mall. A new left-hand lane towards Mangilik El Street.

3b. An X-shaped intersection having an extra lane and signalling control.

4. Roundabout at the junction of Satpaev Avenue and Street Mangilik El.

Provides free-flow traffic comprising U-turns for large vehicles with no signal delays.

The key parameters of the traffic flow were the basis of the effectiveness criteria. speed, density, delay time, and length of trip. The comparison of the five scenarios of Aimsun clearly revealed how the four sets of developed alternatives were better at optimizing the interblock traffic than the baseline scenarios.

Key indicators when analyzing the efficiency of different traffic management scenarios varied considerably. The best for the trip duration was realized in Scenario 4, and a decrease in travel time by 9.8%, which considerably exceeded the number in Scenario 1 (8.1%). The biggest decrease in vehicle delay time (12.1%) was achieved in Scenario 2. A thorough assessment of Scenario 4 proved its outstanding superiority over key parameters: the density of traffic went down to 17.8%, but the average speed went up by 7.8%. On the other hand, the respective numbers corresponding to Scenario 1 were much lower — 8.4% and 6.1% respectively (Table 1 – Results of Comparative Analysis).

Table 1. Results of Comparative Analysis

Indicator	Baseline	S-1	Change (%)	S-2	Change (%)	S-3a	Change (%)
Travel Time	126,88	116,75	8,1 ▲	114,89	9,6 ▲	114,72	9,7 ▲
Delay Time	32,72	30,47	10,1 ▲	29,83	12,1 ▲	30,36	10,4 ▲
Density	4,14	3,78	8,4 ▲	3,46	16 ▲	3,43	16,7 ▲
Speed (km/h)	31,65	33,63	-6,1 ▼	34,05	-7,4 ▼	34,13	-7,7 ▼

Indicator	Baseline	S-3b	Change (%)	S-4	Change (%)
Travel Time	126,88	115,75	8,9 ▲	114,66	9,8 ▲
Delay Time	32,72	31,4	7,2 ▲	30,12	11,2 ▲
Density	4,14	3,52	14,5 ▲	3,38	17,8 ▲
Speed (km/h)	31,65	-6,8	-6,8 ▼	34,16	-7,8 ▼

To calculate travel time across the route, having the intersection of Independence Avenue and Satpaev Ave (Point A) and the intersection of Abay Street and Satpaev Ave (Point B), the modeling was performed in 3D for two scenarios. The timeline of the current traffic scheme (yellow route) will take about four minutes, and the proposed resolution with the new formation of the passage

(green route) will reduce the time to only one minute.



Figure 4. Travel Time Assessment from Point A to Point B

The project of getting rid of Gorniakov Square and extension of Satpaev Avenue envisages a holistic approach to the solution of the city's transportation problems involving improvement of connectivity of the road network, removal of local bottlenecks, and capacity improvement of road structures. The international experience of implementing similar projects demonstrates that, along with the obvious advantages of enhanced traffic performance, such transformations can also produce adverse impacts. The study of global case-studies allows objective evaluation of the balance between potential risks and benefits, which is of particular significance for the project's adaptation to local urban conditions and flow characteristics of transport.

Flexible use of transport space is becoming a common practice in modern cities: its functions are alternated by the city where it is needed. Global practice shows success stories of how the traffic areas can temporarily be made pedestrian for public events. For example, the Austrian town of Vöcklabruck shuts its main Stadtplatz to cars every week to allow it to hold a farmers' market for 15,000 – 20,000 people [4]. Similar measures can be seen during Christmas markets in Vienna, Prague, and Strasbourg, where central squares become pedestrian-only zones for weeks. Such an approach enables cities to preserve the accessibility of traffic during working days and promote the comfortable environment of an urban space for the crowds and happenings.

In the post-Soviet cities, the tradition of closing the main streets and squares during public events has become a successful case as well. In Moscow, during city celebrations, Tverskaya Street and Red Square turn into pedestrian zones. on the same note, in Astana, the central square is made devoid of traffic to accommodate celebrations [5]. These examples reflect an innovative strategy of urban space management, switching transportation hubs to temporary public space. A confirmation of the possibility of multipurpose use of city squares with the effective combination of transport functions and social and cultural activities.

The use of mobile elements of infrastructure – temporary fences, modular structures, bollards – allows adapting the space for more rapid functional use [6]. That approach provides the most appropriate balance between the requirements of the transport system and the demand for the arrangement of comfortable settings for urban activities.

Conclusion

The examination of the traffic situation on Satpaev Avenue and the surrounding streets represents the present state of the roads based on climatic and seasonal factors. Conducted in compliance with the standards of regulatory documentation of the Republic of Kazakhstan, the study has covered a territory of 150 hectares with a macro-level analysis of the road network, an intense assessment of 15 signalized intersections, 80 points of measurement of traffic intensity, and 7 lines of public transport.

The most important result is that the proposed scenarios (2–4) overnight remove all transit traffic through courtyard areas. Though the 11% increase in motorization may bring slight deterioration in the traffic situation, the construction of Abay Street needs adjustments to avoid overloading local streets.

Recommendations:

- Place a four-lane arrangement in Satpaev Avenue with parking bays, a reduction of speed, and safe pedestrian crossing.
- Optimize the public transport network according to the data of passenger flow (mainly, for Cases 1–3).
- Alter Abay Street reconstruction plan such that it lessens its impact on neighboring streets.
- Reconfigure movement of traffic signals (at Gurban street – Mangilik El street, the palace of schoolchildren) to allow for priority movement of high volumes of traffic directions.
- Effectiveness of the proposed solutions:
- Extension of the Satpaev Avenue cuts travel time four times between Independence Avenue and Abay Street.
- Enhanced relationship with Mangilik El Street (roundabout or signalized intersection) will remove pressure from interblock streets.
- Temporal street closures for public occasions will necessitate the planning of alternative routes.

The contribution of the authors

Saiynov A.M. - concept, methodology, drafting;

Tashenov S.K. - modeling, analysis;

Kartashov M.V. - data collection, visualization, interpretation;

Bulgynova A.M. - data collection, writing;

Yeszhanov B.M. - resources, supervision, funding acquisition;

References

1. Official Statistics on the Population of Satpaev City [Electronic resource]. URL: <https://stat.gov.kz/>
2. Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan. Statistical Data on the Level of Motorization in the Republic of Kazakhstan [Electronic resource]. URL: <https://strategy2050.kz/>
3. Special Report "Monotowns": Interview with the Akim of Satpaev City A. Idrisov // Vlast. 2022. No. 45. Pp. 12–15.
4. Schmidt, M. Mobility Regulation and Public Space: The Experience of Weekly Pedestrianization in Austrian Cities // European Journal of Urban Studies. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 112–124.

5. Sokolova, E.A. Temporary Transformation of Urban Spaces: Practices in Post-Soviet Capitals // City and Urbanism. 2022. Vol. 6. No. 2. Pp. 90–102.

6. Lydon, M., Garcia, A. Tactical Urbanism: Short-Term Action for Long-Term Change. Washington: Island Press, 2015. 256 p.

**А.М. Сайынов*, С.К. Ташенов, М.В. Карташов,
А.М. Булгынова, Б.М. Есжанов**

¹ТОО «Universal Tech Decisions», Астана, Қазақстан

Детальный транспортный анализ и моделирование, сосредоточенные на ключевой уличной сети города Сатпаев

Аннотация. Объектом изучения в данной работе является центральная часть города Сатпаев площадью около 150 гектаров. Главной задачей исследования являлось определение возможного влияния расширения проспекта Сатпаева через Площадь Горняков на существующую транспортную сеть города. С помощью специализированной программы моделирования дорожного движения было смоделировано два различных сценария планирования. Эти сценарии были сопоставлены с реальными данными о движении, зафиксированными на 80 ключевых перекрёстках города, чтобы оценить изменения в транспортной нагрузке. Выяснилось, что в вечерние часы движение значительно более загружено по сравнению с утренним трафиком — в среднем на 20% больше заторов. Будущее соединение проспекта оказало положительное влияние на общую ситуацию с транспортным потоком, обеспечив заметно лучшее время в пути. Кроме того, результаты показывают, что проект может способствовать выводу транзитного транспорта из жилых районов, тем самым улучшая условия жизни в этих зонах. Проведённый анализ подтвердил, что предложенное расширение, скорее всего, повысит мобильность, снизит заторы и улучшит доступ к экстренным и муниципальным службам.

Ключевые слова: дорожная сеть, транспортное моделирование, рост автомобилизации, пешеходная площадь, сквозное движение, внутридворовая дорога.

**А.М. Сайынов*, С.К. Ташенов, М.В. Карташов,
А.М. Булгынова, Б.М. Есжанов**

ЖШС «Universal Tech Decisions», Астана, Қазақстан

Сәтпаев қаласының негізгі көше желісіне бағытталған кешенді көлік талдауы мен модельдеуі

Аңдатпа. Бұл зерттеудің нысаны – Сәтпаев қаласының шамамен 150 гектарды құрайтын орталық аумағы. Зерттеудің басты мақсаты – Сәтпаев даңғылын Горняк алаңы арқылы ұзарту қаланың қазіргі көлік желісіне қалай әсер ететінін анықтау болды. Жол қозғалысын модельдеуге арналған сенімді бағдарламалық жасақтама негізінде зерттеушілер екі түрлі қалалық жоспарлау сценарийін жасады. Бұл сценарийлер қаланың 80 негізгі жол айрығынан алынған нақты қозғалыс деректерімен салыстырылды, сол арқылы көлік қозғалысының тиімділігін бағалау жүзеге асырылды. Зерттеу нәтижесінде

кешкі уақыттағы қозғалыстың таңғы уақытқа қарағанда шамамен 20%-ға көбірек кідірістерге ұшырайтыны анықталды. Ұсынылып отырған даңғылды ұзарту жалпы көлік ағынына оң әсер етіп, жүру уақытын едәуір қысқартатыны байқалды. Сонымен қатар, нәтижелер бұл жобаның транзиттік көлікті тұрғын аймақтардан тыс шығарып, сол аумақтардағы өмір сапасын жақсартуға көмектесетінін көрсетеді. Жүргізілген талдау ұсынылған кеңейтудің қозғалуды жақсартуға, кептелісті азайтуға және шұғыл және коммуналдық қызметтердің қолжетімділігін арттыруға ықпал ететінін растады.

Түйін сөздер: жол желісі, көлік моделдеу, автомобилизацияның өсуі, жаяу жүргіншілер алаңы, транзиттік қозғалыс, аулалық жол.

References

1. Ofitsial'naya statistika po naseleniyu goroda Satpaev [Elektronnyy resurs]. URL: <https://stat.gov.kz/>
2. Agentstvo po strategicheskomu planirovaniyu i reformam Respubliki Kazakhstan. Statisticheskie dannye ob urovne avtomobilizatsii v Respublike Kazakhstan [Elektronnyy resurs]. URL: <https://strategy2050.kz/>
3. Spetsial'nyy reportazh «Monogoroda»: interv'y u s akimom goroda Satpaev A. Idrisovym // Vlast'. 2022. № 45. S. 12–15.
4. Schmidt, M. Mobility Regulation and Public Space: The Experience of Weekly Pedestrianization in Austrian Cities // European Journal of Urban Studies. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 112–124.
5. Sokolova E.A. Vremennoe preobrazovanie gorodskikh prostranstv: praktiki v postsovetskikh stolitsakh // Gorod i urbanistika. 2022. T. 6. № 2. S. 90–102.
6. Lydon, M., Garcia, A. Tactical Urbanism: Short-Term Action for Long-Term Change. Washington: Island Press, 2015. 256 p.

Information about the authors:

Sayinov A.M. – corresponding author, Director of LLP “Universal Tech Decisions”, 53/42 Kabanbay Batyr Ave., Z05H0P9, Astana, Kazakhstan
Tashenov S.K. – Transport Modelling Specialist, LLP “Universal Tech Decisions”, 53/42 Kabanbay Batyr Ave., Z05H0P9, Astana, Kazakhstan
Kartashov M.V. – MSc in Information Systems, MSc in Economics, Senior Researcher, LLP “Universal Tech Decisions”, 53/42 Kabanbay Batyr Ave., Z05H0P9, Astana, Kazakhstan
Bulgunova A.M. – MSc in Business, Transport Planning Specialist, LLP “Universal Tech Decisions”, 53/42 Kabanbay Batyr Ave., Z05H0P9, Astana, Kazakhstan
Yeszhanov B.M. – Director of Development, LLP “Universal Tech Decisions”, 53/42 Kabanbay Batyr Ave., Z05H0P9, Astana, Kazakhstan

Сайынов А.М. – хат-хабар авторы, ТОО «Universal Tech Decisions» директоры, Қабанбай батыр даңғылы, 53/42, Z05H0P9, Астана, Қазақстан
Ташенов С.К. – көлік моделдеу маманы, ТОО «Universal Tech Decisions», Қабанбай батыр даңғылы, 53/42, Z05H0P9, Астана, Қазақстан
Карташов М.В. – ақпараттық жүйелер магистрі, экономика магистрі, ТОО «Universal Tech Decisions» аға ғылыми қызметкері, Қабанбай батыр даңғылы, 53/42, Z05H0P9, Астана

Булгынова А.М. – бизнес магистрі, көлік жоспарлау маманы, ТОО «Universal Tech Decisions», Қабанбай батыр даңғылы, 53/42, Z05H0P9, Астана, Қазақстан

Есжанов Б.М. – даму жөніндегі директор, ТОО «Universal Tech Decisions», Қабанбай батыр даңғылы, 53/42, Z05H0P9, Астана, Қазақстан

Сайынов А.М. - автор для корреспонденции, директор ТОО «Universal Tech Decisions», пр. Кабанбай батыра, 53/42, Z05H0P9, Астана, Казахстан

Ташенов С.К. - специалист транспортного моделирования ТОО «Universal Tech Decisions», пр. Кабанбай батыра, 53/42, Z05H0P9, Астана, Казахстан

Карташов М.В. – магистр информационных систем, магистр экономики, старший научный работник ТОО «Universal Tech Decisions», пр. Кабанбай батыра, 53/42, Z05H0P9, Астана, Казахстан

Булгынова А.М. – магистр бизнеса, специалист транспортного планирования ТОО «Universal Tech Decisions», пр. Кабанбай батыра, 53/42, Z05H0P9, Астана, Казахстан

Есжанов Б.М. – директор по развитию ТОО «Universal Tech Decisions», пр. Кабанбай батыра, 53/42, Z05H0P9, Астана, Казахстан



Copyright: © 2025 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/>).



XҒТАР 73.29.17

Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-150-1-268-259>

Интервалды реттеу жүйелерінің пойызаралық интервалға әсерін бағалау

Ж.Е. Шукманов* , Г.А. Сүлейменова  2

¹М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан

²М.Тынышбаев атындағы АЛТ университеті, Алматы, Қазақстан

E mail: shukamanov@bk.ru

Аңдатпа. Теміржол көлігі – жолаушылар мен жүк тасымалының сенімді әрі үнемді түрі ретінде көлік жүйесінде маңызды орын алады. Соңғы жылдары қозғалыс жиілігінің артуы мен қауіпсіздік талаптарының күшеюі теміржол желісінің өткізу қабілетін оңтайландыруды қажет етуде. Осы мақсатта пойыздар арасындағы интервалды басқару жүйелерін модельдеу – қозғалыс тиімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етудің маңызды құралына айналууда. Осы мақалада пойыздар арасындағы интервалды басқару жүйелерін модельдеу арқылы қозғалысты ұйымдастырудың тиімді жолдары қарастырылады. Пойыз аралық интервал – бұл пойыздар арасындағы кеңістіктік немесе уақыттық қашықтық, ол жүйенің қауіпсіз және тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді. Бұл интервалды нақты есептеу және түрлі басқару жүйелерінде (жартылай автоматты блоктау, автоматты блоктау, радиоблоктау) салыстыру теміржол желісінің өткізу қабілетін арттыруға мүмкіндік береді. Жүргізілген есептеулерге сәйкес: жартылай автоматты блоктау жүйесінде интервал – 660 с., өткізу қабілеті – 5,45 пойыз/сағ.; автоматты блоктау жүйесінде интервал – 120 с., өткізу қабілеті – 30 пойыз/сағ.; радиоблоктау жүйесінде интервал – 72 с., өткізу қабілеті – 50 пойыз/сағ. Бұл нәтижелер радиоблоктау жүйесінің пойыздар қозғалысын басқарудағы ең тиімді жүйе екенін көрсетті, себебі ол ең аз интервалмен жоғары өткізу қабілетін қамтамасыз етеді. Зерттеу нәтижелері теміржол көлігінің цифрлық трансформациясына, қауіпсіздік пен өткізу қабілетін арттыруға үлес қосуы мүмкін.

Түйін сөздер: пойыздар қозғалысы, интервалды реттеу, өткізу қабілеттілік, пойызаралық интервал, модельдеу.

Түсті 24.06.2025. Жөнделді 10.07.2025. Мақұлданды 31.08.2025. Онлайн қолжетімді 30.09.2025

* хат-хабар автор үшін

Кіріспе

Қазіргі заманғы көлік жүйелерінде жолаушылар мен жүк ағындарының үнемі артуы теміржол телімдерінің өткізу қабілеттілігін арттыруды өзекті мәселеге айналдырып отыр. Өткізу қабілеттілігі – бұл белгілі бір уақыт ішінде теміржол телімі арқылы қауіпсіз және тиімді түрде өткізуге болатын пойыздар саны. Бұл көрсеткіш теміржол желісінің жалпы өнімділігіне, қозғалыс кестесінің тұрақтылығына, жүктің уақтылы жеткізілуіне және бүкіл көлік жүйесінің сенімділігіне тікелей әсер етеді [1].

Теміржол телімдерінің өткізу қабілеттілігіне көптеген факторлар әсер етеді: пойыздардың жылдамдығы, қозғалыс интервалдары, блоктау жүйелерінің түрі, станциялардың өткізу мүмкіндіктері және техникалық құралдардың жай-күйі. Осы факторлардың үйлесімді жұмыс істеуі жүйенің тиімділігін арттырады. Сондықтан телімнің өткізу қабілетін дәл бағалау, оны модельдеу және оңтайландыру – қазіргі көлік логистикасында маңызды зерттеу бағыты болып табылады.

Теміржол телімдерінің өткізу қабілетін арттыру мен қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз етуде пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйелері ерекше рөл атқарады. Бұл жүйелер пойыздар арасындағы кеңістіктік немесе уақыттық интервалды белгілеу арқылы олардың бір бағытта немесе қарсы бағытта қозғалысын ұйымдастыруға мүмкіндік береді. Интервалды басқарудың негізгі мақсаты – соқтығысулар мен бөгелістердің алдын алу арқылы қозғалыс үдерісін оңтайландыру [2].

Интервалды реттеу жүйелері теміржол желілерінің құрылымына, пойыз қозғалысының тығыздығына және техникалық құралдардың деңгейіне байланысты әртүрлі болады. Қазіргі уақытта кең таралған жүйелерге жартылай автоматты блоктау, автоматты блоктау және радиоблоктау жатады. Әрбір жүйенің өзіндік артықшылықтары мен шектеулері бар, және олар нақты телімнің сипаттамасына қарай таңдалады.

Дұрыс таңдалған интервалды басқару жүйесі телімнің өткізу қабілетін едәуір арттырып, пойыздар қозғалысының үздіксіздігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етеді. Сондықтан бұл жүйелерді модельдеу және салыстырмалы түрде талдау теміржол көлігін жаңғырту мен автоматтандыруда маңызды орын алады.

Теміржол көлігінде пойыз қозғалысын интервалды реттеу жүйелерін жалпы үш топқа топтастыруға болады: жартылай автоматты блоктау (ЖАБ), автоматты блоктау (АБ) және радиоблоктау (РБ). ЖАБ жүйесінде бір блок-участкеде тек бір пойыз болуына рұқсат етіледі, бұл жүйенің өткізу қабілетін шектейді. АБ жүйесі блок-участкелерді қысқарту арқылы пойыздардың тығыз қозғалысын қамтамасыз етеді, ал РБ жүйесі пойыздардың нақты уақыттағы орнын бақылауға негізделіп, ең аз интервалмен ең жоғары өткізу қабілетін ұсынады.

Қазіргі уақытта Қазақстан Республикасы теміржол желісі бойынша пойыздар қозғалысын интервалды реттеудің әртүрлі жүйелері қолданыста. Алайда, теміржол автоматикасы және телемеханикасы жүйелерінің техникалық жағдайы өткізу қабілетіне тікелей әсер етіп отыр.

Статистикалық мәліметтерге сәйкес, ЖАТ-тың шамамен 70%-ы өз қызмет ету мерзімін толықтай өткеріп, тозу шегіне жеткен құралдардан тұрады. Бұл – теміржол көлігінің инфрақұрылымындағы аса маңызды мәселелердің бірі [3].

Қазіргі талаптарға сай келмейтін ЖАТ жүйелері пойыздар қозғалысын басқарудың тиімділігі мен қауіпсіздігіне теріс әсер етеді. Әсіресе, жүйелердің элементтік базасының физикалық тұрғыдан тозуы олардың сенімділігін күрт төмендетіп, интервалды басқару

мүмкіндіктерін шектейді. Бұл мәселе Қазақстан Республикасының 2030 жылға дейінгі Көлік-логистикалық әлеуетін дамыту тұжырымдамасының 2.7.2-тармағында ресми түрде көрсетілген [5]. Осыған байланысты, интервалды реттеу жүйелерін жаңғырту және модельдеу, олардың тиімділігін бағалау мен салыстыру – теміржол көлігінің цифрлық трансформациясын жүзеге асыруда және өткізу қабілетін арттыруда шешуші мәнге ие.

Әдіснама

Теміржол телімінің өткізу қабілетін айқындайтын негізгі факторлардың бірі – пойыздар арасындағы интервалды басқару жүйесінің түрі. Интервалды реттеу жүйесі пойыздар қозғалысының қауіпсіздігі мен үзіліссіздігін қамтамасыз ету мақсатында олардың арасындағы кеңістіктік және уақыттық қашықтықты белгілеуге арналған.

Қазақстан теміржол жүйесінде негізінен үш түрлі интервалды реттеу жүйесі қолданылады: жартылай автоматты блоктау, автоматты блоктау және радиоблоктау. Әрбір жүйенің өзіндік артықшылықтары мен шектеулері бар.

ЖАБ жүйесі – пойыздардың қозғалысын кезекші немесе диспетчердің рұқсатымен реттейтін, басқаруы жартылай автоматтандырылған жүйе. Бұл жүйеде белгіленген аралықта бір мезгілде тек бір пойыз ғана қозғала алады. Жол телімінің босатылғаны туралы ақпарат көршілес станциялар арасында телефон немесе сымды байланыс арқылы беріледі. Автоматты блоктау жүйесі – пойыздардың қозғалысын автоматты түрде реттейтін жүйе. Теміржол телімі бірнеше қысқа блок-телімдерге бөлінеді.

Әр блокта орналасқан жолдық релелік құрылғылар пойыздың орналасуын анықтап, сигнал беру жүйесі арқылы арттағы пойыздарға ақпарат береді. Радиоблоктау – пойыз қозғалысын нақты уақыт режимінде басқаруға арналған ең заманауи жүйе. Мұнда физикалық блок-телімдер болмайды, оның орнына пойыздың позициясына негізделген виртуалды блок-телімдер қалыптасады.

Радиобайланыс арқылы әр пойыздың жылдамдығы, орнын, тежелу жолын және алдыңғы пойыздан қашықтығын автоматты түрде бақылайды [1-4].

Осы аталған интервалды реттеу жүйелерінің негізгі техникалық сипаттамаларын 1-кестеден көруге болады.

Теміржол жүйесінде пойыздар арасындағы интервал – бұл келесі пойызды қауіпсіз түрде қозғалысқа жіберуге рұқсат берілетін уақыт аралығы. Интервал ұзақтығы неғұрлым қысқа болса, жүйенің өткізу қабілеті соғұрлым жоғары болады [6-8].

Жартылай автоматты блоктау жүйесінде пойыз аралық интервал келесі формуламен есептеледі.

$$T_{min \text{ ЖАБ}} = \frac{S}{V} \cdot 3600 + t_k, \quad \text{с} \quad (1)$$

мұндағы $T_{min \text{ ЖАБ}}$ – пойыздар арасындағы ең аз уақыттық интервал (секундпен). Бұл уақыт ішінде келесі пойыздың жүруі қауіпсіз деп есептеледі; S – пойыз құрамы жүріп өтетін аралықтың ұзындығы; V – пойыздың қозғалыс жылдамдығы (км/сағ); 3600 – сағатты секундқа айналдыру коэффициенті (1 сағат = 3600 секунд); t_k – қосымша қауіпсіздік уақыты, яғни алдыңғы пойыз телімді босатқаннан кейін диспетчердің келесі пойызға рұқсат беру уақыты. Бұл байланыс, тексеріс, нұсқау беру сияқты уақыттарды қамтиды.

Автоматты блоктау жүйесінде пойыз аралық интервалды есептеу келесідей ерекшеліктерге ие, себебі, бұл блоктау жүйесінде аралық бірнеше блок-телімдерге бөлінеді.

1-Кесте. Интервалды реттеу жүйелерінің негізгі техникалық сипаттамалары

Сипаттама	Жартылай автоматты блоктау (ЖАБ)	Автоматты блоктау (АБ)	Радиоблоктау (РБ)
Басқару әдісі	Қолмен (диспетчер арқылы)	Автоматты, сигнализациямен	Радиобайланыс арқылы автоматты түрде
Ақпарат беру	Телефон, сымды байланыс	Релелік құрылғылар мен сигналдар	Радио және цифрлық деректер
Бақылау жүйесі	Кезекшінің визуалды бақылауы	Пойыздың жолдағы орналасуы бақыланады	GPS және onboard сенсорлар арқылы
Сигнал беру	Қолмен берілетін рұқсат	Автоматты бағдаршамдар	Машинистің дисплейіне тікелей хабарлама
Жүйенің сенімділігі	Төмен	Орташа	Өте жоғары
Техникалық күрделілік	Төмен	Орташа	Жоғары
Жабдықтарға тәуелділік	Минималды	Электрлік реле және датчиктер	Цифрлық жүйелер, серверлер, сенсорлар
Жаңғырту мүмкіндігі	Шектеулі	Бар	Кеңейтілген (жаңартуға бейім)
Автоматтандыру деңгейі	Төмен	Орташа	Жоғары
Инфрақұрылымға қойылатын талаптар	Қарапайым	Орташа	Жоғары деңгейдегі цифрлық инфрақұрылым
Кадрларға тәуелділік	Жоғары (диспетчер, кезекші)	Орташа (техникалық қызмет)	Төмен (автоматтандырылған жүйе)
Жүйе икемділігі	Төмен	Орташа	Жоғары
Қауіпсіздік технологиясы	Дәстүрлі	Электронды бақылау	Заманауи (ETCS, CBTC, т.б.)
Қызмет көрсету жиілігі	Жоғары (қолмен тексеру қажет)	Орташа	Төмен (өздігінен диагностика жүргізеді)

$$T_{min AB} = \frac{L_{блок}}{V} \cdot 3600, \quad c \quad (2)$$

мұндағы $T_{min AB}$ – пойыздар арасындағы ең аз уақыттық интервал (секундпен). Бұл уақыт ішінде келесі пойыздың жүруі қауіпсіз деп есептеледі; S – пойыз құрамы жүріп өтетін аралықтың ұзындығы; V – пойыздың қозғалыс жылдамдығы (км/сағ); 3600 – сағатты секундқа айналдыру коэффициенті (1 сағат = 3600 секунд).

Радиоблоктау жүйесінде жылжымалы блок-телімдердің болуы есебінен, пойыз

аралық интервалды есептеу барысында қауіпсіз арақашықтық параметрі ескеріліп, келесі формула қолданылады:

$$T_{min PB} = \frac{d_{\text{қауіпсіз}}}{V} \cdot 3600 \text{ с}, \quad (3)$$

мұндағы $T_{min PB}$ – пойыздар арасындағы ең аз интервал, нақты уақыт тәртібінде есептеледі; $d_{\text{қауіпсіз}}$ – қауіпсіз арақашықтық (км), яғни алдыңғы пойыз толық тоқтаған жағдайда, артындағы пойыз да қауіпсіз тоқтай алатын тежеу жолы; V – пойыздың қозғалыс жылдамдығы (км/сағ); 3600 – сағатты секундқа айналдыру коэффициенті (1 сағат = 3600 секунд).

Егер аралықтың ұзындығы 10 км, пойыз құрамының жылдамдығы 60 км/сағ, сонымен қатар қосымша қауіпсіздік уақытын 60 секунд және автоматты блоктау жүйесінде блок-телімнің ұзындығы 2 км, ал радиоблоктау жүйесінде қауіпсіз арақашықтықты 1,2 км алатын болсақ, жоғарыда көрсетілген үш жүйе бойынша пойыз аралық интервалдың және аралықтың өткізу қабілетінің келесідей салыстырмалы көрсеткіштерін аламыз:

$$T_{min ЖАБ} = \frac{10}{60} \cdot 3600 + 60 = 660 \text{ с}$$

$$T_{min АБ} = \frac{2}{60} \cdot 3600 = 120 \text{ с}$$

$$T_{min PB} = \frac{1,2}{60} \cdot 3600 = 72 \text{ с}$$

Осы көрсеткіштерді ескере отыра, аралықтың өткізу қабілетін келесі формуламен есептейміз:

$$N = \frac{3600}{T_{min}}, \quad \text{пойыз/сағ.} \quad (4)$$

Олай болса, жартылай автоматты блоктау жүйесіндегі аралықтың өткізу қабілеті:

$$N_{ЖАБ} = \frac{3600}{660} = 5,45 \quad \text{пойыз/сағ.}$$

Автоматты блоктау жүйесіндегі аралықтың өткізу қабілеті:

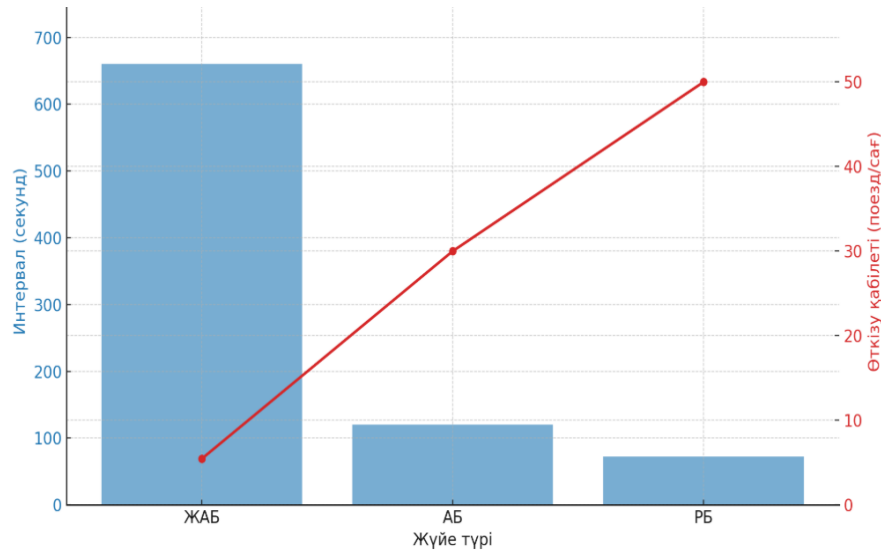
$$N_{АБ} = \frac{3600}{120} = 30 \quad \text{пойыз/сағ.}$$

Радиоблоктау жүйесіндегі аралықтың өткізу қабілеті:

$$N_{PB} = \frac{3600}{72} = 50 \quad \text{пойыз/сағ.}$$

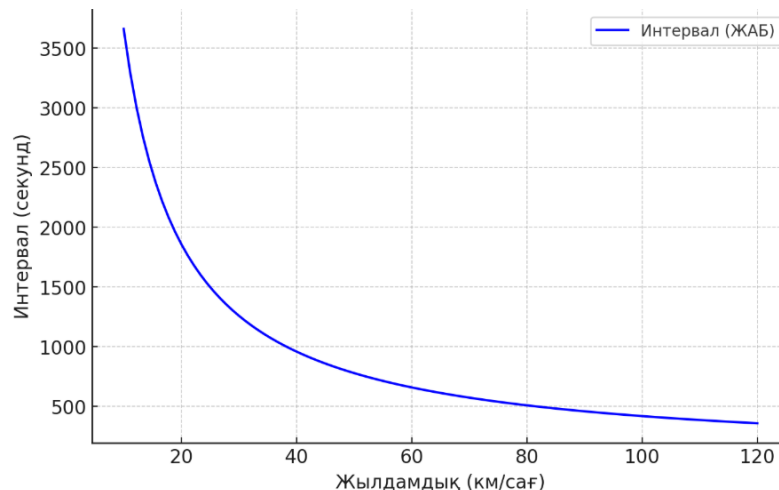
Нәтижелер мен талқылау

Есептеулердің нәтижесінде жартылай автоматты блоктау жүйесінде пойызаралық интервалдың үлкен болуына байланысты, бұл аралықтың өткізу қабілеті төмен екенін байқауға болады. Ал, радиоблоктау жүйелерінде жылжымалы блок-телімнің болуына байланысты пойызаралық интервал төмен және аралықтың өткізу қабілеті жоғары болатынын байқаймыз (1-сурет).



1-сурет. Блоктау жүйелеріндегі пойыз аралық интервал мен өткізу қабілетінің салыстырмалы графигі

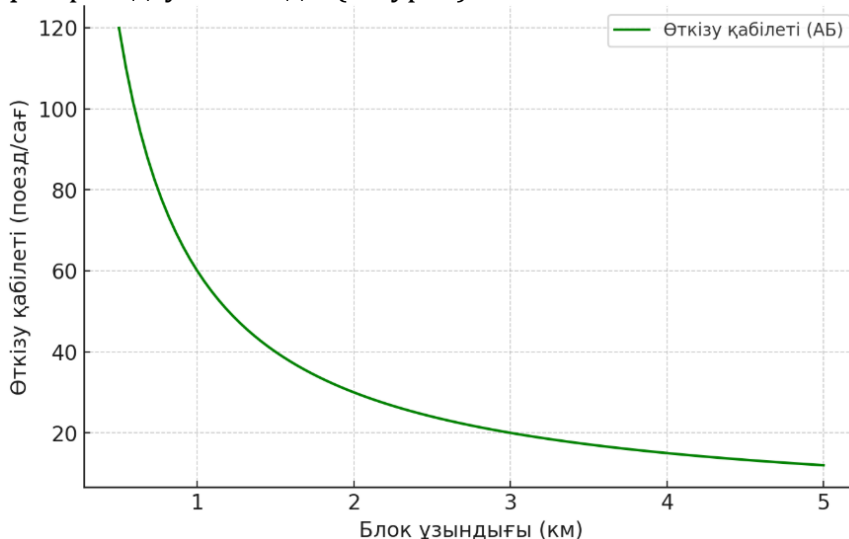
Сонымен қатар, пойызаралық интервал мен аралықтың өткізу қабілетін есептеу барысында қолданылған параметрлердің өзара тәуелділік графиктерінен келесідей тұжырымдама жасауға болады.



2-сурет. Пойыз жылдамдығының пойызаралық интервалға тәуелділігі

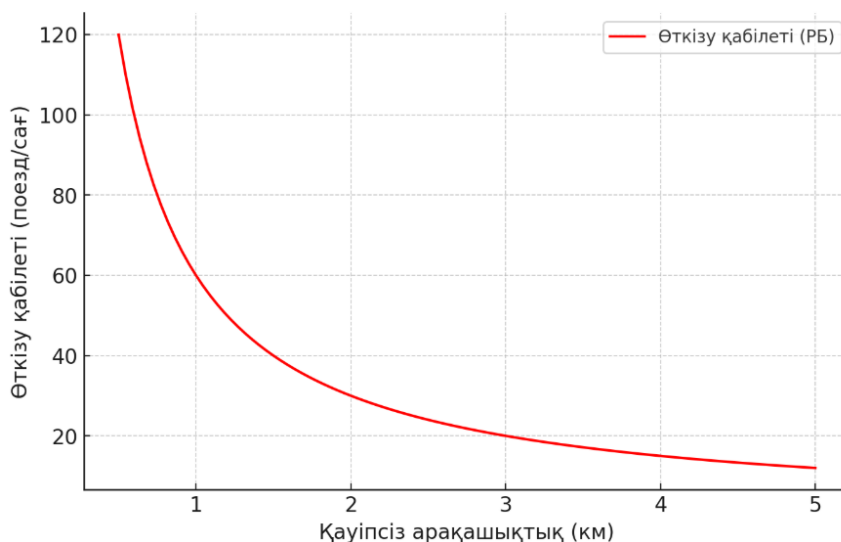
Жартылай автоматты блоктау жүйесінде жылдамдық артқан сайын, аралықтың өткізу қабілеті артады (2-сурет). Мысалы, пойыз құрамының жылдамдығы 10-нан 120 км/сағ-қа дейін өзгертілген жағдайда, өткізу қабілеті артады. Дегенмен, қазіргі таңда теміржол инфраструктурасы мен жолдық жағдайы пойыз құрамының жылдамдығын айтарлықтай жоғарлатуға мүмкіндік бермейді.

Автоматты блоктау жүйесінде аралықтағы блок-телім ұзындығының өткізу қабілетіне әсерін келесідей тұжырымдауға болады (3-сурет).



3-сурет. Блок-телім ұзындығының аралықтың өткізу қабілетіне тәуелділігі

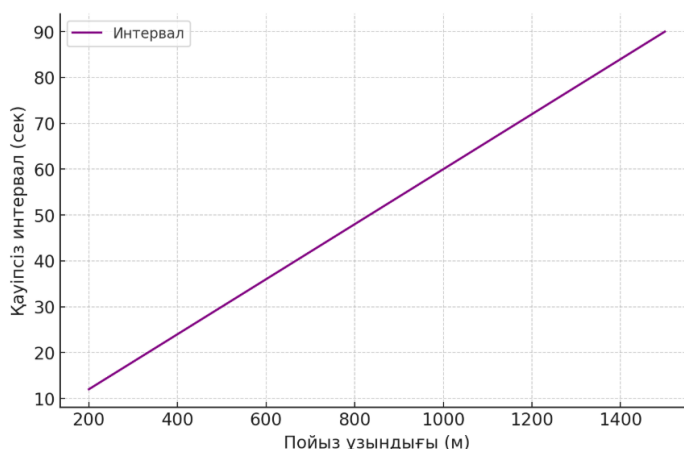
Графикте көрсетілгендей, аралықтағы блок-телім ұзындығы 0.5-тен 5 км-ге дейін өзгертілген. Бұл жағдайда, блок-телім ұзындығы артқан сайын пойыз аралық интервалдың өсіп, аралықтың өткізу қабілетін азайтатынын көруге болады. Дегенмен, қысқа блок-телімдер жоғары тиімділік береді, бірақ олардың техникалық күрделілігі жоғары болады.



4-сурет. Қауіпсіз арақашықтықтың аралықтың өткізу қабілетіне тәуелділігі

Радиоблоктау жүйесінде қауіпсіз арақашықтықтың өзгеруі де, аралықтың өткізу қабілетіне әсер етеді (4-сурет).

Бұл жағдайда, қауіпсіз арақашықтық артқан сайын, пойызаралық интервал да артады. Бұл өз кезегінде аралықтың өткізу қабілетінің төмендеуіне алып келеді. Радиоблоктау жүйесінде тежеу технологияларын жетілдіру арқылы қауіпсіз арақашықтықты қысқарту – өткізу қабілетін арттырудың маңызды жолы болып табылады. Сонымен қатар радиоблоктау жүйесінде қауіпсіз интервалдың пойыз құрамының ұзындығына да тәуелділігін бақылауға болады (5-сурет).



5-сурет. Қауіпсіз арақашықтықтың аралықтың өткізу қабілетіне тәуелділігі

Бұл нәтижеге келесідей талдау жүргізуге болады: пойыз ұзындығы ұлғайған сайын, тежелу жолы да артады, соның нәтижесінде, қауіпсіз интервал да ұлғаяды, себебі соңғы пойыз құрамы толық тоқтауға үлгеруі тиіс. Бұл әсіресе радиоблоктау жүйесінде маңызды, себебі интервал нақты тежелу мүмкіндігіне байланысты есептеледі [9, 10].

Қорытынды

Зерттеу нәтижелері пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйелерінің тиімділігіне әртүрлі факторлардың ықпалын нақты көрсетті. Үш түрлі жүйе бойынша (жартылай автоматты блоктау – ЖАБ, автоматты блоктау – АБ және радиоблоктау – РБ) салыстырмалы модельдеу жүргізіліп, олардың техникалық және операциялық артықшылықтары мен шектеулері талданды.

ЖАБ жүйесі қарапайым құрылымымен ерекшеленсе де, интервал ұзақтығының үлкендігі мен қолмен басқаруға тәуелділігі жүйенің өткізу қабілетін шектейді.

АБ жүйесінде автоматтандырылған блоктар арқасында интервал қысқарады және өткізу қабілеті артады, дегенмен блок ұзындығына тәуелділік сақталады. Ең озық РБ жүйесінде қозғалысты үздіксіз бақылау мен нақты уақыттағы мәліметтерді пайдалану арқылы ең аз интервалмен ең жоғары өткізу қабілеті қамтамасыз етіледі.

Графиктік модельдеу нәтижелері көрсеткендей:

- жылдамдық артқан сайын интервал қысқарады (ЖАБ жүйесінде);
- блок немесе қауіпсіз арақашықтық ұзындығы артқан сайын өткізу қабілеті төмендейді (АБ және РБ жүйелерінде);
- автоматтандыру деңгейі артқан сайын интервал азайып, жүйе тиімділігі күрт өседі;
- поезд ұзындығы ұлғайған сайын тежелу жолы артып, РБ жүйесінде интервал өседі.

Жалпы алғанда, радиоблоктау жүйесі ең тиімді болып танылды: ол қысқа интервалмен жоғары өткізу қабілетін қамтамасыз ете отырып, теміржол желісінің өткізу мүмкіндігін максималды пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл зерттеу теміржол көлігін цифрлық трансформациялау мен интеллектуалды басқару жүйелерін енгізу үшін ғылыми-тәжірибелік негіз бола алады. Алынған нәтижелер болашақта теміржол телімдерінің жұмысын оңтайландыруға, қозғалыс қауіпсіздігін арттыруға және жүк пен жолаушылар тасымалын тиімді ұйымдастыруға бағытталған стратегиялық шешімдер қабылдауға негіз бола алады.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым Комитетінің қаржылық қолдауымен, ИРН АР22685501 «Пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйелерінің темір жол желілерінің өткізу қабілеттілігіне әсерін бағалау» жобасы аясында жүзеге асырылды.

Авторлардың қосқан үлесі.

Шукманов Ж.Е. – тұжырымдаманы құру, зерттеу жүргізу, әдебиетпен жұмыс

Сүлейменова Г.А. – зерттеу нәтижелерін талдау және синтездеу, валидациялау және интерпретациялау

Әдебиеттер тізімі

1. Сансызбай Қ.М., Орунбеков, М.Б., Шукманов, Ж.Е., Тасболатова, Л.Т., Сагмединов, Д.С. Общие тенденции развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики на сети железных дорог Казахстана // Вестник КазАТК. – 2022. – № 2 (121). – С. 414-424. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2022-121-2-414-424>
2. Шукманов Ж.Е., Сүлейменова Г.А., Тогжанова К.О., Джулаева Ж.Т., Жұмахан Н. Үш мәнді пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесінде пойыз аралық интервалының блок-телім ұзындығына тәуелділігін анықтау // ҚазККА хабаршысы. – 2024. – № 5 (134). – Б. 188–194. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-188-194>
3. Шукманов Ж.Е., Сүлейменова Г.А., Орунбеков М.Б., Есмаханова Л.Н., Тлемисов Б.Б. ПҚИРЖ-Е жүйесінде радиобайланыстың рұқсат етілген ең ұзақ болмау уақытын есептеу // «Қазақстан ғылымы мен техникасы» ғылыми журналы. – 2024. – № 4. – Б. 362-371. <https://doi.org/10.48081/XMCL2311>
4. Киселева О.Г., Шукманов Ж.Е., Жеңісова А.Д., Пейшбек А.Ә. Эффективность регулировочных мероприятий на железнодорожном транспорте с использованием прогнозных данных // Вестник КазАТК. – 2020. – № 3 (114). – С. 131-136. <https://vestnik.alt.edu.kz/index.php/journal/issue/view/2/2>
5. Концепция развития транспортно-логистического потенциала Республики Казахстан до 2030 года, утвержденный Постановлением Правительства Республики Казахстан № 1116 от 30 декабря 2022 года. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2200001116>
6. Алиев А.К., Жақсыбаев А.С. Поезд қозғалысын басқарудың автоматтандырылған жүйелері және қозғалыс қауіпсіздігі. – Алматы: Транстех баспасы, 2021. – 312 б.
7. Калиев Б.С., Тажибаев Ж.Ш. Теміржол көлігінде пойыз қозғалысын ұйымдастыру. – Алматы: Эверо, 2020. – 256 б.
8. Жарқынов Н.Ш. Теміржол көлігіндегі қозғалысты басқару және автоматтандыру

жүйелері. – Астана: ҚазҰТЗУ баспасы, 2022. – 280 б.

9. Bestemyanov P.F., Baranov L.A. Control Algorithms and Mathematical Modeling of Interval Train Traffic // Russian Electrical Engineering. – 2023. – № 94. – P. 621-624. https://doi.org/10.3103/S1068371223090055_055

10. Aliev, R. Method inductive communications for interval traffic control. AIP Conference Proceedings. – 2023. – 2612(1), 060002–060002-9. <https://doi.org/10.1063/5.0113212>

Ж.Е. Шукаманов^{*1}, Г.А. Сулейменова²

¹Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан

²АЛТУ университет имени М. Тынышпаева, Алматы, Казахстан

Оценка влияния систем интервального регулирования на межпоездной интервал

Аннотация. Железнодорожный транспорт занимает важное место в транспортной системе как надёжный и экономичный вид перевозки пассажиров и грузов. В последние годы увеличение интенсивности движения и усиление требований к безопасности требуют оптимизации пропускной способности железнодорожной сети. С этой целью моделирование систем интервального управления движением поездов становится важным инструментом обеспечения эффективности и безопасности движения. В данной статье рассматриваются эффективные способы организации движения на основе моделирования систем интервального управления между поездами. Межпоездной интервал — это пространственное или временное расстояние между поездами, обеспечивающее безопасную и стабильную работу системы. Точное определение этого интервала и его сравнительный анализ в различных системах управления (полуавтоматическая блокировка, автоматическая блокировка, радиоблокировка) позволяет повысить пропускную способность железнодорожной сети. Согласно проведённым расчётам: в системе полуавтоматической блокировки интервал составляет 660 с, пропускная способность – 5,45 поездов/ч; в системе автоматической блокировки интервал – 120 с, пропускная способность – 30 поездов/ч; в системе радиоблокировки интервал – 72 с, пропускная способность – 50 поездов/ч. Эти результаты показывают, что система радиоблокировки является наиболее эффективной системой управления движением поездов, так как она обеспечивает наименьший интервал и высокую пропускную способность. Результаты исследования могут способствовать цифровой трансформации железнодорожного транспорта, а также повышению безопасности и пропускной способности.

Ключевые слова: движение поездов, интервальное регулирование, пропускная способность, межпоездной интервал, моделирование.

Zh.E. Shukamanov^{*1}, G.A. Suleimenova²

¹M.H. Dulati Taraz University, Taraz, Kazakhstan

²ALT University M. Tynyshpayev, Almaty, Kazakhstan

Assessment of the impact of interval control systems on the inter-train interval

Abstract. Railway transport holds a significant place in the transportation system as a reliable

and cost-effective means of passenger and freight transportation. In recent years, the increasing frequency of train movements and stricter safety requirements have necessitated the optimization of railway network capacity. To this end, modeling train interval control systems has become a key tool for ensuring movement efficiency and safety. This article explores effective methods for organizing train operations through the modeling of interval control systems. The train interval is the spatial or temporal distance between trains that ensures the safe and stable operation of the system. Accurate calculation of this interval and its comparison across various control systems (semi-automatic block, automatic block, and radio block) allow for the enhancement of railway line capacity. According to the calculations: In the semi-automatic block system, the interval is 660 seconds, and the capacity is 5.45 trains/hour; In the automatic block system, the interval is 120 seconds, with a capacity of 30 trains/hour; In the radio block system, the interval is 72 seconds, providing a capacity of 50 trains/hour. These results indicate that the radio block system is the most efficient for train traffic management, as it ensures the shortest interval and the highest throughput. The research findings can contribute to the digital transformation of railway transport, improving both safety and capacity.

Keywords: train movement, interval control, throughput capacity, train interval, modeling

References

1. Sansyzbaj Қ.М., Orunbekov, M.B., SHukamanov, ZH.E., Tasbolatova, L.T., Sagmedinov, D.S. Obshchie tendencii razvitiya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki na seti zheleznih dorog Kazakhstana [General trends in the development of railway automation and telemechanics systems on the railway network of Kazakhstan] // Vestnik KazATK. – 2022. – № 2 (121). – С. 414-424. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2022-121-2-414-424> [in Russian].
2. SHukamanov ZH.E., Sulejmenova G.A., Togzhanova K.O., Dzhulaeva ZH.T., ZHymahan N. Ysh мәнді pojyzdar қозғалысын интервалды реттеу зһыесінде pojyz аралық интервалынұң блок-телім ұзындығына тәуелділігін анықтау [Determination of the dependence of the inter-train interval on the length of the block in the system of interval regulation of the movement of three-value trains] // ҚазККА habarshysy. – 2024. – № 5 (134). – В. 188–194. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-188-194>
3. SHukamanov ZH.E., Sulejmenova G.A., Orunbekov M.B., Esmahanova L.N., Tlemisov B.B. PҚIRZH-E zhyesinde radiobailanystың рұқсат етілген ең uзақ болмау uақтыын есептеу [Calculation of the maximum allowable absence of radio communication in the PCIRR-E system] // «Қазақстан қылымы мен техникасы» қылымы zhurnaly. – 2024. – № 4. – В. 362-371. <https://doi.org/10.48081/XMCL2311>
4. Kiseleva O.G., SHukamanov ZH.E., ZHeңisova A.D., Pejshbek A.Ә. Effektivnost' regulirovochnyh meropriyatij na zheleznodorozhnom transporte s ispol'zovaniem prognoznyh dannyh [Effectiveness of regulatory measures in railway transport using forecast data] // Vestnik KazATK. – 2020. – № 3 (114). – С. 131-136. <https://vestnik.alt.edu.kz/index.php/journal/issue/view/2/2> [in Russian].
5. Konceptiya razvitiya transportno-logisticheskogo potenciala Respubliki Kazahstan do 2030 goda [The concept of development of the transport and logistics potential of the Republic of Kazakhstan until 2030], utverzhdenyj Postanovleniem Pravitel'stva Respubliki Kazahstan № 1116 ot 30 dekabrya 2022 goda. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2200001116> [in Russian].
6. Aliev A.K., Zhaқsybaev A.S. Poezd қозғалысын басқарудың avtomattandyryлған зһыелери zhәне қозғалыс қауіпсіздігі [Automated train traffic control systems and Traffic Safety]. – Almaty:

Transteh baspasy, 2021. – 312 b.

7. Kaliev B.S., Tazhibaev ZH.SH. Temirzhol keliginde pojyz qozғalysyn ұjymdastyru [Organization of train traffic in railway transport]. – Almaty: Evero, 2020. – 256 b.

8. ZHarkynov N.SH. Temirzhol keligindegi qozғalysty basқaru zhәne avtomattandyru zhyjeleri [Traffic control and automation systems in railway transport]. – Astana: QazҰTZU baspasy, 2022. – 280 b.

9. Bestemyanov P.F., Baranov L.A. Control Algorithms and Mathematical Modeling of Interval Train Traffic // Russian Electrical Engineering. – 2023. – № 94. – P. 621-624. https://doi.org/10.3103/S1068371223090055_055 [in English].

10. Aliev, R. Method inductive communications for interval traffic control. AIP Conference Proceedings. – 2023. – 2612(1), 060002–060002-9. <https://doi.org/10.1063/5.0113212> [in English].

Авторлар туралы мәлімет

Шукаманов Ж.Е. – хат алмасу авторы, М.Х. Дулати атындағы Тараз университетінің «Автоматтандыру және телекоммуникация» кафедрасының аға оқытушысы, жоба жетекшісі, Төле би көшесі, 60, 080000, Тараз, Қазақстан.

Сүлейменова Г.А. – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, М. Тынышбаев атындағы АЛТ университетінің «Автоматтандыру және басқару» кафедрасының меңгерушісі, Шевченко көшесі, 97, 050000, Алматы, Қазақстан.

Шукаманов Ж.Е. – автор для корреспонденции, руководитель проекта, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и телекоммуникация» Таразского университета имени М.Х. Дулати, ул. Толе би, 60, 080000, Тараз, Казахстан.

Сулейменова Г.А. – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление» АЛТ университета имени М. Тынышпаева, ул. Шевченко, 97, 050000, Алматы, Казахстан.

Shukamanov Zh.E. – corresponding author, Senior Lecturer, Department of Automation and Telecommunications, M.H. Dulati Taraz University, Tole bi str., 60, 080000, Taraz, Kazakhstan.

Suleimenova G.A. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation and Control, ALT M. Tynyshpaev University, 97 Shevchenko str., 050000, Almaty, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 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/>)

Бас редакторы: Б.Б. Тогизбаева
Компьютерде беттеген: А. Тулеков

Авторларға арналған нұсқаулықтар,
жарияланым этикасы журнал сайтында берілген: <http://bultech.enu.kz>

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы.
Техникалық ғылымдар және технологиялар сериясы.
№3 (152)/2025 – Астана: ЕҰУ. – 280 б. Шартты б.т. – 16,4. Таралымы – сұраныс бойынша.

Басуға қол қойылды: 30.09.2025 ж.
Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://bultech.enu.kz>

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2.
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті
Тел.: +7(71-72) 70-95-00 (ішкі 31-315)

Л.Н. Гумилев атындағы
Еуразия ұлттық университетінің баспасында басылды.