

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

№4 (153)/ 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

Astana, 2025

Бас редакторы: Тогизбаева Б.Б.

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

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

Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Жауапты редактор

Закирова А.Б., қауымдастырылған профессор,

Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Редакция алқасы

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

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

Deputy Editor-in-Chief

Askar Zhussupbekov, *professor*,

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

Executive editor

Alma Zakirova, *associate professor*,

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

Editorial board

Levente Kovács	Prof., Óbuda University, Budapest, Hungary
Aljawarneh Shadi A.	Prof., Jordan University of Science and technology, Jordan
Milani Alfredo	Prof., University of 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 Сахапов	Prof., Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan
Tadatsugu Tanaka	Prof., University of Tokyo, Tokyo, Japan
Hoe Ling	Prof., Columbia University, New York, USA
G.Bekmanova	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Y.Utepov	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
A.Tulebekova	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
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., профессор, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Зам. главного редактора

Жусупбеков А.Ж., д.т.н., профессор

ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Ответственный редактор

Закирова А.Б., ассоциированный профессор,

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>

Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ
ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР СЕРИЯСЫ

ВЕСТНИК ЕВРАЗИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ Л.Н. ГУМИЛЕВА. СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

BULLETIN OF L.N. GUMILYOV EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY
TECHNICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY SERIES

№4 (153)/2025

МАЗМҰНЫ/ CONTENT/ СОДЕРЖАНИЕ

Эдвард Пауэлл

Қабырға ойықтары бар суықтай иілген болат элементтерінің жаншу-тұрақсыздық (shear buckling) мінез-құлқы

Edward Powell

Shear Buckling Behaviour of Cold-Formed Steel Members With Web Openings

Эдвард Пауэлл

Поведение стальных элементов холодной штамповки с отверстиями в перемычках при изгибе при сдвиге..... 9

Д. К.Кушалиев, Е.Т. Қалшора, А.Е.Тойлыбаев

Автомобильдің шарлы тірегіктің жұмысының проблемалары мен шешімде.....

D.K.Kushaliyev, Y.T.Kalshora, A.E.Toilibayev

Problems and Solutions in the Operation of a Car Ball Joint.....

Д. К.Кушалиев, Е.Т. Қалшора, А.Е.Тойлыбаев

Проблемы и решения работы шаровой опоры автомобиля 22

И.Абдраимов, К.Муса, Ю.Пухаренко, М.Сайлыгараева

Гиперпластификатормен және кремнеземдік микротолтырғыштармен цемент тасының гидратация өнімдерінің құрылымын зерттеу.....

I. Abdraitov, K. Musa, Yu. Pukharensko, M. Sailygarayeva

Study of the structure of hydration products of cement stone with hyperplasticizer and silica microfillers

И.Абдраимов, К.Муса, Ю.Пухаренко, М.Сайлыгараева

Изучение структуры продуктов гидратации цементного камня с гиперпластификатором и кремнеземистыми микронаполнителями..... 35

Ж.Т. Әбілдаева, Р.К. Ускенбаева, Ж.Б. Кальпеева, Н.Б. Қоңырбаев, А.О. Дәуітбаева

Агроөнеркәсіптік кешендегі жарнамалық бюджетті машиналық оқыту алгоритмі негізінде бөлуді оңтайландыру

Zh.T. Abildayeva, R.K. Uskenbaeva, Zh.B. Kalpeyeva, N.B. Konyrbaev, A.O. Dauitbayeva

Optimization of advertising budget allocation in the agro-industrial complex based on a machine learning algorithm.....

Ж.Т. Абилдаева, Р.К. Ускенбаева, Ж.Б. Кальпеева, Н.Б. Конырбаев, А.О. Даутбаева

Оптимизация распределения рекламного бюджета в АПК на основе алгоритма машинного обучения 53

А.Т.Камысбаева, Д.З. Бекжанов

Интермодальды тасымалдау: мәні мен маңызы.....

A.Katysbaeva, D. Bekzhanov

Intermodal transportation: essence and significance.....

А.Т.Камысбаева, Д.З.Бекжанов

Интермодальные перевозки: сущность и значение.....	65
Е Кудиярбек, Е.З.Нұғман, А.Қ. Мустафа, М.Қ. Сағынтай, И.М. Дюсебаев Цилиндрлік бөлшекті 3d басып шығару үшін аз инвестициямен WAAM платформасын пайдалану мүмкіндігін зерттеу	
K.E.Kudiyarbek, Y.Z.Nugma, A.K.Mustafa, M.K.Sagyntay, I.M.Dyussebayev Exploring the possibility of using the WAAM platform for 3D printing of cylindrical parts with minimal investment.....	
Қ.Е Кудиярбек, Е.З. Нұғман, А.Қ. Мустафа, М.Қ.Сағынтай, И.М. Дюсебаев Изучение возможности использования платформы WAAM для 3D-печати цилиндрической детали с минимальными инвестициями	83
Қуратулайн Саифулла , Мухаммад Фейсал Рехман, Л.А. Жаксылыкова, А.М. Саурбаева, К.К. Арынов Автомобильдер мен көшелердегі жасыл аймақтар: жол бойына өсімдіктер отырғызудың артықшылықтары мен қиындықтарына жан-жақты шолу	
Quratulain Saifullah, Muhammad Faisal Rehman, L.A. Zhaksylykova, A.M. Saurbayeva, K.K. Arynov Green areas on highways and streets: a comprehensive study of the benefits and challenges of implementing vegetation on roadways	
Қуратулайн Саифулла, Мухаммад Фейсал Рехман, Л.А. Жаксылыкова, А.М. Саурбаева, К.К. Арынов Зелёные зоны вдоль автомагистралей и улиц: комплексный взгляд на преимущества и вызовы внедрения растительности в дорожную инфраструктуру....	96
А.К. Каукаров, Б.У. Жаманбаев, У.Ш. Кокаев, Н.С. Сауханов, Э.А.Бегимкулова Іштен жану қозғалтқышының цилиндріндегі компрессиялық поршендік сақиналарының қысымының таралуын салыстырмалы талдау	
A.K. Kaukarov, B.U. Zhamanbayev, U. Sh. Kokayev, N.S. Saukhanov, E.A. Begimkulova Comparative analysis of pressure distribution of compression piston rings in an internal combustion engine cylinder.....	
А.К. Каукаров, Б.У. Жаманбаев, У.Ш. Кокаев, Н.С. Сауханов, Э.А. Бегимкулова Сравнительный анализ распределения давления компрессионных поршневых колец в цилиндре двс	111
И.И. Остапенко, Н.Ш. Сеитова, Д.Г. Дюсенова, А.М. Есенбаев Экологиялық агроархитектурадағы кеңістіктің семиотикасы.....	
I.I. Ostapenko, N.S. Seitova, D.G. Dyussenova, A.M. Yessenbayev Semiotics of space in ecological agroarchitecture.....	
И.И. Остапенко , Н.Ш. Сеитова, Д.Г. Дюсенова, А.М. Есенбаев Семиотика пространства в экологической агроархитектуре.....	124
Х.Молдамурат, Д.Калманова, А. Базарбек, С.К.Атанов, Н. Ырыскелді Орман өрттерін бақылауда ұшқышсыз ұшу аппараттарының деректерін өңдеу үшін Python бағдарламаларын пайдалану.....	
Х. Молдамурат, Д. Калманова, А. Базарбек, С. Атанов, Н. Ырыскелді Использование программ Python для обработки данных беспилотных летательных аппаратов для мониторинга лесных пожаров.....	
Kh. Moldamurat, D. Kalmanova, A. Bazarbek, S. Atanov, N. Yryskeldi Using Python programs to process data from unmanned aerial vehicles for forest fire monitoring.....	139

Д.С. Мырзалиев, Яцек Цеслик, О.Б. Сейдуллаева, А.Аманов <i>SolidWorks-тегі соңғы элементтер арқылы тістегеріштің кернеулі деформацияланған күйін талдау</i>	
D.S. Myrzaliyev, J.Cieslik, O.B. Seidullayeva, A.Amanov Analysis of the stress-strain state of gears by the finite element method in SolidWorks	
Д.С.Мырзалиев, Я.Цеслик, О.Б.Сейдуллаева, А.Аманов Анализ напряженно-деформированного состояния шестерен методом конечных элементов в SolidWorks.....	152
А.С.Кадыров, А.Б.Кукешева, М.С.Дәрібжан, Е.С.Бақытов, А.Ж.Карсакова Карьерлік техниканың агрегаттарының жөндеу интервал уақыт аралығын оңтайландыру әдісін құру	
A.S. Kadyrov, A.B. Kukeshova, M.S.Daribzhan, E.S.Bakytov, A.Zh.Karsakova Development of a Methodology for Optimizing Repair Intervals of Open-Pit Mining.Equipment Units	
А.С.Кадыров, А.Б.Кукешева, М.С.Дәрібжан, Е.С.Бақытов, А.Ж.Карсакова Формирование методики оптимизации интервалов ремонта агрегатов карьерной техники.....	167
М. Қ.Сулейменов, М. Қ.Омарбаев, Т. Қ.Жакенова, Д. С.Назаргалиева Шағын үдеткіш блоктардың іске асыру схемаларын салыстырмалы талдау	
M. K.Suleimenov, M. K.Omarbayev, . K. T. Zhakenova, D. S.Nazargaliyeva Comparative analysis of the small upper stages implementation schemes.....	
М. К. Сулейменов , М. К.Омарбаев , Т. К.Жакенова , Д.С. Назаргалиева Сравнительный анализ схем реализации малых разгонных блоков.....	190
А.М. Табинбаев, К.К. Джолдасова, А.М. Биниязов, А.С. Денисов Форсирленген дизельді қозғалтқыштардың өнімділігін майлау жүйесіндегі май көлемін басқаруды жақсарту арқылы арттыру	
A.M. Tabinbayev, K.K. Dzholdasova, A.M. Biniyazov, A.S. Denisov Enhancing the performance of forced-induction diesel engines by improving oil volume management in the lubrication system.....	
А.М. Табинбаев, К.К. Джолдасова, А.М. Биниязов, А.С. Денисов Повышение производительности форсированных дизельных двигателей за счет улучшения управления объемом масла в системе смазки.....	214
К.Г.Балабекова, А.Б.Забиева, А.М. Арпабекова, О Абдирашев Экскаватор шөмішінің тістеріне түсетін жүктемені зерттеу.....	
K. G. Balabekova, A. B. Zabieva, A.M.Arpabekova, O.Abdirashev Study of the load on the teeth of the excavator bucket	
К. Г.Балабекова, А. Б. Забиева, А. М.Арпабекова, О. Абдирашев Исследование нагрузки на зубья ковша экскаватора.....	235
М.М. Мұсаев, К.Т. Шеров, Г.Б. Абдуғалиева, Ж. Толғанай, Г. Таттимбек Аустениттік 110Г13Л болаттан жасалған тетіктерді механикалық өңдеу мәселелері	
M.M. Mussaev, K.T. Sherov, G.B. Abdugaliyeva, Zh. Tolganay, G. Tattimbek Problems of mechanical processing of parts from austenitic steel 110g13l	
М.М. Мусаев, К.Т. Шеров, Г.Б. Абдуғалиева, Ж. Толғанай, Г. Таттимбек Проблемы механической обработки деталей из аустенитной стали 110Г13Л.....	247
А.Ш. Машканов, Ж.Б. Ахаева, А.Б.Закирова PDF файлдарынан мәзірлерді машиналық оқыту мен табиғи тілді өңдеу тәсілдері арқылы автоматты түрде шығару және құрылымдау.....	

A.S. Mashkanov , Zh.Akhayeva , A.Zakirova

Automated extraction and structuring of menus from PDF files using machine learning and NLP techniques.....

А.Ш. Машканов, Ж.Б. Ахаева, А.Б.Закирова

Автоматизированное извлечение и структурирование меню из PDF-файлов с использованием методов машинного обучения и обработки естественного языка (NLP).....

257



IRSTI
67.01.05

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-9-21>

Shear Buckling Behaviour of Cold-Formed Steel Members With Web Openings

Edward Powell 

Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, Sheffield, UK

E mail: ewpowell1@sheffield.ac.uk

Abstract. Cold-formed steel (CFS) sections have become a common choice in modern construction because they offer considerable strength while remaining lightweight and straightforward to install. When openings are cut into the web to accommodate building services, however, the way these members carry shear can change substantially. In this work, the behaviour of channel sections containing such openings is examined in detail. A series of nonlinear Finite-Element (FE) simulations was created, each including the influence of initial geometric imperfections, and the numerical responses were compared with available test data to ensure they reflected physical behaviour. After validation, the models were used to study how different variables, including the shape of the opening, its size, and the slenderness of the web, affect shear resistance. The numerical results indicate a sharp drop in capacity when the openings become large or when the web is relatively thin, with the most severe cases showing reductions approaching 90% for opening size and roughly one-third for web slenderness.

Keywords: Cold-Formed Steel; Shear Buckling; Web Opening; FE Modelling; Channel Section

Introduction

Cold-formed steel (CFS) has become an integral material in modern construction, used not only in secondary framing but increasingly as a primary structural component. It appears in systems such as sheathed wall panels [1–3] and various forms of moment-resisting assemblies [4–10]. Its growing use is driven by several practical advantages: a favourable strength-to-weight ratio, relatively low fabrication and handling cost, and the ability to transport and assemble components with minimal effort. Unlike hot-rolled steel, CFS sections are shaped without the application of heat, allowing thin steel sheets to be formed into a wide range of profiles and giving designers considerable geometric flexibility [11–16].

As higher-strength steels have become more readily available and construction methods have evolved, the overall demand for CFS has steadily increased, particularly in low- to mid-rise structures. Commonly adopted profiles include channels, Z-sections, and hat-shaped members. In routine building practice, openings are frequently cut into the webs of these members to accommodate electrical conduits, plumbing runs, and HVAC services. Although necessary, these penetrations disturb the original stress field and can reduce both the shear resistance and the stability of the member, influencing the form and progression of buckling [17]. The Direct Strength Method (DSM), introduced by Schafer [18], provides an alternative to the classical Effective Width Method [19] for predicting the strength of CFS elements. DSM relies on elastic buckling analyses, often undertaken using tools such as CUFSM [20], to estimate capacity and is incorporated into the AISI S100-16 design standard [21]. Early work on the influence of web openings on shear behaviour was conducted by Shan et al. [22], who identified the need for reduction factors due to shortcomings in existing AISI provisions.

Subsequent work by Eiler et al. [23] extended these ideas to cases involving non-uniform shear, producing revised coefficients that were later adopted into the S100-16 specification. Keerthan and Mahendran [24] carried out experimental testing on lipped channel beams with circular openings and complemented their work with ABAQUS-based finite-element studies [25], concluding that current design methods tend to over-predict capacity. Pham and Hancock [26], through a series of 24 physical tests, also observed substantial reductions in shear strength, in some cases approaching 74%.

Despite the increasing use of CFS in structural systems, the specific behaviour of members containing web openings remains insufficiently explored. The available design guidance, particularly within AISI S100 [21], appears unconservative for perforated members, and Eurocode provisions currently offer no explicit rules addressing shear in such elements. Although Pham and Hancock [26] proposed strength equations, their formulation was based on a relatively limited set of specimens. This highlights the need for a broader and more systematic investigation into how opening geometry and section characteristics influence shear capacity across a wider parameter range.

The present study aims to fill this gap. Detailed finite-element models were created in ABAQUS CAE 2017 [25], incorporating both material nonlinearity and geometric imperfections, and were calibrated against the experimental results reported by Pham and Hancock [26]. After validation, these models were used to conduct a comprehensive parametric study exploring the effects of opening size and shape, as well as web slenderness, on shear response and associated failure modes. Insights from this analysis were then used to propose and evaluate a design expression for estimating the shear strength of perforated CFS members.

The methodology

To investigate the shear behaviour of CFS members with web openings, validated FE models were developed in ABAQUS CAE 2017 [25], incorporating material and geometric nonlinearities. These models were calibrated using the experimental data by Pham and Hancock [26].

The experimental setup comprised 24 back-to-back lipped channel specimens tested at the University of Sydney [26], including 19 with square web openings (40–120 mm) and 5 control specimens (Fig. 1). Each beam had a 450 mm span with a 200 mm shear span and was tested under three-point bending. Section dimensions were $202 \times 18 \times 77$ mm, with thicknesses of 1.5, 1.9, and 2.4 mm. Openings were waterjet cut, and flange distortion was mitigated using bolted angle straps, while shear was induced via bolted T-plates [26].

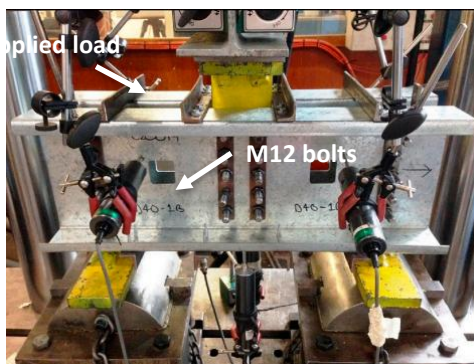


Figure 1. Experimental arrangement used for testing CFS channel sections containing web openings.

A bilinear stress-strain model was adopted with an elastic modulus of 194 GPa, a strain-hardening slope of $E/100$, and $\nu = 0.3$. Yield and ultimate strengths were $f_{y,0.2\%} = 486$ MPa and $f_u = 578$ MPa, respectively [26]. Supporting plates were modelled as elastic with $E = 210$ GPa.

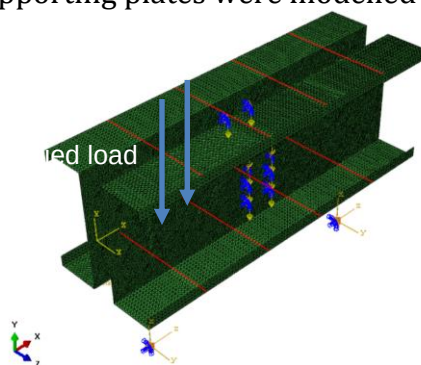


Figure 2. Modelling of the tested CFS back-to-back channel member in FE ABAQUS [17]

Loading and support conditions mirrored the physical setup. Web bolts were modelled using “Beam” elements [25] with a 12 mm circular section (Fig. 2). Load was applied at mid-span to a virtual bolt group. Supports were simulated using coupled reference points with “Connector” and “Coupling” constraints [25] to represent rollers and transfer loads.

The FE models were built using the S3R formulation from the ABAQUS element library [25], which is a three-node triangular shell element with reduced integration. This option was selected

because it captures the behaviour of thin steel plates effectively, including the small amount of transverse shear that remains significant in moderately thick regions of the section. As the plates become thinner, this shear component diminishes naturally. Several trial meshes were tested to balance run time with solution accuracy, and a uniform element size of roughly 6 mm was ultimately adopted, as it provided stable results without unnecessary computational cost.

The role of initial out-of-plane imperfections in thin-walled cold-formed members is well established, as they can influence both the onset of buckling and the peak load a member can sustain [27-37]. To reflect this behaviour, all models were assigned an imperfection amplitude of $0.15t$, where t denotes the plate thickness. The shape of each imperfection pattern was obtained by first carrying out an eigenvalue buckling analysis in ABAQUS to extract the corresponding mode shape. This mode shape was then scaled to the prescribed magnitude and superimposed on the base geometry before running the nonlinear analyses.

The FE models were verified using a nonlinear post-buckling analysis based on the RIKS arc-length method [25], demonstrating strong correlation with both the experimental load-displacement responses (see Fig. 3). The average discrepancies observed were approximately 3% for peak shear resistance and 5% for initial stiffness. Specimens either without web openings or with relatively small ones (e.g., S19-040) exhibited abrupt shear buckling following the peak load. In contrast, those with larger openings (e.g., S19-120) experienced early onset of local buckling and displayed more gradual, ductile behaviour beyond the peak load.

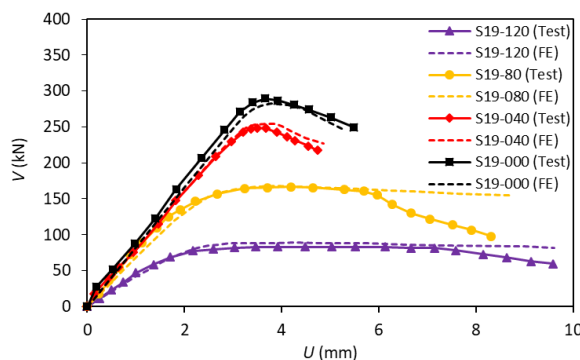


Figure 3. Shear-displacement ($V-U$) from FE models and tests [26]

For members without openings (S19-000) or with small openings (S19-040), the load-displacement response was nearly linear up to a distinct peak, followed by a sharp drop due to shear buckling. In contrast, members with larger openings (S19-080 and S19-120) showed early signs of yielding or local buckling near the openings, resulting in a less linear response. Their peak load was reached with a plateau, followed by a more gradual and ductile unloading phase.

To examine how web perforations affect the shear response of CFS members, an extensive parametric programme was carried out using 136 FE simulations. The model set was arranged to explore the main geometric factors thought to influence behaviour: the size of the opening, its shape, and the slenderness of the web. Both square and circular perforations were included so that differences in buckling patterns and load-deformation characteristics could be captured. For the circular openings, an equivalent square dimension was calculated using the relationship $d_h = 0.825D_h$, following the approach outlined by Pham and Hancock [26], where D_h denotes the hole diameter. Of the total simulations, 80 represented sections with square openings, and the remaining 56 used circular ones, with all specimens analysed under shear-critical conditions.

The opening dimensions used in the study ranged from no perforation at all to a maximum size of 160 mm, increasing in increments of 10 mm to capture a broad set of practical configurations. For clarity in interpreting the results, the ratio d_h/h , with $h = 202\text{mm}$ representing the clear web depth, was used to classify the openings into three groups: small ($d_h/h < 0.2$), medium ($0.2 \leq d_h/h \leq 0.5$), and large ($d_h/h > 0.5$). Variations in web slenderness were introduced by adjusting the plate thickness while keeping the web height unchanged, producing h/t values corresponding to five commercially available thicknesses: 1.2, 1.5, 1.9, 2.4, and 3.0 mm. Selecting these sizes allowed the study to bridge gaps left in earlier research. This parametric arrangement provided the basis for assessing how shifts in geometry and thickness influence ductility, stiffness, and shear strength, ultimately supplying the information needed to develop a practical design approach for perforated CFS webs.

Findings/Discussion

Figure 4 illustrates how the normalised shear capacity V_u/V_0 changes as the opening ratio d_h/h increases for beams with various web slenderness values h/t . In this context, V_u denotes the peak shear resistance of the perforated member, while V_0 represents the corresponding value for a member without openings. The quantity V_u/V_0 , commonly described as the shear reduction factor q_s , offers a straightforward way to adjust the solid-web design predictions for use with perforated sections. The discussion that follows examines how both opening size and web slenderness shape the overall shear response, including the behaviour beyond the peak load.

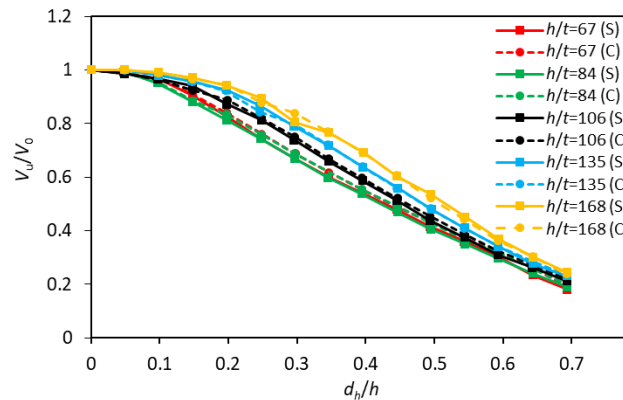


Figure 4. Variation of normalised shear capacity (V_u/V_0) with web opening ratio (d_h/h) for CFS beams of differing web slenderness (h/t), comparing specimens with square (S) and circular (C) openings [17]

As shown in Fig. 4, increasing the size of the web opening leads to a clear downward trend in shear capacity for all considered values of web slenderness, with the curve developing a characteristic double-curvature form. When the openings are small ($d_h/h < 0.2$), the reduction in strength remains modest, generally less than about 20%. In the mid-range ($0.2 \leq d_h/h \leq 0.5$), the loss of capacity becomes more progressive and follows an almost linear pattern. Once the opening extends beyond roughly half of the web depth, the reduction becomes substantial, and the ultimate strength may fall by as much as 80%. This highlights the need for caution when large penetrations are introduced, as they can severely undermine the section's ability to resist shear. Fig. 5 illustrates the corresponding buckling shapes and Von Mises stress fields from the FE models for beams with circular openings of different sizes. For the smallest openings, the behaviour is governed by

diagonal shear buckling accompanied by the formation of a tension field (Fig. 5a). With larger holes, however, yielding and localised buckling develop at the edges of the perforations (Figs. 5b and 5c), mirroring the pronounced drop in shear resistance observed in the numerical results.

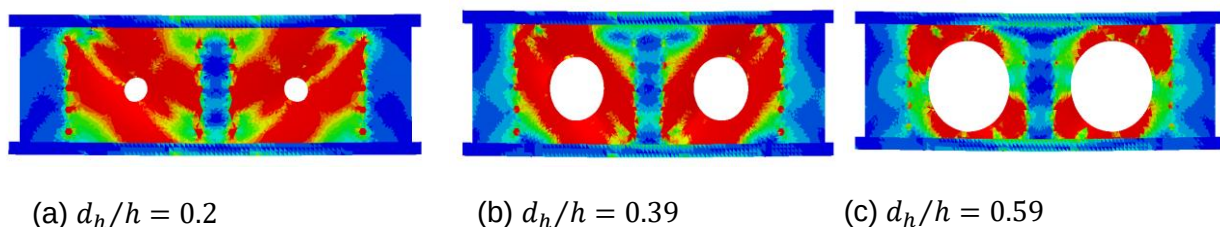


Figure 5. Buckling shapes and Von Mises stress distributions obtained from FE models of CFS beams with various circular opening sizes [17]

Figure 6 shows that the normalised shear capacity V_u/V_0 declines as the web becomes less slender—that is, as the h/t ratio decreases. The magnitude of this reduction depends strongly on the opening ratio d_h/h , with the influence becoming much more pronounced when the openings are of medium or large size. For members with small perforations, reducing the slenderness from 135 to 67 results in only a modest drop of roughly 12% in V_u/V_0 . When larger openings are present, the same change in slenderness can reduce shear strength by as much as 20%. The post-peak Von Mises stress distributions in Fig. 6 illustrate this behaviour for different combinations of slenderness and opening size. Beams with higher slenderness, meaning relatively thin webs, develop noticeable tension field action (TFA), which enhances their ability to carry shear. Thicker webs, represented by lower h/t ratios, tend not to form a well-defined tension field and instead show earlier yielding, which explains the overall reduction in performance.

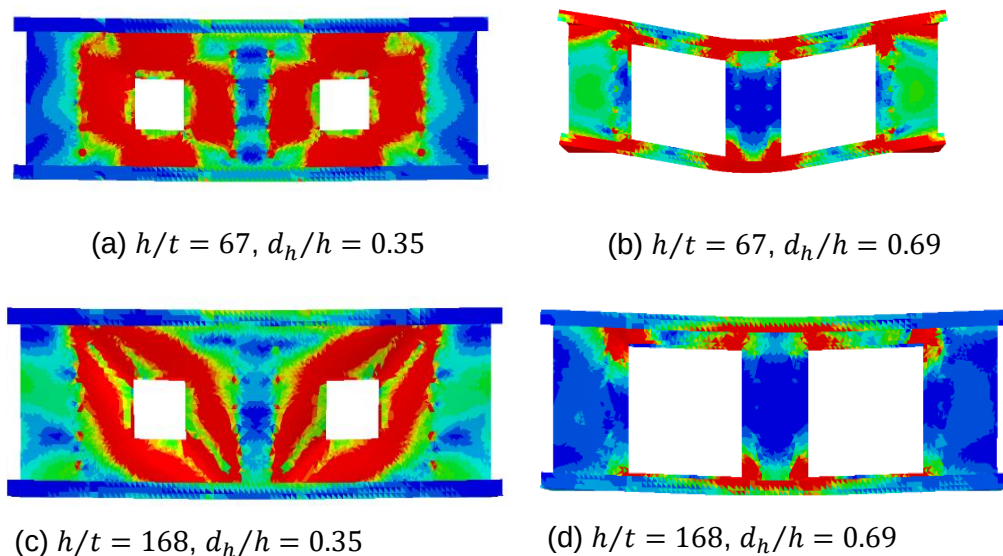


Figure 6. Buckling modes and Von Mises stress contours for CFS beams featuring various combinations of web slenderness and opening dimensions [17]

Conclusion

This study examined how CFS members behave in shear when their webs contain openings and the implications for design. Nonlinear FE models that included both material yielding and initial imperfections were created and checked against available test results. After validation, the models were used in a broad parametric investigation to assess how factors such as stiffness, strength, and failure patterns influence shear response. From these outcomes, a practical strength expression for perforated sections was developed and compared with predictions from current design provisions, including AISI S100-16. The investigation confirmed that increasing the size of web openings consistently led to reduced shear capacity, independent of opening shape. For small openings ($d_h/h < 0.2$), strength reductions remained modest, not exceeding 20%. However, as the opening size increased ($0.2 \leq d_h/h \leq 0.5$), the strength declined more linearly. Openings exceeding half the web depth ($d_h/h = 0.5$) resulted in up to 80% loss of shear strength. Additionally, reducing the web slenderness (h/t) further diminished the shear capacity, particularly in members with medium to large openings. Sections with higher slenderness benefited from TFA, enhancing their resistance, while thicker webs (lower slenderness) primarily yielded without significant TFA contribution.

References

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. S.M. Mojtabaei, J. Becque, I. Hajirasouliha, Structural Size Optimization of Single and Built-Up Cold-Formed Steel Beam-Column Members, *Journal of Structural Engineering*, 147 (2021) 04021030.
15. 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.
16. 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.
17. E. Powell, S.M. Mojtabaei, A. Liew, I. Hajirasouliha, Shear Strength Design of Cold-Formed Steel Channel Sections with Web Openings, *Engineering Structures*, 88 (2023) 102345.
18. B.W. Schafer, Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design, *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (2008) 766-778.
19. CEN, Eurocode 3: design of steel structures, part 1.3: general rules—supplementary rules for cold formed members and sheeting, in, Brussels: European Committee for Standardization, (2005).
20. B.W. Schafer, S. Ádány, Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods, Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orland, (2006).
21. AISI S100-16, North American specification for the design of cold-formed steel structural members. , American Iron and Steel Institute (AISI), Washington, DC, USA, (2016).
22. M.-Y. Shan, R.A. LaBoube, W. Yu, Behavior of web elements with openings subjected to bending, shear and the combination of bending and shear, *Cent. Cold-Formed Steel Struct. Libr.*, no. May, 1994, [Online]. Available: <http://scholarsmine.mst.edu/ccfss-library/151>.
23. M.R. Eiler, R.A. LaBoube, W. Yu, Behavior of web elements with openings subjected to linearly varying shear Center for Cold-Formed Steel Structures Library, (1997) 149. <https://scholarsmine.mst.edu/ccfss-library/149>.
24. P. Keerthan, M. Mahendran, Experimental studies of the shear behaviour and strength of lipped channel beams with web openings, *Thin-Walled Structures*, 73 (2013) 131-144.
25. Abaqus/CAE User's Manual, version 6.7, USA, (2007).

26. C.H. Pham, Y.H. Chin, P. Boutros, G.J. Hancock, The Behaviour of Cold-Formed C-Sections with Square Holes in Shear, International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. 6. <https://scholarsmine.mst.edu/isccss/22iccfss/session03/6> (2014) 311-327.
27. 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
28. Journal of Structural Engineering 150 (8), (2024) 04024088.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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
37. 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.
38. M. Cosut, S. Shakeel, S.M. Mojtabaei, I. Papargyriou, I. Hajirasouliha, Performance assessment and design of multi-storey cold-formed steel frames with strap-braced wall panels in seismic regions, Thin-Walled Structures, (2025) 113706.

Эдвард Пауэлл

Университет Шеффилда, Шеффилд, Великобритания

Поведение стальных элементов холодной штамповки с отверстиями в перемычках при изгибе при сдвиге

Аннотация. Профили из холодногнутой стали (CFS) стали широко применяться в современном строительстве, поскольку обеспечивают высокую прочность при малом весе и простоте монтажа. Однако при выполнении отверстий в стенке профиля для размещения инженерных коммуникаций характер восприятия сдвиговых усилий может существенно измениться. В данной работе подробно исследуется поведение швеллерных профилей с такими отверстиями. Была разработана серия нелинейных конечно-элементных (FE) моделей, в которых учитывались начальные геометрические несовершенства, а полученные численные результаты сравнивались с доступными экспериментальными данными для подтверждения их физической достоверности. После валидации модели использовались для анализа влияния различных параметров, включая форму отверстия, его размер и гибкость стенки, на сдвиговую несущую способность. Численные результаты показывают резкое снижение несущей способности при увеличении размеров отверстий или при повышенной гибкости стенки. В наиболее неблагоприятных случаях наблюдалось снижение до 90% из-за размера отверстия и примерно на одну треть — из-за гибкости стенки.

Ключевые слова: холодногнутая сталь; потеря устойчивости при сдвиге; отверстие в стенке; конечно-элементное моделирование; швеллерный профиль.

Эдвард Пауэлл

Шеффилд университеті, Шеффилд, Ұлыбритания

Қабырға ойықтары бар суықтай иілген болат элементтерінің жаншу-тұрақсыздық (shear buckling) мінез-құлқы

Аңдатпа. Суықтай иілген болат (CFS) профильдері қазіргі құрылыс саласында кеңінен қолданылады, себебі олар жеңіл әрі орнатуға оңай бола тұра, айтарлықтай беріктікке ие. Алайда инженерлік коммуникацияларды өткізу үшін профильдің қабырғасына ойықтар жасалғанда, оның жаншу-срез күштерін қабылдау қабілеті едәуір өзгеруі мүмкін. Бұл жұмыста мұндай ойықтары бар арналық (channel) профильдердің мінез-құлқы жан-жақты зерттелді. Алдын ала геометриялық кемшіліктері ескерілген бірқатар сызықтық емес ақырлы элементтер (FE) модельдері құрылып, олардың нәтижелері қолда бар эксперименттік деректермен салыстырылып, физикалық шынайылығы тексерілді. Валидациядан кейін модельдер ойықтың пішіні, өлшемі және қабырға жіңішкелігінің (slenderness) жаншуға қарсы беріктікке әсерін зерттеу үшін қолданылды. Сандық нәтижелер ойықтың үлкен болуы немесе қабырғаның тым жіңішке болуы беріктікке айтарлықтай әсер ететінін көрсетеді. Ең қолайсыз жағдайларда ойық өлшеміне байланысты беріктік шамамен 90%-ға дейін, ал қабырға жіңішкелігіне байланысты шамамен үштен бір бөлігіне дейін төмендеген.

Түйінді сөздер: суықтай иілген болат; жаншу тұрақсыздығы; қабырға ойығы; ақырлы элементтер моделдеуі; арналық қима.

References

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. S.M. Mojtabaei, J. Becque, I. Hajirasouliha, Structural Size Optimization of Single and Built-Up Cold-Formed Steel Beam-Column Members, Journal of Structural Engineering, 147 (2021) 04021030.

15. 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.

16. 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.
17. E. Powell, S.M. Mojtabaei, A. Liew, I. Hajirasouliha, Shear Strength Design of Cold-Formed Steel Channel Sections with Web Openings, *Engineering Structures*, 88 (2023) 102345.
18. B.W. Schafer, Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design, *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (2008) 766-778.
19. CEN, Eurocode 3: design of steel structures, part 1.3: general rules—supplementary rules for cold formed members and sheeting, in, Brussels: European Committee for Standardization, (2005).
20. B.W. Schafer, S. Ádány, Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods, Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orland, (2006).
21. AISI S100-16, North American specification for the design of cold-formed steel structural members. , American Iron and Steel Institute (AISI), Washington, DC, USA, (2016).
22. M.-Y. Shan, R.A. LaBoube, W. Yu, Behavior of web elements with openings subjected to bending, shear and the combination of bending and shear, *Cent. Cold-Formed Steel Struct. Libr.*, no. May, 1994, [Online]. Available: <http://scholarsmine.mst.edu/ccfss-library/151>.
23. M.R. Eiler, R.A. LaBoube, W. Yu, Behavior of web elements with openings subjected to linearly varying shear Center for Cold-Formed Steel Structures Library, (1997) 149. <https://scholarsmine.mst.edu/ccfss-library/149>.
24. P. Keerthan, M. Mahendran, Experimental studies of the shear behaviour and strength of lipped channel beams with web openings, *Thin-Walled Structures*, 73 (2013) 131-144.
25. Abaqus/CAE User's Manual, version 6.7, USA, (2007).
26. C.H. Pham, Y.H. Chin, P. Boutros, G.J. Hancock, The Behaviour of Cold-Formed C-Sections with Square Holes in Shear, International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. 6. <https://scholarsmine.mst.edu/isccss/22iccfss/session03/6> (2014) 311-327.
27. 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
28. *Journal of Structural Engineering* 150 (8), (2024) 04024088.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. 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

37. 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.

38. M. Cosut, S. Shakeel, S.M. Mojtabaei, I. Papargyriou, I. Hajirasouliha, Performance assessment and design of multi-storey cold-formed steel frames with strap-braced wall panels in seismic regions, *Thin-Walled Structures*, (2025) 113706.

Information about the author:

Edward Powell. – PhD in Construction, Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, Sheffield, UK

Эвард Пауэлл. – Доктор философии в области строительства, факультет гражданского строительства, Университет Шеффилда, Шеффилд, Великобритания

Эдвард Пауэлл. - Құрылыс ғылымдарының PhD, Шеффилд Университетінің Құрылыс Және Құрылымдық Инженерия Кафедрасы, Шеффилд, Ұлыбритания



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 73.31.41
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-22-34>

Автомобильдің шарлы тірегінің жұмысының проблемалары мен шешімдері

Д. К.Кушалиев¹ , Е.Т. Қалшора¹ *, А.Е.Тойлыбаев² 

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

²ALT Академиясы, Алматы, Қазақстан

E mail: 1yespenbet_kalshora@mail.ru, kushaliyev_dk@enu.kz, a.toilybaev@alt.edu.kz

Аңдатпа. Мақалада шарлы тірек ақаулығының белгілері көрсетілген. Автокөліктің жүруі кезінде бұл элемент жол бетінің кез-келген әсерін көтереді, яғни пайдалану жағдайында ол үлкен жүктемелерге ұшырайды. Авторлар кері-айналмалы қозғалысқа арналған инновациялық жөндеу жинағы арқылы шарлы тіректің қызмет ету мерзімін арттыруды ұсынады. Бұл жұмыста тұрақтандыру, тозудың режимі мен біркелкілігінің нәтижесі көрсетілген. Біліктің немесе сыртқы сақинаның кері-айналмалы қозғалысы кезінде серіппелі төсемнің бұралуы арқылы қол жеткізіледі, сәйкесінше серіппелі төсемнің ішкі немесе сыртқы бетінде тежеу пайда болады да (храповик эффектісі), серіппені орау бағытына байланысты тек бір бағытта мәжбүрлі түрде бұрылады. Жұмыс барысында үйкелетін жанасу беттері өзгеріп отырады, бұл олардың тозуының төмендеуіне әсер етеді. Осы шарттар сақталу үшін, осы шарттар орындалуы мүмкін айналмалы қозғалысқа арналған сырғанау мойынтіректерінің дизайны ұсынылды. Осы мақсатта мойынтірек бұрандалы цилиндрлік серіппе (аралық элемент) түріндегі жылжымалы төсеммен жабдықталған, ол тербелмелі режимде тек бір бағытқа мәжбүрлі түрде айналады және осылайша тозудың біркелкілігін қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: Автокөлік аспасы, шарлы тірек, үйкеліс, серіппе, композитті материалдар

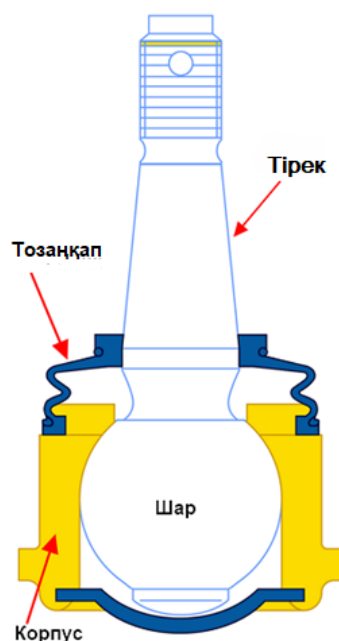
Кіріспе

Шарлы тірек – автокөлік аспасының негізгі компоненттерінің бірі болып табылады. Аталған бөлшек бірнеше он жылдықтар бұрын жасалғанына қарамастан, ол көп өзгеріссіз қалды және бүгінгі күнге дейін автомобильдің аспа жүйесінде, капотты бекітетін механизмде, теңестіру рычагында және рөлдік механизм сияқты басқа да компоненттерде қолданылып келеді. Бөлшек негізінен ауыстырмалы-тұтынылатын болғанына қарамастан, ол салмағы жағынан ауыр және өңдеп қайта пайдалануды шектейтін бекітілетін шарнирлі қосылыстарға тамаша балама болды.

Шарлы тірек – жетекші доңғалақтың ступицасын қозғалмалы рычагтармен байланыстыратын автомобиль аспасының элементі. Оның негізгі функциясы – тік ось бойымен қозғалмай, дөңгелектердің кедергісіз айналуын қамтамасыз ету. Көбінесе, біз басқарылатын дөңгелектер туралы айтамыз, яғни шарлы тірек барлық жерде алдыңғы жетекті автокөліктер аспасында қолданылады. Шарлы тіректі пайдалану дөңгелектердің тік жазықтықта қозғалуын болдырмауға және көлденең айналуын сақтауға мүмкіндік береді.

Тіректің ең кең таралған түрі – дөңгелекке бір шарлы тіректің орнатылуы, яғни барлығы екі тірек болады. Дегенмен, кейбір автомобильдерде, әсіресе жол талғамайтын көліктерде, әр дөңгелекте жоғарғы және төменгі тіректер пайдаланылады.

Кейбір автокөліктер тек алдыңғы ғана емес, сонымен қатар артқы тәуелсіз аспалармен, соның ішінде көпрычагты аспамен жабдықталған. Бірақ мұндай нұсқалар сирек кездеседі. Айта кету керек, жүріс бөлігіндегі шарлы тіректердің көбеюі диагностиканың және жөндеудің құнын қиындатады, сәйкесінше ұзақ мерзімді пайдалануды қамтамасыз етеді, сенімділікті арттырады және сыну ықтималдығын азайтады. Шарлы тіректің құрылысы 1 суретте көрсетілген.



1-сурет. Шарлы тіректің құрылысы

Жеңілдетілген түрде, тірек корпус ішінде қимыл жасайтын сфералық саусақ деп қарауға болады. Егер берілген суретті толығырақ талдайтын болсақ, бірнеше маңызды элементтерді ажыратуға болады:

- саусақтың бір ұшында сфералық бөлігі бар және келесі ұшында резьба салынған;
- цилиндр тәрізді өзек саңылауы және бекітпелері бар металл корпус;
- тіректің төменгі бөлігінде полимерден жасалған завальцовка бар, ол шайбаны орнына қысып ұстайды.
- тозаңқап – құрылғының корпусын жолдағы кірден қорғауға арналған тығыздағыш серпімді резеңке элемент.

О бастағы нұсқасында шарлы тірек пластинаны серіппе тәрізді басып тұратын және үнемі майлауды қажет ететін. Қазіргі үлгі әлдеқайда жеңілдетілген, өйткені оның құрамында алғашқы пластиктен, кейінірек тозуға төзімді нейлоннан жасалған альтернатива бар. Көптеген автокөлік әуесқойлары үшін техникалық қызмет көрсетілмейтін тіректерді кеңінен қолдану жатады. Автокөліктің ескі модельдерінде шарикті тірек тек ауыстырылатын элемент емес: ол жиналмалы және май құюды қамтамасыз етті. Қазіргі уақытта рычаг пен тіректерді біріктіруге тырысады. Бұл компоненттердің шығындарын арттырады, өйткені бұзылған жағдайда бүкіл біріккен бөлшекті ауыстыру керек. Мұндай шешімнің артықшылықтарына дизайнды жеңілдету және салмақты азайту кіреді, өйткені бұл принцип арқылы біршама ауырлық беретін бекіту болттарынан арылуға болады. Шарлы тіректің ақаулық белгілері. Жүру кезінде жолдағы әрбір соққы осы элементке түсетіні анық, яғни ол үлкен жүктемелерге кезігеді. Сондықтан шарлы тіректерді ауыстырудың қарапайым болуы негізгі шарт болып табылады. Бұл бөлшектің бұзылу себептеріне мыналар жатады:

Тозаңқаптың зақымдануы. Осы маңызды элементтің жыртылуының себебінен абразивті материалдар түріндегі құм мен әртүрлі жол қоқыстары жырыққа қалай түсе бастайтынын байқауға болады. Тозаңқап резеңкеден жасалғандықтан, олар төмен немесе керісінше жоғары температурада тозуға бейім келеді;

Жолсыздық. Өкінішке қарай, бұл фактор біздің елімізде аса маңызды, сондықтан тіректерді ғана емес, көп жағдайда басқа жүру бөлігінің детальдарын бірнеше есе жиі ауыстыру керек;

Майлау өндірісі. Үйкеліс орын алатын жерде майлау өте маңызды, өйткені бұл тіректің тез тозуына себеп болады. Желіну. Сонымен қатар, жұмыс кезінде үйкелістің нәтижесінде втулка мен шарлы саусақ желінеді, бұл пайда болған саңылаудың ұлғаюына және шарлы саусақтың ұядан шығып кетуіне алып келеді. Ақаулықтың алғашқы белгілері келесі жағдайларда пайда болады:

Аспадан шыққан шу. Көліктің алдыңғы бөлігінен шыққан дыбыстар жолдағы кедергілерді немесе 30 км/сағ жоғары жылдамдықта келе жатқан кездегі шұңқырларды еңсеру кезінде таралуы мүмкін. Әдетте бұл шу шарлы саусақ астындағы вкладыштың толық тозуынан немесе майлаудың жетіспеушілігінен болуы мүмкін;

Дөңгелектің шайқалуы. Егер люфт пайда болса, тербеліс, яғни шайқалу байқалады, бұл өте қауіпті, өйткені дөңгелектің қиғаштауы кезінде доңғалақтың өз осінен шығып кету қаупі бар;

Шиналардың біркелкі емес тозуы. Бұл процес дөңгелектерді теңестіру бұзылған кезде пайда болады. Аталған фактор аспаның басқа мәселелерін де айқындауы мүмкін, бірақ ол пайда болған кезде тексеруді шарлы тіректерден бастаған жөн;

Тежеу кезінде көліктің бір жаққа қарай тартуы. Жоғарыда айтылғандай, жағдай аспаның әртүрлі мәселелерін көрсетуі мүмкін;

Сықырлау (шиқыл). Дөңгелек бұрылған кезде пайда болуы мүмкін.

Бір қызығы, қыста шарлы тіректің шуы – бұл майдың әлі қызып үлгермегендігінен туындайтын құбылыс. Егер, біршама уақыттан кейін шу тоқтамаса, ақаулықтың бар екенін көрсетеді [1].

Сонымен қатар, шарлы тіректің негізгі бөлшегі ретінде тірек құрамын арнайы Epsilon 1 рентгенофлуоресцентті анализаторында зерттеу жүргізілді. Шарлы тіректің суреті мен талдау нәтижесі, анықтамасы төменде көрсетілген.



2-сурет. Шарлы тіректің қиылған бейнесі



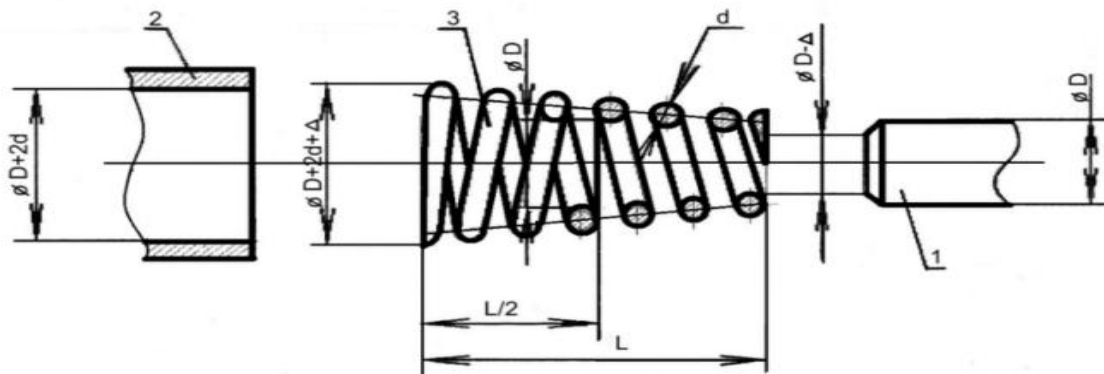
1-диаграмма. Шарлы тіректің талдау нәтижесі

1-кесте. Шарлы тіректің талдау нәтижесіне анықтама

№	Элемент	Концентрация	Түсіндірме
1	Al (Алюминий)	0.350	Құрамында аз мөлшерде алюминий бар
2	Si (Кремний)	0.299	Болат құрамында кремний бар
3	P (Фосфор)	0.124	Көп емес, бірақ болат сапасына әсер етуі мүмкін
4	S (Күкірт)	0.007	Өте аз, бұл жақсы (күкірт морттық тудырады)
5	Cl (Хлор)	0.044	Бөгде элемент, коррозияға әсер етуі мүмкін
6	Ca (Кальций)	0.075	Металл тазарту процесінен қалуы мүмкін
7	Cr (Хром)	1.091	Болатты тоттан қорғауға әсер етеді
8	Mn (Марганец)	0.617	Болаттың беріктігін арттырады
9	Fe (Темір)	96.638	Негізгі элемент
10	Ni (Никель)	0.012	Аз мөлшерде, беріктікке үлес қосады
11	Cu (Мыс)	0.028	Коррозияға қарсы әсер береді
12	As (Мышьяк)	0.002	Қолайсыз қоспа, өте аз
13	Sr(Стронций)	0.000	Жоқ немесе іздік мөлшерде
14	Mo (Молибден)	0.190	Қатты, берік болат үшін маңызды
15	Sn (Қалайы)	0.011	Өте аз
16	Eu (Еуропий)	0.470	Ерекше элемент, әдетте болатта кездеспейді — мүмкін қателік немесе арнайы легірлеу
17	Yb (Иттербий)	0.030	Өте сирек элемент, арнайы легірлеу белгісі
18	Re (Рений)	0.002	Жоғары температураға төзімділікке әсер етеді
19	Os (Осмий)	0.001	Өте сирек элемент, іздік мөлшерде

Әдіснама

Жоғарыда айтылған ақауларды ескере отырып, біз 3 суретте көрсетілген айналмалы қозғалыс жасайтын инновациялық жөндеу жинағын ұсынамыз. Мұндағы: 1 – білік, 2 – сыртқы сақина және 3 – екі бөлшек арасына бұрандалы серіппе түрінде орналастырылған спиральді төсем-серіппе. Спиральды төсем жылжымалы, конустық. Конустың бұрышы 10-тан 50-қа дейін, ал, серіппелі сымның диаметрі d біліктің диаметрі мен $D + 2d$ төсемінің саңылауының диаметрі арасындағы алшақтықтың жартысына тең. Сонымен қатар, тұрақты «храповик эффектісін» қамтамасыз ету үшін серіппенің екі ұшы да керілген, ал спираль-серіппенің ішкі және сыртқы беттері де керілу арқылы орнатылады [2, 3, 4].



3-сурет. Инновациялық жөндеу жинағы

Пайдалану сипаттамаларын жақсарту үшін серпімді аралық элемент ретінде бұрандалы цилиндрлік серіппе түріндегі жылжымалы төсемді мойынтірекке енгізу ұсынылады, бұл қысу күшін R_k арқылы реттеу арқылы жүзеге асырылады. Сонымен қатар, жұмыс беттеріндегі тотығу процестерін шектеу және микропластикалық деформацияны болдырмау үшін арнайы тығыздағыштар жасалады.

Режимді тұрақтандыру және тозудың біркелкілігін қамтамасыз ету үшін серіппелі төсем (вкладыш) біліктің немесе сыртқы сақинаның кері-айналмалы қозғалысы кезінде бұралу кезінде ішкі немесе сыртқы беттерде тежелу пайда болады. Бұл серіппелі төсемнің «храповик эффектісін» арқасында бұралу бағытына байланысты тек бір бағытта мәжбүрлі бұрылуына әкеледі. Сонымен қатар, жұмыс беттеріндегі жанасу сызығы үнемі өзгеріп отырады, бұл беттердің тозуын азайтады.

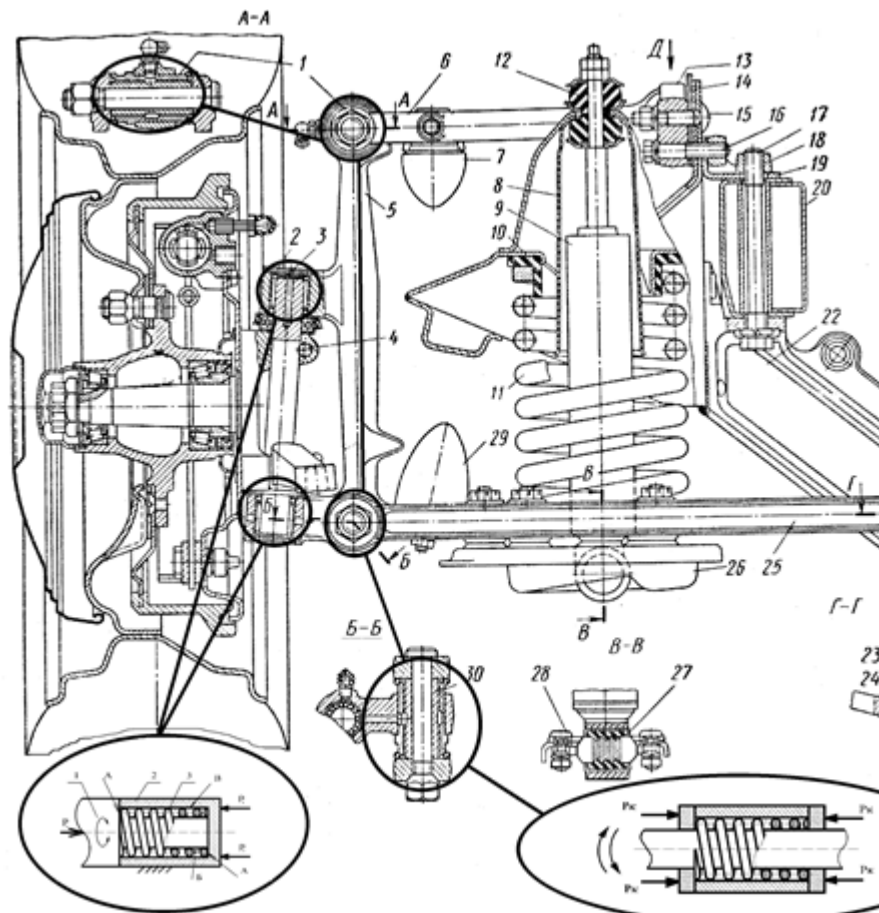
Тығыздағышты реттеу үшін, мысалы, жөндеу кезінде тозуды қалпына келтіру үшін, тірек шайбаларының бірі мен серіппелі төсемнің екі ұшы арасындағы қажеттілікке байланысты реттеу шайбалары орнатылуы мүмкін.

Біздің айналмалы қозғалыс мойынтірегімізде спиральды серіппе болып табылады. Оның көлденең қимасы дөңгелек, шаршы, тікбұрышты немесе басқа да пішінде болуы мүмкін. Мысалы, параллель кесілген сегменттері бар шеңбер де қолданылуы мүмкін. Бұл әртүрлі пішіндер мойынтіректің жүктеме көтеру қабілетін және үйкеліс коэффициентін өзгерту үшін қажет.

Максималды жүктеме сыйымдылығы шаршы немесе тікбұрышты қимасы бар серіппелі лайнермен қамтамасыз етілсе, ал дөңгелек қимасы бар лайнер минималды үйкеліс коэффициентін көрсетеді. Сондай-ақ, серіппелі лайнер жандарынан (шетінен)

қысылған кезде сыртқы және ішкі диаметрлерін біршама өзгертетінін ескеру қажет. Сондықтан екеуі де ұлғаяды, бұл жұмыс жанасу (үйкелу) беттерінің өзгеруіне әкеледі.

Вкладышты қысу оның жұмыс беттері тозған кезде мойынтіректі реттеу үшін ұсынылады. Бұл шара мойынтіректің жұмыс беттерінің дұрыс отыруын қамтамасыз етуге бағытталған.

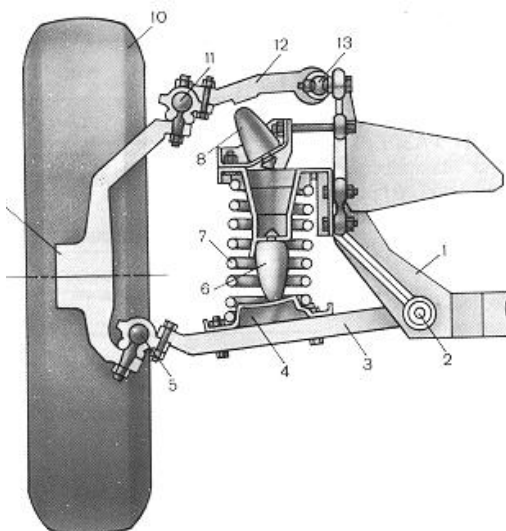


4-сурет. ВАЗ автокөлігінің қолданыстағы топсалы түйіндерді жаңа конструкциялармен ауыстыру мүмкіндіктері

Жаңа дизайндағы мойынтіректерді қолдану мысалдары автомобиль агрегаттарының кейбір түйіндерінде төменде келтірілген. Көптеген ВАЗ модельдерінің алдыңғы аспалары екі телескопиялық амортизатормен және көлденең орнатылған стабилизатормен жабдықталған, типі – тұтқалы. Бұл жүйе ажыратылатын, көлденең орнатылған және тәуелсіз түйін болып табылады. Автокөлікті басқаруды жеңілдету үшін бұрау шкворнясы резеңке сақиналармен қорғалған, кірден қорғаушы екі мойынтірекпен және осьтік күшті арнайы тығыздағышпен жабылған шарикті мойынтіректермен қабылданады. Рульдік жұдырықша мен тіреуіш арасындағы осьтік саңылау реттеу шайбасы арқылы түзетіледі. Шайбаны орнатқаннан кейінгі алшақтық 0,2 мм-ден аспауы тиіс. Шкворень штифт арқылы рульдік жұдырықшаға бекітіледі, бұл бекіту шквореньнің жоғарғы жағындағы жартылай шеңберлі лыска арқылы жүзеге асырылады. Автокөлікті пайдалану кезінде тербелмелі режимде жұмыс істейтін шкворень бір жағынан тозады, бұл қалыптан тыс ойын мен

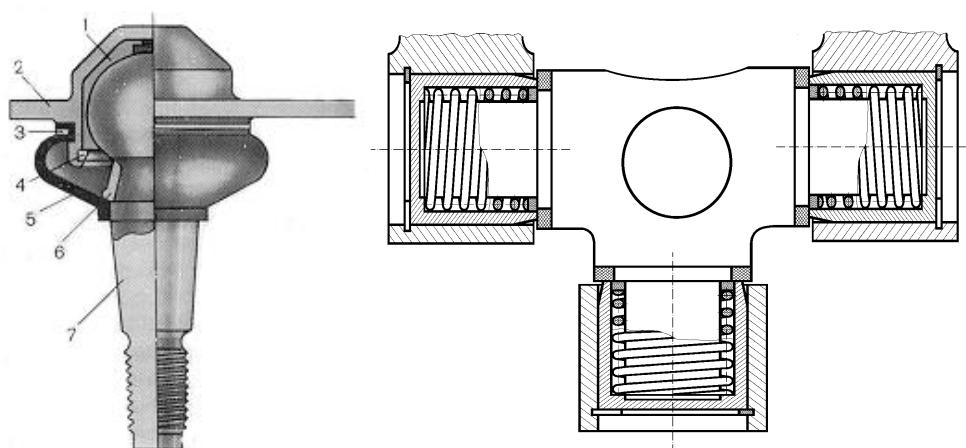
басқарудағы тұрақсыздыққа әкеледі. Нұсқаулыққа сәйкес, ойынды 90°C-қа бұру арқылы жоюға болады және сол арқылы бұрын жұмыс істемеген беттерді жүктеуге мүмкіндік береді. Ол үшін шквореньде екінші жартылай шеңбер бар. Бұл шаралар шкворень мен аспаның жалпы ресурсын ұзартады, бірақ мойынтіректің негізгі кемшілігін толығымен жоя алмайды.

Шкворень мойынтіректерінен басқа, топсалы мойынтіректерді резеңке металл втулкалардың немесе ВАЗ автомобильдерінің алдыңғы екі рычагты аспаларындағы сайлентблоктардың орнына да қолдануға болады. 5 және 6 суреттерде аталған бөлшек пен өзге де түйіндесетін тораптардың пайдаланылуы мүмкін ауқымы көрсетілген.



5-сурет. ВАЗ автокөлігінің алдыңғы екі тұтқалы аспасы

1 – көлденең жолақ (поперечина); 2 – рычагтың төменгі осі; 3 – төменгі рычаг; 4 – серіппенің төменгі тірек чашкасы; 5 – төменгі шарлы тірек; 6 – қысу буфері; 7 – цилиндр тәрізді серіппе; 8 – қайтармалы буфер; 9 – айналмалы жұдырықша; 10 – доңғалақ; 11 – жоғарғы шарлы тірек; 12 – жоғарғы рычаг; 13 – рычагтың жоғарғы осі



6-сурет. Шарлы тірек (а) және оның серіппелі вкладышты пайдалана отырып жаңғырту әдісі (б). 1 – пластикалық төсем; 2 – тіректің корпусы; 3 – серіппелі сақина; 4 – құлыптау сақинасы; 5 – резеңке тозаңқап; 6 – кеңейту втулкасы; 7 – тіректің саусағы

Қорытынды

Инновациялық жөндеу жинағының келесідей артықшылықтары бар:

- шар тірегінің беріктігі оның конструкциясында және жаңа принциптер мен эффектілерді жасау технологиясын қолдану арқылы артады;
- пайдаланудағы сенімділік пен қауіпсіздік артады, өйткені сақиналы саңылаумен қоршалған серіппелі вкладыш сынған жағдайда жұмыс режимі өзгереді, бірақ шарлы тірек жұмысын жалғастыра береді;
- серіппелі вкладышты мәжбүрлеп айналдыру арқылы тозудың біркелкілігі артады.
- «май айдау резбасы» әсеріне байланысты майдың таралуы жақсарады.
- саңылауды жою және серпінді кернеуді енгізу арқылы қосылыстың икемділігі артады.
- жасалуы жеңіл, құрастыру және ауыстыру оңай.

Жалпы алғанда, біз айналмалы режимде жұмыс істейтін сериялық үйкеліс бөлшектерін осы принципке алмастырамыз.

Авторлардың қосқан үлесі.

Кушалиев Д.К.: - Жұмыстың тұжырымдамасы мен құрылымын әзірлеуге, сондай-ақ теориялық деректерді жинауға және талдауға елеулі үлес.

Қалшора Е.Т.: - Эксперименттік деректерді талдауға және түсіндіруге, сондай-ақ зерттеу әдістемесін әзірлеуге елеулі үлес. Мақаланың мазмұнын сыни талдау, оның ішінде негізгі идеяларды толықтыру және нақтылау.

Тойлыбаев А.Е.- Қорытындылар мен қорытындыларды тұжырымдауды қоса алғанда, жариялау үшін мақаланың түпкілікті нұсқасын бекіту.

Әдебиеттер тізімі

1. Кушалиев Д.К. Теоретическое обоснование применения конического пружинного вкладыша взамен цилиндрического для подшипника возвратно-вращательного движения в сайлентблоках амортизаторов / Д.К. Кушалиев Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. № 1 (73). С. 231-235.
2. Подшипник скольжения для возвратно-вращательного движения: пат. 2499920 Рос. Федерация: МПК F16C 17/00, 33/26 / А.Н. Виноградов, В.Г. Куранов, В.В. Куранов, Д.К. Кушалиев, Е.Д. Линьков.; СГТУ имени Гагарина Ю.А. 2012128063; заявл. 03.07.2012; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.
3. Патент № 201300682. Подшипник скольжения для возвратно-вращательного движения Виноградов А.Н., Куранов В.Г., Куранов В.В., Кушалиев Д.К., Линьков Е.Д – 2014 г.
4. Подшипники качения: справочное пособие. под ред. Н.А. Спицина и А.И. Спришевского. - М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 2017. - 828 с.
5. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. Киев: Техніка, 1970. - 296 с.
6. Костецкий Б.И. Износостойкость деталей машин / Б.И. Костецкий. - Киев- Москва: Машгиз, 2014. - 168 с.
7. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий. - Киев: Техника, 2005. - 326 с.

8. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий. - Киев: Техника, 2005. - 326 с.
9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / под ред. В.Е. Гмурман. - Изд. 7-е, стер. - М.: Высш. шк. 2000. - 479 с.
10. Износ и безызносность: монография / под ред. Куранов В.Г., Виноградов А.Н., Денисов А.С. Саратов. гос. техн. ун-т, - Саратов, СГТУ, 2000. -136 с.
11. Движение без трения и износа: учеб. пособие. / под ред. В.Г. Куранов, А.Н. Виноградов. Саратов. гос. техн. ун-т,- Саратов: СГТУ, 2007. – 52 с.
12. Пат. 2162556 Российская Федерация, МПК⁷ F 16 C 17/00, 33/26. Подшипник скольжения для возвратно-вращательного движения / Куранов В.Г., Виноградов А.Н., Бузов А.В., Петров Ю.А., Каракозова В.А.; заявитель и патентообладатель СГТУ им. Гагарина Ю.А. № 99107058/28; Заявл. 31.03.99; опубл. 27.01.01. - №3. - С. 147.
13. Виноградов А.Н., Куранов В.Г. Подшипники скольжения для возвратно-вращательного движения на основе новых трибологических принципов и эффектов // Восстановление и упрочнение деталей машин: Межвуз. науч. сборник. Саратов. гос. техн. ун-т, - Саратов: СГТУ, 2003.- С.175-182.
14. Кушалиев Д.К. Теоретическое обоснование применения конического пружинного вкладыша взамен цилиндрического для подшипника возвратно-вращательного движения в сайлентблоках амортизаторов // Вестник СГТУ им. Гагарина Ю.А. - Саратов, 2013. - № 1 (73). С. 231-235.
15. Пат. 201300682 Российская Федерация, МПК⁷ Подшипник скольжения для возвратно-вращательного движения Виноградов А.Н., Куранов В.Г., Куранов В.В., Кушалиев Д.К., Линьков Е.Д.; заявитель и патентообладатель СГТУ им. Гагарина Ю.А. 2012128063; заявл. 03.07.2012; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.
16. Подшипники качения: справочное пособие / под ред. Н.А. Спицина и А.И. Спришевского. - М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. - 828 с.

Д. К.Кушалиев*¹, Е.Т. Қалшора¹, А.Е.Тойлыбаев²

¹ *НАО Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва, Астана, Казахстан*

² *ALT University, Алматы, Казахстан*

Проблемы и решения работы шаровой опоры автомобиля

Аннотация. В статье приведены признаки неисправности шаровой опоры. При движении автомобиля этот элемент воспринимает любое воздействие дорожного покрытия, то есть в условиях эксплуатации он подвергается большим нагрузкам. Авторы предлагают увеличить срок службы шаровой опоры с помощью инновационного ремонтного комплекта для возвратно-вращательного движения. В работе показаны результаты стабилизации, режима и равномерности износа. При возвратно-вращательном движении вала или наружного кольца это достигается за счёт скручивания пружинной вкладыша, соответственно на внутренней или внешней поверхности пружинной вкладыша возникает торможение (эффект Храповика), и она принудительно поворачивается только в одном направлении в зависимости от направления навивки пружины. В процессе работы контактные поверхности трения изменяются, что способствует снижению их износа. Для

соблюдения этих условий предложена конструкция подшипников скольжения для вращательного движения, при которой данные условия могут быть реализованы. С этой целью подшипник оснащён подвижным пружинным вкладышем в виде винтовой цилиндрической пружины (промежуточного элемента), которая в колебательном режиме принудительно вращается только в одном направлении и тем самым обеспечивает равномерность износа.

Ключевые слова: Автомобильная подвеска, шаровая опора, трение, пружинный вкладыш, композитные материалы

D.K.Kushaliyev^{*1}, Y.T.Kalshora¹, A.E.Toilibayev²

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

²*ALT University, Almaty, Kazakhstan*

Problems and Solutions in the Operation of a Car Ball Joint

Abstract. The article presents the signs of ball joint malfunction. During vehicle operation, this component absorbs any impact from the road surface, meaning that under operating conditions it is subjected to heavy loads. The authors propose extending the service life of the ball joint by using an innovative repair kit designed for reciprocating rotational motion. The study shows the results of stabilization, wear mode, and wear uniformity. In reciprocating rotational motion of the shaft or outer ring, this is achieved by twisting the spring insert. Accordingly, braking occurs on the inner or outer surface of the spring insert (ratchet effect), and it is forced to rotate only in one direction depending on the winding direction of the spring. During operation, the frictional contact surfaces change, which helps reduce their wear. To meet these conditions, a design of sliding bearings for rotational motion has been proposed, in which these requirements can be implemented. For this purpose, the bearing is equipped with a movable spring insert in the form of a helical cylindrical spring (an intermediate element), which in oscillatory mode is forced to rotate only in one direction, thereby ensuring uniform wear.

Keywords: Automobile suspension, ball joint, friction, spring insert, composite materials

References

1. Avtonov.com. (2025). Retrieved December, from <https://www.avtonov.com> интернет ресурсы [in Russian]
2. Kushaliev D.K. Theoretical justification for the use of a conical spring liner instead of a cylindrical one for a reciprocating bearing in shock absorber silent blocks / D.K. Kushaliev Bulletin of the Saratov State Technical University. - 2013. No. 1 (73). P. 231-235. [in Russian]
3. Plain bearing for reciprocating rotary motion: patent 2499920 Russian Federation: IPC F16C 17/00, 33/26 / A.N. Vinogradov, V.G. Kuranov, V.V. Kuranov, D.K. Gagarin SSTU 2012128063; declared 03.07.2012; published 27.11.2013, Bulletin No. 33. [in Russian]
4. Patent No. 201300682. Plain bearing for reciprocating motion Vinogradov A.N., Kuranov V.G., Kuranov V.V., Kushaliev D.K., Linkov E.D. – 2014. [in Russian].
5. Rolling bearings: a reference manual. Edited by N.A. Spitsyn and A.I. Sprishevsky. – Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Mechanical Engineering Literature, 2017. - 828 p. [in Russian].

6. Kostetsky B.I. Friction, lubrication and wear in machines / B.I. Kostetsky. Kyiv: Tekhnika, 1970. - 296 p. [in Russian]
7. Kostetsky B.I. Wear resistance of machine parts / B.I. Kostetsky. - Kiev-Moscow: Mashgiz, 2014. - 168 p. [in Russian]
8. Kostetsky B.I. Surface strength of materials under friction / B.I. Kostetsky. - Kyiv: Tekhnika, 2005. - 326 p. [in Russian]
9. Gmurman V.E. Probability Theory and Mathematical Statistics: A Textbook for Universities / edited by V.E. Gmurman. - 7th ed., reprinted - Moscow: Higher School, 2000. - 479 p. [in Russian]
10. Wear and wearlessness: monograph / ed. Kuranov V.G., Vinogradov A.N., Denisov A.S. Sarat. state tech. University, - Saratov, SSTU, 2000. -136 p. [in Russian]
11. Motion without friction and wear: textbook. / edited by V.G. Kuranov, A.N. Vinogradov. Saratov State Technical University, - Saratov: SSTU, 2007. - 52 p. [in Russian]
12. Patent 2162556 Russian Federation, IPC 7 F 16 C 17/00, 33/26. Plain bearing for reciprocating rotary motion / Kuranov V.G., Vinogradov A.N., Buzov A.V., Petrov Yu.A., Karakozova V.A.; SSTU named after Yu.A. Gagarin. No. 99107058/28; Cl. 31.03.99; Published 27.01.01. - No. 3. - P. 147. [in Russian]
13. Vinogradov A.N., Kuranov V.G. Plain bearings for reciprocating motion based on new tribological principles and effects // Restoration and strengthening of machine parts: Interuniversity scientific collection. Saratov State Technical University, - Saratov: SSTU, 2003.- P.175-182. [in Russian]
14. Kushaliev D.K. Theoretical justification for the use of a conical spring liner instead of a cylindrical one for a reciprocating bearing in shock absorber silent blocks // Bulletin of SSTU named after Yu.A. Gagarin. - Saratov, 2013. - No. 1 (73). P. 231-235. [in Russian]
15. Patent. 201300682 Russian Federation, IPC 7 Plain bearing for reciprocating rotary motion Vinogradov A.N., Kuranov V.G., Kuranov V.V., Kushaliev D.K., Linkov E.D.; SSTU named after Yu.A. Gagarin. 2012128063; declared 03.07.2012; published 27.11.2013, Bulletin No. 33. [in Russian]
16. Rolling bearings: a reference manual / edited by N.A. Spitsyn and A.I. Sprishevsky. - Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Mechanical Engineering Literature, 1961. - 828 p. [in Russian]

Авторлар туралы мәлімет:

Д.К. Кушалиев – техника ғылымдарының кандидаты, PhD докторы, «көлік инженерия» кафедрасының доцент міндетін атқарушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан.

Е.Т. Қалшора – докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан.

А.Е.Тойлыбаев -техника ғылымдарының кандидаты, “Автокөлік құралдары және өмір-тіршілік қауіпсіздігі” кафедрасы меңгерушісі ALT University, Алматы, Қазақстан

Д.К. Кушалиев – к.т.н., Ph.D., и.о. доцента кафедры «Транспортная инженерия», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Е.Т. Қалшора – докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

А.Е.Тойлыбаев- Заведующий кафедрой "Автотранспортные средства и безопасность жизнедеятельности" ALT University, Алматы, Қазақстан

D.K. Kushaliyev - Candidate of Technical Sciences, PhD, Acting Associate Professor of the Department of «Transportation engineering», L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan.

Y.T. Kalshora - PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan

Toilibaev A.E- Head of department "Motor vehicles and life safety" ALT University, 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/>).



IRSTI 67.09.33

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-35-52>

Study of the structure of hydration products of cement stone with hyperplasticizer and silica microfillers

I. Abdraimov¹ , K. Musa¹ , Yu. Pukharenko² ,
M. Sailygarayeva^{3*} 

¹ Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan,

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation,

³ Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan,

E mail: abdraimov_ilyas@mail.ru, tmm@spbgasu.ru, mariya_23365@mail.ru

Abstract. In this paper, the combined effect of active silica fillers of technogenic and natural origin and polycarboxylate superplasticizer on the structure of the cement matrix was investigated in order to increase its microporosity. It was found that the dispersion of filler particles, the amorphization of the structure and components, are due to the effect of chemical energy on the molecular and surface crystallization structure of binder particles. Studies on the combined introduction of silica and plasticizer in the composition of mortar mixtures make it possible to increase the content of the pozzolanic additive to 15% of the binder weight, which helps to reduce cement consumption, while simultaneously optimizing the microstructure of the cement stone and further obtaining concrete with high construction and technical characteristics. As part of the study, a detailed microstructural study of the cement stone was carried out to analyze the hydration products in the presence of polycarboxylate plasticizers and active silica fillers. The obtained results show that the introduction of 10-15% of plasticizer and silica filler into the mortar mixture leads to a decrease in the content of portlandite in the cement system, a decrease in the size of its crystals, filling of the intergranular space, as well as compaction and strengthening of the structure of the cement stone. Thus, the proposed approach ensures the effective use of pozzolanic additives, increasing the operational properties of concrete and reducing the consumption of expensive cement.

Keywords: hyperplasticizer, silica microfillers, hydration products, cement stone, cement structure.

Introduction

Increasing the durability and improving the operational reliability of cement stone are among the priority areas of modern research in the field of materials science. These goals can be achieved by reducing the microporosity of the structure to minimize water filtration through cavitation channels. In this regard, an active search for effective materials continues, including polymer compositions with high resistance to aggressive environmental influences. However, the use of the proposed polymer compositions is often associated with the use of expensive chemical components, which limits their widespread implementation in the construction industry [1]. One of the most accessible and promising areas for regulating the construction and technical properties of concrete, as well as reducing material and energy costs, is the introduction of various additives into their composition, which are often considered in the scientific literature as modifiers of the structure and properties of cement systems. The optimal dosage of such additives is determined by their minimum amount, ensuring the achievement of the required regulatory indicators [2] and technological or technical efficiency without deterioration or with an acceptable decrease in other quality characteristics of concrete or mortars. Depending on their origin and functional purpose, additives are divided into chemical and mineral.

Chemical additives, including organic and inorganic compounds, are introduced into cement systems (concretes and mortars) in relatively small quantities (usually within 0.02–2% of the cement mass). However, despite the low concentration, they have a significant effect on the hydration processes of clinker minerals and the structure formation of cement stone. The use of such additives allows for targeted modification of the properties of hardened mortars and concretes, ensuring their compliance with specified operational requirements [3].

Mineral additives are dispersed inorganic materials of natural, technogenic, or artificial origin, which are introduced into concrete and mortar mixtures in quantities from 5 to 20% or more. Using them allows cement consumption and aggregate consumption to be reduced, and the production of high-density concrete to be produced with minimal binder consumption. In addition, mineral additives increase the resistance of concrete to external influences and serve as an effective means of recycling industrial waste, such as ash and slag from thermal power plants, ash and slag from the combustion of solid municipal waste, blast furnace granulated slag and other industrial by-products [4].

It should be noted that complex modifying additives containing various organic and mineral components not only provide wide controllability of the rheological and technological properties of mortar and concrete mixtures, but also help to optimize the microstructure of cement stone. This, in turn, makes it possible to obtain concrete with improved construction and technical characteristics, including strength, durability and resistance to external influences. [5].

Studies devoted to the combined effect of amorphous silica and superplasticizer in the composition of powder concrete [6] are of particular interest. These concretes are characterized by high compressive strength (up to 150 MPa), as well as increased crack resistance and water resistance. According to P.A. Rebinder, the presence of surface-active substances (SAS) contributes to an increase in the filler activity. The dispersion of its particles, amorphization of the structure and components are due to the influence of chemical energy on the molecular and surface crystallization structure of the binder particles. The introduction of SAS into the system prevents the aggregation of highly dispersed microfiller particles, protecting the structure from the aggressive effects of the external environment and helping to maintain the activity of the material during storage. [7].

The purpose of this study was to investigate the microporous structure in the cement-filler system and the effect of active silica fillers of technogenic and natural origin on the structure of the cement matrix. As part of the work, an analysis of the influence and mutual action of a complex modifier in various percentage ratios in filled cement systems was carried out. The calculated content of the mineral component of the solution mixture was determined with the identification of factors contributing to the formation of a densely packed structure of the material and, accordingly, an increase in its performance characteristics. It has been established that the increase in the density of cement composites at the optimal level of filling with mineral components is due to a number of factors. These include the orienting effect of filler particles on cement hydration products in the presence of polycarboxylate chains and the formation of cluster structures, the use of materials with a similar crystal-chemical structure, the formation of additional chemical bonds when introducing pozzolanic additives, and a reduction in the porosity of the material [8].

Table 1. Chemical composition of portland cement (according to LLP Shymkentcement [9])

Cement brand	Manufacturer	Chemical composition, wt.%						
		Na ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
CEM I 42.5N	Shymkentcement LLP	0.57	0.65	0.92	4.05	64.79	5.11	23.91

Portland cement grade CEM I 42.5N, which meets the established requirements [9], was used as a hydraulic binder. Cement was produced by Shymkentcement LLP, located at the following address: Shymkent, St. Koikeldi Batyr St., 22. The characteristics of the cement used and the results of experimental tests of its properties are shown in Tables 1–2.

Table 2. Mineral composition of Portland cement clinker (according to LLP Shymkentcement [10])

Cement brand	Mineral content in clinker, %			
	C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S
CEM I 42.5N	10.56	6.86	11.69	60.99

Analysis of the obtained test results showed that the studied cement complies with the requirements of [10]. Natural sand mined in the Akdala quarry, located at the following address: Asar-2 microdistrict, Syrym Batyr Street, 175/2, was used as fine aggregate for the mortar part. The properties of the sand were tested using the methods described in [11]. The results of the fine aggregate tests are presented in Table 3, and the chemical composition is presented in Table 4. Interms of clay and dust impurity content, granulometric composition and radiation-hygienic assessment, this sand meets the established requirements [11]. Mixing water meets the requirements of [12]. The water does not contain sulfates over 2700 mg/l (in terms of SO₄), all salts over 5000 mg/l, oil sludge and scale, organic matter content less than 12 mg/l, pH 7.7 and no

color

Table 3. Sand test results (according to Akdala quarry [11])

Manufacturer	Sand characteristics				
	True density, kg/m ³	Fineness modulus	Bulk density, kg/m ³	Specific effective activity of natural radionuclides, Bq/kg	Content of clay and dust particles, %
Quarry "Akdala"	2610	2.45	1470	71.3	1.7

The products of NEOCHIM LLP, located at the address: Shymkent, Enbekshinsky district, block 264, building, were used as a superplasticizer. In terms of its consumer properties, the additive "NEOCHIM" meets the requirements [13].

Table 4. Chemical composition of sand (according to LLP Joint Venture "Southern Mining and Chemical Company" [11])

Manufacturer	Main oxides, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	p.p.p.
Limited Liability Partnership "Joint Venture "Southern Mining and Chemical Company"	70.9	16.37	2.68	2.49	0.69	0.01	3.29	2.77	1.09

The additive "NEOCHIM" is a plasticizing and water-reducing additive based on a mixture of polyoxylene derivatives of polycarboxylic acids, surfactants. The standardized physical and chemical indicators are presented in Table 5.

Table 5. Physicochemical properties of the additive (according to NEOCHIM LLP [13])

Name of the indicators	Hyperplasticizer "NEOCHIM"
Appearance	homogeneous aqueous solution of light brown color
Density at 20°C, g/cm ³ , not less than 1.05	1.05
Hydrogen ion activity index (pH), not less than 4.2	4.2
Mass fraction of chlorine ions, %, not more than 0.1	0.1

It is used for the production of self-compacting commercial concretes that harden under normal conditions or with the use of electric heating. Dust waste (MKU-95) produced by LLP "Tau Ken Temir", registered at the address: Karaganda, Oktyabrsky district, accounting quarter 018, Building 133, was used as a reaction-chemical pozzolanic additive.

This dust from electrostatic precipitators of ferrosilicon production has particle sizes of 5-50 microns. Under the influence of high temperature, silica microparticles are transformed into glassy amorphous dust. The qualitative characteristics of microsilica MKU-95 are presented in Table 6.

Table 6. Qualitative characteristics of microsilica grade MKU-95 (according to LLP "Tau Ken Temir"[14])

Name of indicators	Qualitative characteristics
Mass fraction of silicon dioxide, %, not less than (SiO_2)	95.06
Mass fraction of phosphorus oxide (P_2O_5), %, not more than, %	0.12
Mass fraction of magnesium oxide (MgO), %, not more than	0.6
Mass fraction of aluminum oxide (Al_2O_3), %, not more than	0.17
Mass fraction of iron oxide (Fe_2O_3), %, not more than	0.19
Mass fraction of sulfuric anhydride (SO_3), %, not more than	0.41
Mass fraction of calcium oxide (CaO), %, not more than	0.41
Mass fraction of free alkalis (Na_2O , K_2O), %, not more than	1.71
Mass fraction of water, %, not more than	0.29

In terms of its properties, microsilica "MKU-95" meets the requirements of [14].

Opoka containing silica particles from the Taskalinskoye deposit was studied as the second active filler. The opoka from this deposit has the following chemical composition (Table 7).

Table 7. Chemical composition of opoka from the Taskalinskoye deposit (according to Taskalinskoye deposit [15])

Components	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
Opoka	87.02	10.58	3.84	4.73	2.45	1.90

Amorphous-siliceous opoka is composed in the overwhelming majority of amorphous silica, provided in the form of globules and spicules of sea sponges, radiolarians, shells, etc. The characteristics of opoka, which opoka must meet as an additive-filler, are indicated in Table 8.

Table 8. Characteristics of the flask (according to the Taskalinskoye deposit [15])

Indicator	Indicator Value		
	Minimum	Maximum	Average
Specific weight, N/m^3	$22.27 \cdot 10^3$	$24.13 \cdot 10^3$	$23.15 \cdot 10^3$
Density (in a piece), kg/m^3	1050	1665	1240
Water absorption, %	15.34	41.00	25.00
Compressive strength, MPa, in the state:			
Dry	6.239	14.09	9.49
Water-saturated	44.9	11.47	6.61
Frost resistance	25	37	31

In terms of its properties, the Opoka of the "Tascalinskoye deposit" meets the requirements of [15]. The Opoka selected for testing was subjected to preliminary grinding until a specific surface of 1700-1850 cm²/g was achieved in a laboratory ball mill BS-BALLMILL-I with a rotation range of up to 200 rpm.

The methodology

A series of tests were conducted using Professor Okamura's method to determine the cone spread with an initial water to binder ratio of 0.4 and 1% superplasticizer from the amount of binder with different dosages of mineral additives. The ratio was obtained experimentally by determining the cone spread of cement paste with different Water/MDS ratios. The dependence of the cone spread and the Water/MDS ratio is expressed through the ratio of the "final" spread area to the "initial" area, called the "relative" spread area. (Figure 1).

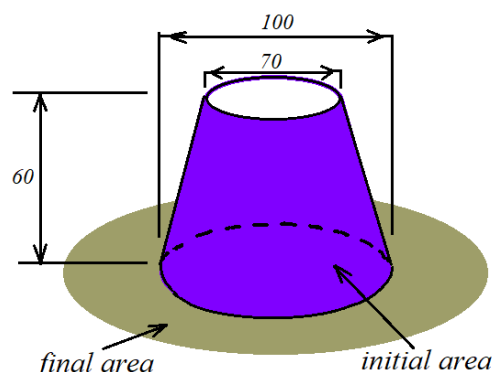


Figure 1. Truncated cone for determining the spread of cement paste (Okamura H., Ozava K. Mix design for self-compacting concrete // Concrete Library of the JSCE. 1995. № 2. P. 107-120)

The task was to obtain a mixture of water, binder, and superplasticizer, which during testing would show a flow cone of 244-246 mm, the flow time through the funnel of 9-11 seconds [16].

Table 9. Effect of the amount of microsilica additive MKU on the rheology of cement-sand mixture

Main composition *	Cement, kg	Quantity of microsilica from cement mass, %	Quantity of microsilica from cement mass, kg	Quantity of superplasticizer, kg	Flow (mm)	Flow time, sec
Sand-900 kg, Water-0.4 from cement	600	0	0	6	265	7
	570	5	30	6	261	8
	540	10	60	6	253	9
	510	15	90	6	245	10
	480	20	120	6	237	12
	420	30	180	6	231	14

*All data are given based on the number of components per 1 m³ of concrete or mortar mixture

Microstructure study:

To analyze the microstructure of the material, studies were carried out on grinding samples aged for 28 days. The study was carried out using a ZEISS Axio Vert.A1 microscope (Germany) using the reflectivity microphotography method at a magnification of $\times 500$. In addition, X-ray phase analysis (XRD) was used to study the phase composition of the cement stone hydration products and assess the content of minerals. The analysis was carried out on a D2 PHASER powder X-ray diffractometer from Bruker, made in the USA. The analysis was decoded using DIFFRAC.EVA software, which provides tools for rapid analysis of one-dimensional and two-dimensional diffraction data. It supports all Bruker detectors and X-ray scanning types. EVA functionality covers a wide analytical spectrum from data processing, basic scan evaluation and presentation, detailed peak analysis, phase identification and quantitative analysis to crystallinity and crystallite size determination [17].

Table 10. Effect of the amount of flask additive on the rheology of cement-sand mixture

Main composition*	Cement, kg	Quantity of opoka from cement mass, %	Quantity of opoka from cement mass, kg	Quantity of superplasticizer, kg	Flow (mm)	Flow time, sec
Sand-900 kg, Water-0.4 from cement	600	0	0	6	265	7
	570	5	30	6	246	9
	540	10	60	6	232	12
	510	15	90	6	227	14
	480	20	120	6	213	17
	420	30	180	6	205	20

*All data are given based on the number of components per 1 m^3 of concrete or mortar mixture

Table 11. Compressive strength indices of mortar samples with microsilica MKU and opok O at the ages of 1 day and 28 days

Cement	Quantity of filling, %	Quantity of filling, kg	MKU-1day	MKU-28 days	O-1 day	O-28 days	Without additive-1	Without additive-28
600	0	-	-	-	-	-	11.2	37.7
570	5	30	-	-	11.5	38.1	-	-
540	10	60	-	-	-	-	-	-
510	15	90	12.8	40.7	-	-	-	-

Generalized data on the rheological properties of the solution using different quantities of two silica fillers are given in Tables 9-10.

From the tables reflecting the rheological characteristics of the obtained solutions, it is evident that the best effect is achieved by replacing 15% of the cement with microsilica.

Then, from the mortar mixtures that showed the required values of cone spread and flow through the funnel, samples were formed, which were tested for compressive strength according

to [18] after 1 day and 28 days. The results of the compressive strength tests of mortar samples with microsilica, opokal and metakaolin at the ages of 1 day and 28 days are presented in Table 11.

The strength characteristics of the mortar samples show that the best effect is achieved by replacing part of the cement with 15% microsilica, which is consistent with the studies of Kaprielov S.S. and Sheinfeld A.V., where the recommended consumption of microsilica is 15–20% of the mass of the binder per 1 m³ of concrete [19].

Findings/Discussion

As a result of studying the microstructure of the samples using a ZEISS Axio Vert.A1 electron microscope using the reflection method, the following data were obtained.

Figure 2 shows an image of the fracture microstructure of a control sample made of pure cement.

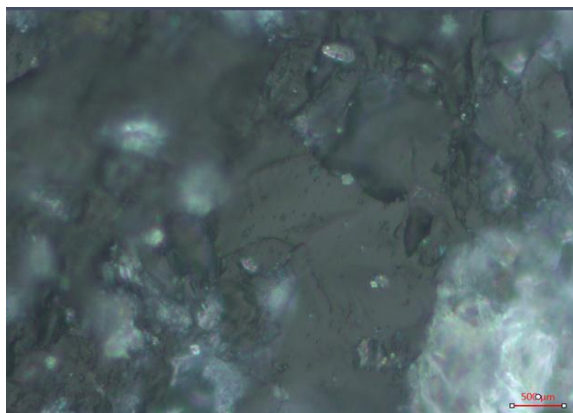


Figure 2. Microstructure of the fracture of a control sample made of pure cement

Figure 2 shows that the structure of cement stone is not monolithic and has a block structure. It is represented by weakly crystallized layers of highly basic metastable hydrosilicate particles ($\text{CaO SiO}_2 \text{H}_2\text{O}$) with molar ratios $\text{CaO/SiO}_2 > 1.5$ (C_2SH_2).

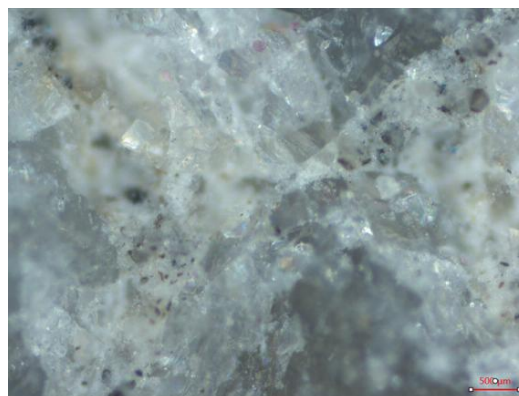


Figure 3. Microstructure of a fracture of a cement stone sample containing Opoku from the “Tascalinskoye deposit.”

These new formations, which have increased basicity, are prone to coagulation; water molecules retained by adsorption processes are located inside their structure. Evaporation of both adsorbed water and water located in the crystal lattice is accompanied by shrinkage of the system,

which corresponds to the data presented in [20]. Figure 3 shows that the hydraulic activity of the opal-chalcedony gaize causes chemical interactions of the amorphous silica included in its composition with the hydroxide components formed during cement hydration as a result of hydrolysis of $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ according to the equation:



Figure 4. Microstructure of a fracture of a cement stone sample containing microsilica MKU-95

As a result, low-basic calcium hydrosilicates of the C-S-H (B) type, hydroaluminates $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and calcium hydroferrites $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ are formed. The new formations have the appearance of thin fibers, plates and petals of irregular shape [21].

Figure 4 shows that cement stone with the addition of microsilica MKU-95 has a pronounced homogeneous structure in comparison with cement stone without additives. The reaction of the hydration products of clinker minerals and active microsilica is a compound of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with active SiO_2 , resulting in the formation of a structure composition with the densest packing of crystals, forming elements of low-basic calcium hydrosilicates of the CSH (B) type, for example $(\text{Ca}_5(\text{OH})_2\text{Si}_6\text{O}_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1.5$), which is confirmed by the theoretical provisions set out in [22].

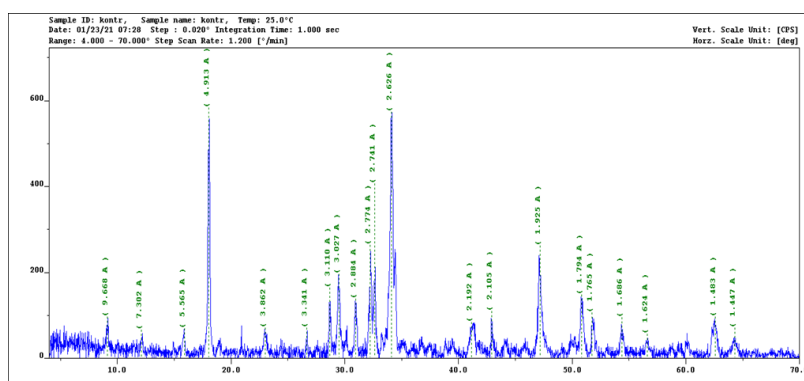


Figure 5. Control sample without mineral additive

Next, to assess the influence of mineral additives on the phase composition of cement stone hydration products, the X-ray phase analysis (XPA) method was used using a D2PHASER powder X-ray diffractometer from Bruker, manufactured in the USA (Fig. 5-7).

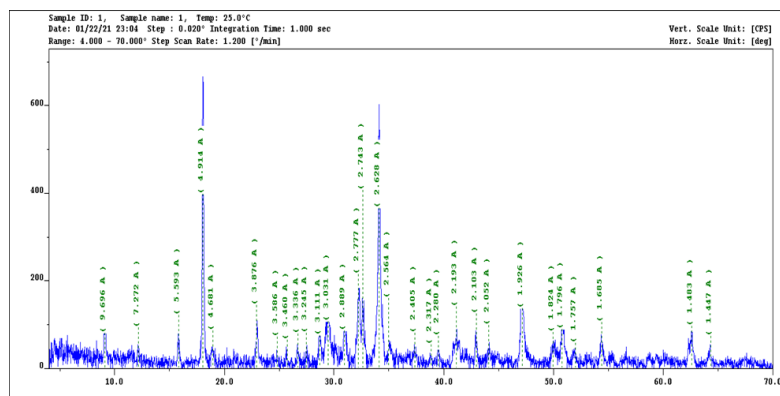


Figure 6. Sample with replacement of part of the cement with microsilica MKU

Using the DIFFRAC.EVA software, an analysis of the obtained diffraction patterns was performed, which confirmed the formation of low-basic hydrosilicates present in the studied samples, as shown in Tables 12-13.

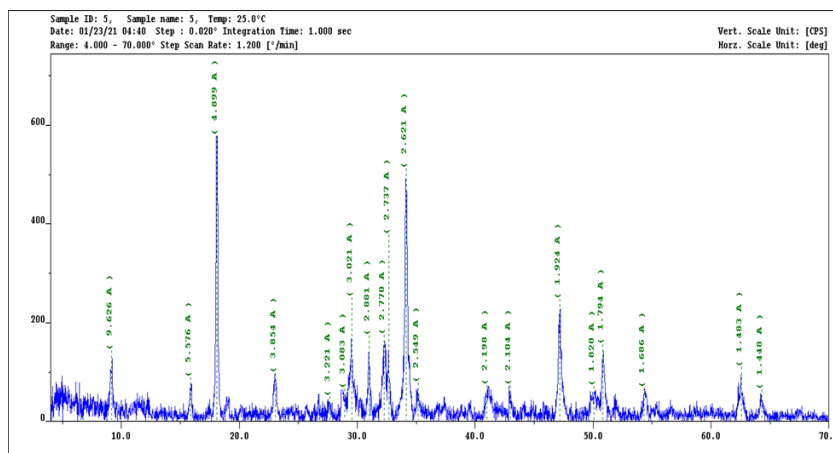


Figure 7. Sample with replacement of part of the cement of the Opoka of the “Tascalinskoye deposit”

Table 12. Phase composition of cement stone at the age of 28 days of normal hardening

Composition No	Cement stone	Phase composition of cement stone, %			
		C ₃ S	C ₂ S	Ca(OH) ₂	Degree of hydration
1	Control	19.6	8.8	21.6	75
2	PC+MKU	14.7	7.4	16.8	82
3	PC+O	14.2	7.2	16.3	78

Analysis of the phase composition showed that partial replacement of cement with microsilica (composition 2) promotes the intensification of hydration processes and the binding of the resulting $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hydroxide with microsilica. As a result, a decrease in the content of minerals C_3S and C_2S is observed compared to composition 1, with this degree of hydration increasing from 70% to 82%. When replacing part of the cement, the flask (composition 3) occupies an intermediate position between the control composition 1 and composition 2 in terms of the degree of hydration and phase composition of new formations. This also indicates a reduced content of minerals C_3S and C_2S , which leads to compaction of the structure of the cement stone and an increase in its strength [23].

Analysis of the diffraction pattern shows the general theory outlined in [24] and [25] that a significant amount of highly stable low-base hydrosilicates and hydroaluminates are formed when using active mineral additives. A special feature is that in the control sample No. 1, containing only cement, the formation of only three low-base hydrosilicates was recorded, whereas in the samples with active mineral additives (No. 2 and 3) their number increased to 5–6 (Table 13).

Table 13. Content of calcium hydrosilicates in the studied samples of modified cement stone at the age of 28 days of normal hardening

Sample	Conventional designation	Calcium hydrosilicates
Control	1	Tobermorite $\text{Ca}_2\text{H}_3\text{O}_{11}\text{Si}_3$ Klinotobermorite $\text{Ca}_5\text{H}_8\text{O}_{21}\text{Si}_6$ Katoite $\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{H}_{12}\text{O}_{12}\text{Si}_3$
PC+MK	2	Gergeyite $\text{Ca}_5\text{H}_2\text{K}_2\text{O}_{25}\text{S}_6$ Katoite $\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{H}_{12}\text{O}_{12}\text{Si}_3$ Tobermorite $\text{Ca}_2\text{H}_3\text{O}_{11}\text{Si}_3$ Klinotobermorite $\text{Ca}_5\text{H}_8\text{O}_{21}\text{Si}_6$ Killalaite $\text{Ca}_2\text{H}_6\text{O}_{11}\text{Si}_3$ Phoshagite $\text{Ca}_4\text{H}_2\text{O}_{11}\text{Si}_3$
PC+O	3	Katoite $\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{H}_{12}\text{O}_{12}\text{Si}_3$ Calcium hydroferrite $4\text{CaOFe}_2\text{O}_3\text{n}+3\text{H}_2\text{O}$ Lumontite $\text{Al}_4\text{Ca}_2\text{H}_{18}\text{O}_{33}\text{Si}_8$ Klinotobermorite $\text{Ca}_5\text{H}_8\text{O}_{21}\text{Si}_6$ Rosenhanite $\text{Ca}_3\text{H}_2\text{O}_{10}\text{Si}_3$

This indicates an intensification of hydration processes in the cement stone, as well as a more active crystallization of the colloidal system in the active components SiO_2 and $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$.

Conclusion

Based on the results of the tests, the following conclusions can be made:

1) The mixture with partial replacement of cement with opal-chalcedony opoka is the least homogeneous structure, which contains both calcium hydrosilicates and hydroaluminates and hydroferrites, which is confirmed by the data of differential thermal analysis (DTA) and microstructural studies. The revealed heterogeneity can negatively affect the operational reliability of concrete and lead to a decrease in its strength characteristics due to the uneven distribution of hydration products and a possible increase in local zones of increased porosity.

2) The mixture with microsilica demonstrated a more homogeneous microstructure, and low-basic hydrosilicates of the CSH(B) type are widely represented here. This effect is due to the complex influence of the microfilling of the system, which leads to optimization of the grain composition and a decrease in the defectiveness of the structure, as well as high pozzolanic activity of microsilica. It binds calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, and increases the degree of hydration of cement minerals, which contributes to the formation of a denser and stronger structure of cement stone. 3) The introduction of active mineral fillers leads to an increase in the number of fine particles in the cement paste, which contributes to the formation of a denser microcapillary structure of cement stone and a significant decrease in the volume of micropores, reducing its permeability. During the hydration process, capillary pores are gradually filled with new formations, which allows for an increase in the volume of gel pores while simultaneously reducing the total pore space and average pore diameter. As a result, the viscosity of the concrete mixture increases, which has a beneficial effect on its workability. In addition, the use of active mineral additives helps to increase the compressive strength of concrete, reduce the number and size of large portlandite crystals at phase boundaries, and moderately reduce the total porosity, which can ultimately improve the performance characteristics of concrete.

The contribution of the authors.

Abdraimov Ilyas – concept, methodology, resources

Musa Kuttybay – data collection, testing

Yuri Pukharenko – modeling, analysis, visualization

Mariya Sailygarayeva – interpretation, drafting, editing

References

1. Gesoglu, M; Güneyisi, E.; Oznur Oz, H.; Taner, Y.; Taha, I. Durability and Shrinkage Characteristics of Self-Compacting Concretes Containing Recycled Coarse and/or Fine Aggregates. August 2015. Advances in Materials Science and Engineering. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/278296> Surname A and Surname B 2009 Journal Name 23 544.
2. Usanova, K.; Barabanshchikov, Y.; Krasova, A.; Akimov, S.; Belyaeva, S. Plastic Shrinkage of Concrete Modified by Metakaolin. Magazine of Civil Engineering 2021, 103, 1–15, [doi:10.34910/MCE.103.14](https://doi.org/10.34910/MCE.103.14)
3. Cheah, C.B.; Chow, W.K.; Oo, C.W.; Leow, K.H. The Influence of Type and Combination of Polycarboxylate Ether Superplasticizer on the Mechanical Properties and Microstructure of Slag-Silica Fume Ternary Blended Self-Consolidating Concrete. Journal of Building Engineering 2020, 31, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101412/>
4. Güneyisi, E.; Gesoglu, M; Booya, E.; Mermerdas, K. Strength and permeability properties of self-compacting concrete with cold bonded fly ash lightweight aggregate. Construction and Building Materials. Volume 74, 15 January 2015, P. 17-24 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.032>
5. Aitcin P.C. High-Performance Concrete. – London: E&FN SPON. – 1998. – 364 p. <https://ru.scribd.com/document/618856021/High-Performance-Concrete>
6. Kalashnikov V.I. Fine-dispersed rheological matrices and powder concrete of new generation. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference “Composite

- Building Materials. Theory and practice". - Penza. - 2007. - p. 9-18.
[https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2012/8\(34\)/07.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2012/8(34)/07.pdf)
7. Utepov, Y.; Akhmetov, D.; Akhmatshaeva, I. Effect of Fine Fillers from Industrial Waste and Various Chemical Additives on the Placeability of Self-Compacting Concrete. Computers and Concrete 2020, 25, 59–65, <https://doi.org/10.12989/cac.2020.25.1.059>
 8. Elyamany, H.E.; Abd Elmoaty, A.E.M.; Mohamed, B. Effect of Filler Types on Physical, Mechanical and Microstructure of Self Compacting Concrete and Flow-Able Concrete. Alexandria Engineering Journal 2014, 53, 295–307, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.03.010>
 9. EN 197-1:2011 Cement - Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements; 2011; p. 38; <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/64d327b1-d5ac-45e3-8b04-fafec9e0698e/en-197-1-2011?srsId=AfmBOooXnn984NiZaAXeFnksHAMxfxU4Ifjp6W-1tiQia-eN1iPIZizr>
 10. EN 196-2:2013 Method of Testing Cement - Part 2: Chemical Analysis of Cement; 2013; p. 73; https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/47283941-90a2-43dc-8b2c-dea6208712a6/en-196-2-2013?srsId=AfmBOoq9kREAKPlI32Qt5eE3eVjcRb0XftnRfXMs_3KZCwMLn7dlSDYZ
 11. GOST 8736-2014. Sand for Construction Works. Specifications; 2014. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293767/4293767502.pdf>
 12. ST RK GOST R 51232-2003. WATER. General requirements for organization and methods of quality control. 2003 г. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30015745&pos=2;-112#pos=2;-112
 13. GOST 30459-2008. Admixtures for Concretes and Mortars. Determination and Estimate of the Efficiency; 2008. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293818/4293818440.htm>
 14. EN 13263-1:2005+A1:2009 Silica Fume for Concrete—Part 1: Definitions, Requirements and Conformity Criteria; 2009; p. 23; https://www.intertekinform.com/preview/98703412427.pdf?sku=870053_SAIG_NSAI_NSAI_2068874&srsId=AfmBOoolG83UBYye4Z51wFzcbv5KTCKVkPvvbXjGN6v6mRiBHJBWh9x3
 15. GOST R 56593-2015 “Mineral additives for concrete and mortars” <https://meganorm.ru/Data2/1/4293759/4293759239.pdf>
 16. Okamura, H.; Ouchi, M. Self-Compacting Concrete. ACT 2003, 1, 5–15, <http://dx.doi.org/10.3151/jact.1.5>
 17. Bruker. X-Ray Diffraction. <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/diffractometers-and-x-ray-microscopes/x-ray-diffractometers/diffrac-suite-software/diffrac-eva.html>
 18. Riad, D.; Mohamed Larbi, M. Acceleration of the Hardening of Concrete Made with Mineral Admixtures by Using a Heat Treatment Process. Journal of Materials Science and Engineering 2014, A4, 164–171. https://www.researchgate.net/publication/267152418_Acceleration_of_the_Hardening_of_Concrete_Made_with_Mineral_Admixtures_by_Using_a_Heat_Treatment_Process
 19. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S. New modified concretes // Moscow: Paradise. - 2010. - 258 p. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-92-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-92-104)
 20. Abdraimov, I.; Kopzhassarov, B.; Kolesnikova, I.; Akhmetov, D.A.; Madiyarova, I.; Utepov, Y.

- Frost-Resistant Rapid Hardening Concretes. Materials 2023, 16, 3191, <https://doi.org/10.3390/ma16083191>
21. Su, Y.; Luo, B.; Luo, Z.; Huang, H.; Li, J.; Wang, D. Effect of Accelerators on the Workability, Strength, and Microstructure of Ultra-High-Performance Concrete. Materials 2021, 15, 159, <https://doi.org/10.3390/ma15010159>.
22. Yu, R.; Spiesz, P.; Brouwers, H.J.H. Effect of Nano-Silica on the Hydration and Microstructure Development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a Low Binder Amount. Construction and Building Materials 2014, 65, 140–150, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.063>
23. Zhakipbekov, S.; Aruova, L.; Toleubayeva, S.; Ahmetganov, T.; Utkelbaeva, A. The Features of the Hydration and Structure Formation Process of Modified Low-Clinker Binders. doi:10.34910/MCE.103.2
24. Shannag, M.J. High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume. Cement and Concrete Composites 2000, 22, 399–406, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00037-8)
25. Revilla-Cuesta, V.; Skaf, M.; Ortega-Lopez, V.; M.Manso, J. Multi-parametric flowability classification of self-compacting concrete containing sustainable raw materials: An approach to real applications. Nov 2022. Journal of building engineering 63 (4):105524. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105524>

И.Абдраимов¹, К.Муса¹, Ю.Пухаренко², М.Сайлыгараева^{3*}

¹ *Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан*

² *Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, Санкт-Петербург, Ресей Федерациясы*

³ *Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан*

Гиперпластификатормен және кремнеземдік микротолтырғыштармен цемент тасының гидратация өнімдерінің құрылымын зерттеу

Аңдатпа. Бұл жұмыста техногендік және табиғи текті белсенді кремнеземдік толтырғыштардың және поликарбоксилатты суперпластификатордың цемент матрицасының құрылымына оның микрокеуектілігін арттыру мақсатында бірлескен әсері зерттелді. Толтырғыш бөлшектердің дисперсиясы, құрылымы мен компоненттерінің аморфизациясы байланыстырушы материал бөлшектерінің молекулалық және беттік кристалдану құрылымына химиялық энергияның әсерінен болатыны анықталды. Ерітінді қоспаларының құрамына кремний диоксиді мен пластификаторды біріктіріп енгізу бойынша зерттеулер пуццоландық қоспаның құрамын байланыстырғыш массасының 15% дейін арттыруға мүмкіндік береді, бұл цемент шығынын азайтуға көмектеседі, сонымен бірге цемент тасының микроқұрылымын оңтайландыруды және кейіннен жоғары құрылыс және техникалық сипаттамалары бар бетонды өндіруді қамтамасыз етеді. Зерттеу аясында поликарбоксилатты пластификаторлар мен белсенді кремнеземдік толтырғыштардың қатысуымен гидратация өнімдерін талдау мақсатында цемент тасын егжей-тегжейлі микроқұрылымдық зерттеу жүргізілді. Алынған нәтижелер ерітінді қоспасының құрамына 10-15% пластификатор мен кремнеземді толтырғышты енгізу цемент жүйесіндегі портландит мөлшерінің төмендеуіне, оның кристалдарының

мөлшерінің азаюына, түйіршікаралық кеңістіктің толтырылуына, сонымен қатар цемент тасының құрылымын нығыздауға және нығайтуға әкелетінін көрсетеді. Осылайша, ұсынылған тәсіл пуццоландық қоспаларды тиімді пайдалануды, бетонның пайдалану қасиеттерін жақсартуды және қымбат цементті тұтынуды азайтуды қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: гиперпластификатор, кремнеземдік микротолтырғыштар, гидратация өнімдері, цемент тасы, цемент құрылымы.

И.Абдраимов¹, К.Муса¹, Ю.Пухаренко², М.Сайлыгараева^{3*}

¹ *Южно-Казахстанский университет имени М. О. Ауэзова, Шымкент, Казахстан*

² *Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация*

³ *Казахский Национальный Аграрный Исследовательский университет, Алматы, Казахстан*

Изучение структуры продуктов гидратации цементного камня с гиперпластификатором и кремнеземистыми микронаполнителями

Аннотация. В данной работе исследовано совместное влияние активных кремнеземистых наполнителей техногенного и природного происхождения и поликарбоксилатного суперпластификатора на структуру цементной матрицы с целью повышения её микропористости. Установлено, что диспергирование частиц наполнителя, аморфизация структуры и компонентов обусловлены воздействием химической энергии на молекулярную и поверхностную кристаллизационную структуру частиц вяжущего материала. Исследования по совместному введению кремнезёма и пластификатора в составе растворных смесей позволяют увеличить содержание пуццолановой добавки до 15% от массы вяжущего, что способствует снижению расхода цемента, одновременно обеспечивая оптимизацию микроструктуры цементного камня и дальнейшее получение бетонов с высокими строительными и техническими характеристиками. В рамках исследования было проведено детальное микроструктурное исследование цементного камня с целью анализа продуктов гидратации в присутствии поликарбоксилатных пластификаторов и активных кремнеземистых наполнителей. Полученные результаты показывают, что введение 10–15% пластификатора и кремнеземистого наполнителя в состав растворной смеси приводит к снижению содержания портландита в цементной системе, уменьшению размеров его кристаллов, заполнению межзернового пространства, а также к уплотнению и упрочнению структуры цементного камня. Таким образом, предложенный подход обеспечивает эффективное использование пуццолановых добавок, повышая эксплуатационные свойства бетона и снижая потребление дорогостоящего цемента.

Ключевые слова гиперпластификатор, кремнеземные микроволны, продукты гидратации, цементный камень, цементная структура.

References

1. Gesoglu, M; Güneyisi, E.; Oznur Oz, H.; Taner, Y.; Taha, I. Durability and Shrinkage Characteristics of Self-Compacting Concretes Containing Recycled Coarse and/or Fine

- Aggregates. August 2015. Advances in Materials Science and Engineering. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/278296> Surname A and Surname B 2009 Journal Name 23 544.
2. Usanova, K.; Barabanshchikov, Y.; Krasova, A.; Akimov, S.; Belyaeva, S. Plastic Shrinkage of Concrete Modified by Metakaolin. Magazine of Civil Engineering 2021, 103, 1–15, doi:10.34910/MCE.103.14
 3. Cheah, C.B.; Chow, W.K.; Oo, C.W.; Leow, K.H. The Influence of Type and Combination of Polycarboxylate Ether Superplasticizer on the Mechanical Properties and Microstructure of Slag-Silica Fume Ternary Blended Self-Consolidating Concrete. Journal of Building Engineering 2020, 31, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101412/>
 4. Güneysi, E.; Gesoglu, M.; Booya, E.; Mermerdas, K. Strength and permeability properties of self-compacting concrete with cold bonded fly ash lightweight aggregate. Construction and Building Materials. Volume 74, 15 January 2015, P. 17-24 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.032>
 5. Aitcin P.C. High-Performance Concrete. – London: E&FN SPON. – 1998. – 364 p. <https://ru.scribd.com/document/618856021/High-Performance-Concrete>
 6. Kalashnikov V.I. Fine-dispersed rheological matrices and powder concrete of new generation. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference “Composite Building Materials. Theory and practice”. – Penza. – 2007. – p. 9-18. [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2012/8\(34\)/07.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2012/8(34)/07.pdf)
 7. Utepov, Y.; Akhmetov, D.; Akhmatshaeva, I. Effect of Fine Fillers from Industrial Waste and Various Chemical Additives on the Placeability of Self-Compacting Concrete. Computers and Concrete 2020, 25, 59–65, <https://doi.org/10.12989/cac.2020.25.1.059>
 8. Elyamany, H.E.; Abd Elmoaty, A.E.M.; Mohamed, B. Effect of Filler Types on Physical, Mechanical and Microstructure of Self Compacting Concrete and Flow-Able Concrete. Alexandria Engineering Journal 2014, 53, 295–307, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.03.010>
 9. EN 197-1:2011 Cement - Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements; 2011; p. 38; <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/64d327b1-d5ac-45e3-8b04-fafec9e0698e/en-197-1-2011?srsId=AfmBOooXnn984NiZaAXeFnksHAMxU4Ifp6W-1tiQia-eN1iPiZizr>
 10. EN 196-2:2013 Method of Testing Cement - Part 2: Chemical Analysis of Cement; 2013; p. 73; https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/47283941-90a2-43dc-8b2c-dea6208712a6/en-196-2-2013?srsId=AfmBOoq9kREAKPlI32Qt5eE3eVjcRb0XftnRfXMs_3KZCwMLn7dlSDYZ
 11. GOST 8736-2014. Sand for Construction Works. Specifications; 2014. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293767/4293767502.pdf>
 12. ST RK GOST R 51232-2003. WATER. General requirements for organization and methods of quality control. 2003 г. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30015745&pos=2;-112#pos=2;-112
 13. GOST 30459-2008. Admixtures for Concretes and Mortars. Determination and Estimate of the Efficiency; 2008. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293818/4293818440.htm>
 14. EN 13263-1:2005+A1:2009 Silica Fume for Concrete—Part 1: Definitions, Requirements and Conformity Criteria; 2009; p. 23;

- <https://www.intertekinform.com/preview/98703412427.pdf?sku=870053> SAIG NSAI NSAI 2068874&srsId=AfmBOoIG83UBYye4Z51wFzcbv5KTckVkpVvbXjGN6v6mRiBHJBWh9x3
15. GOST R 56593-2015 “Mineral additives for concrete and mortars”
<https://meganorm.ru/Data2/1/4293759/4293759239.pdf>
 16. Okamura, H.; Ouchi, M. Self-Compacting Concrete. ACT 2003, 1, 5–15,
<http://dx.doi.org/10.3151/jact.1.5>
 17. Bruker. X-Ray Diffraction. <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/diffractometers-and-x-ray-microscopes/x-ray-diffractometers/diffrac-suite-software/diffrac-eva.html>
 18. Riad, D.; Mohamed Larbi, M. Acceleration of the Hardening of Concrete Made with Mineral Admixtures by Using a Heat Treatment Process. Journal of Materials Science and Engineering 2014, A4, 164–171.
<https://www.researchgate.net/publication/267152418> Acceleration of the Hardening of Concrete Made with Mineral Admixtures by Using a Heat Treatment Process
 19. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S. New modified concretes // Moscow: Paradise. - 2010. - 258 p. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-92-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-92-104)
 20. Abdraimov, I.; Kopzhassarov, B.; Kolesnikova, I.; Akhmetov, D.A.; Madiyarova, I.; Utepov, Y. Frost-Resistant Rapid Hardening Concretes. Materials 2023, 16, 3191,
<https://doi.org/10.3390/ma16083191>
 21. Su, Y.; Luo, B.; Luo, Z.; Huang, H.; Li, J.; Wang, D. Effect of Accelerators on the Workability, Strength, and Microstructure of Ultra-High-Performance Concrete. Materials 2021, 15, 159,
<https://doi.org/10.3390/ma15010159>.
 22. Yu, R.; Spiesz, P.; Brouwers, H.J.H. Effect of Nano-Silica on the Hydration and Microstructure Development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a Low Binder Amount. Construction and Building Materials 2014, 65, 140–150,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.063>
 23. Zhakipbekov, S.; Aruova, L.; Toleubayeva, S.; Ahmetganov, T.; Utkelbaeva, A. The Features of the Hydration and Structure Formation Process of Modified Low-Clinker Binders.
[doi:10.34910/MCE.103.2](https://doi.org/10.34910/MCE.103.2)
 24. Shannag, M.J. High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume. Cement and Concrete Composites 2000, 22, 399–406, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00037-8)
 25. Revilla-Cuesta, V.; Skaf, M.; Ortega-Lopez, V.; M.Manso, J. Multi-parametric flowability classification of self-compacting concrete containing sustainable raw materials: An approach to real applications. Nov 2022. Journal of building engineering 63 (4):105524.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105524>

Information about the authors:

Abdraimov Ilyas – PhD student, Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Ave 5, Shymkent, Kazakhstan

Musa Kuttybay – PhD student, Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Ave 5, Shymkent, Kazakhstan

Yuri Pukhareno – Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Krasnoarmeyskaya, 2nd, 4, Saint Petersburg, Russian Federation

Mariya Sailygarayeva – corresponding author, PhD, senior lector, The Kazakh National Agrarian Research University, Abay Ave., 8, Almaty, Kazakhstan

Абдраимов Ильяс – PhD студент, Южно-Казахстанский университет имени М. О. Ауэзова, просп. Тауке хана 5, Шымкент, Казахстан

Муса Куттыбай – PhD студент, Южно-Казахстанский университет имени М. О. Ауэзова, просп. Тауке хана 5, Шымкент, Казахстан

Пухаренко Юрий – профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Сайлыгараева Мария – автор по корреспонденции, PhD, старший преподаватель, Казахский Национальный Аграрный Исследовательский университет, проспект Абая, 8, Алматы, Казахстан

Абдраимов Ильяс – PhD студент, Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, Тәуке хан даңғылы 5, Шымкент, Қазақстан

Муса Куттыбай – PhD студент, Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, Тәуке хан даңғылы 5, Шымкент, Қазақстан

Пухаренко Юрий – профессоры, 2Санкт-Петербург мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, 2-ші Красноармейская көш., 4, Санкт-Петербург, Ресей Федерациясы

Сайлыгараева Мария – хат-хабар авторы, PhD, аға оқытушы, 3Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан, Абай даңғылы, 8, 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 50.35.39
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-53-64>

Агроөнеркәсіптік кешендегі жарнамалық бюджетті машиналық оқыту алгоритмі негізінде бөлуді оңтайландыру.

Ж.Т. Әбілдаева^{1*} , Р.К. Ускенбаева¹ , Ж.Б. Кальпеева¹ ,
Н.Б. Қоңырбаев² , А.О. Дәуітбаева² 

¹Қ. И. Сәтбаева атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы, Қазақстан.

²Қорқыт Ата атындағы Қызылорда Университеті, Қызылорда, Қазақстан

*E mail: Zhansaya_A@mail.ru, r.k.uskenbaeva@satbaev.university, ,
z.kalpeyeva@satbayev.university, nurbek@korkyt.kz, aicos@mail.ru*

Аңдатпа Зерттеу агроөнеркәсіп кешеніндегі (АӨК) маркетингтік және жарнамалық мәселелерді шешу үшін NSGA-III көп критерийлі оңтайландыру үшін машиналық оқытуға негізделген алгоритмін қолдануға арналған. Бәсекелестікті арттыру және Қазақстан Республикасының экономикасын цифрландыру жағдайында жұмыстың өзектілігі жарнамалық науқандардың тиімділігін, мақсатты аудиторияны қамту және шығындарды азайту сияқты критерийлерді ескере отырып, кәсіпорындардың маркетингтік бюджеттерін бөлуді оңтайландыру қажеттілігінен туындап отыр. Жұмыста қолданылған әдістеме мақсаттық функцияларды, шектеулерді және парето-оңтайлы шешімдерді табу үшін NSGA-III қолдану арқылы формализациялауды қамтиды. Зерттеу барысында алынған мәліметтер агроөнеркәсіптік кешендегі маркетингтік жоспарлау тапсырмалары үшін NSGA-III әлеуетті қолдану мүмкіндігін растайды және агроөнеркәсіптік кешен кәсіпорындарында басқару шешімдерін қабылдау үшін негіз бола алады. Зерттеу нәтижелері NSGA-III алгоритмінің агроөнеркәсіптік кешендегі маркетингтік жоспарлау процестерін жетілдіруде және кәсіпорындардың басқарушылық шешімдерін қолдауда айтарлықтай әлеуетке ие екенін дәлелдейді. Бұл тәсіл АӨК саласында ресурстарды тиімді пайдалануға және нарықтағы бәсекелестік қабілетті арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: агроөнеркәсіп кешені, көп критериалды оңтайландыру, NSGA-III, маркетингтік стратегиялар, Парето фронты, цифрландыру

Түсті 19.08.2025. Жөнделді 20.11.2025. Мақұлданды 24.11.2025. Онлайн қолжетімді 30.12.2025

* хат-хабар үшін автор

Кіріспе.

Әлемнің кез келген дерлік елінің экономикасында ауыл шаруашылығы орасан зор рөл атқарады, ал Қазақстан (немесе ҚР) бұдан тыс емес, өйткені агроөнеркәсіптік кешен (АӨК) азық-түлік қауіпсіздігінің негізгі көзі және маңызды экспорттық сектор болып табылады. Дегенмен, соңғы жылдары Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіп кешені бәсекелестіктің күшеюі, өндіріс тиімділігін арттыру және өнімді бөлуді оңтайландыру қажеттілігі сияқты бірқатар міндеттерге тап болды [1, 2, 3]. Сондықтан Қазақстанның агроөнеркәсіп кешеніндегі маркетинг пен жарнаманың цифрлық әдістерін математикалық және кибернетикалық әдістерді қолдана отырып зерттеудің өзектілігі бірқатар негізгі факторларға байланысты. Атап айтқанда, жаһандану және экономиканы цифрландыру жағдайында Қазақстан ауыл шаруашылығы әдістері мен процестерін жаңғырту қажеттілігіне тап болып отыр. Ал машиналық оқыту (ML) және NSGA-II, NSGA-III сияқты көп критериялы оңтайландырудың эволюциялық есептеу алгоритмдері сияқты жаңа технологияларды пайдалану маркетингтік процестерді басқаруды жақсартуға, бәсекеге қабілеттілікті арттыруға және агроөнеркәсіптік кешенде ресурстарды бөлуді оңтайландыруға бірегей мүмкіндіктер береді. Біздің ойымызша, Қазақстанның агроөнеркәсіп кешеніндегі маркетинг пен жарнаманы цифрландыру тұтынушылармен өзара іс-қимылды жақсартып қана қоймай, нарықтық үрдістерді дәлірек болжауды қамтамасыз етеді, сайып келгенде, тауарлар мен қызметтердің сапасын арттырады [1, 4]. Ауыл шаруашылығы маркетингіндегі цифрлық әдістерді зерттеу Қазақстанның тұрақты және бәсекеге қабілетті аграрлық секторын қалыптастыру үшін өзекті деп есептейміз, бұл тез өзгертін нарықтық шындық жағдайында өте маңызды.

Цифрлық маркетинг бөлімінде агромаркетинг агроөнеркәсіптік сектордағы жекелеген кәсіпорындар деңгейінде де, мемлекеттік макродеңгейде де нарықтық процестерді реттейтін және талдау жасайтын ауыл шаруашылығы нарығындағы қызметті басқару жүйесі. Бірқатар зерттеушілердің [5, 6] пікірінше, агромаркетинг нарықтың әртүрлі қатысушылары арасында өзара тиімді алмасу механизмдерін ұсынуға, сонымен қатар тұтынушылардың қажеттіліктерін анықтауға және оларды қанағаттандыру жолдарын іздеуге жағдай жасауға қабілетті. Негізінде агромаркетинг ауыл шаруашылығы нарығын талдауды, оның динамикасын болжауды, өнімге сұранысты қалыптастыруды және олардың таралуын ынталандыруды, сайып келгенде, ауыл шаруашылығы өнімдерін өндіруге, өткізуге және нарықта жылжытуға қатысты негізделген шешімдер қабылдауға мүмкіндік беруді қамтиды, сондай-ақ агроөнеркәсіптік кешендегі (бұдан әрі Агроөнеркәсіптік кешендегі) нарықтық жағдайды бағалау және болжау мүмкіндіктерін береді. Заманауи ауыл шаруашылығы кәсіпорындары, әдетте, өзін-өзі реттемейді [7, 8], сондықтан олар ресурстармен және ақпараттармен алмасып, сыртқы маркетингтік ортамен үнемі әрекеттесіп отырады. Олардың жұмыс істеуі мен өмір сүруі сыртқы ортаның әсеріне байланысты, ал ауылшаруашылық кәсіпорындары өз қызметін сақтау үшін маркетингтік ортаның өзгерістеріне бір мезгілде өз мүмкіндіктері шегінде әсер ете отырып, бейімделуі керек. Ауыл шаруашылығы маркетингінің теориясы мен практикасы [1, 2] соңғы жылдары қарқынды дамып келеді, бұл ең алдымен ауыл шаруашылығы және азық-түлік нарығындағы бәсекелестіктің күшеюімен, сондай-ақ Қазақстан Республикасы халқының өсуімен және өмір сүру деңгейінің жақсаруымен, әртүрлі салалар үшін ауыл шаруашылығы шикізатының маңыздылығының артуы, ғылым мен өндірістік күштердің дамуымен байланысты. Қазақстандағы ауыл шаруашылығы кәсіпорындарының жұмыс

істеуінің қазіргі тәжірибесі өндірісті ұйымдастырудың тиімділігі, өнімнің тұтынушылардың күтулеріне сәйкестігі, сондай-ақ кәсіпорында өнімді бөлу мен өткізудің сауатты және жақсы үйлестірілген жүйесі ауыл шаруашылығы тауарын өндіруші мен оның қызметкерлерінің қаржылық жағдайына тікелей әсер ететінін растайды [4].

Осы зерттеу контекстінде ауылшаруашылық маркетингінде көп критериалды оңтайландыру үшін NSGA-III эволюциялық алгоритмін пайдалану қарастырылады. Бұл тәсіл бізге әртүрлі факторларды теңестіруге және белгісіздік жағдайында шешім қабылдауға байланысты мәселелерді тиімді шешуге мүмкіндік береді, бұл Қазақстанның ауыл шаруашылығы бизнесі үшін өте маңызды екені сөзсіз.

Бұрынғы зерттеулерді талдау.

Қазіргі таңда маркетингтік стратегияларды, оның ішінде агроөнеркәсіптік кешен үшін оңтайландыру мәселелері зерттеушілердің айтарлықтай назарын аударды, бұл бәсекелестіктің күшеюі және менеджмент жүйелерінің сапасы мен бейімделуіне талаптардың өсуі жағдайында маркетингті басқару тиімділігін арттыру қажеттілігімен байланысты. Ғылыми әдебиеттерде осы саладағы зерттеудің бірнеше негізгі бағыттарын бөліп көрсетуге болады. Негізгі бағыттардың бірі маркетингтік стратегияларды оңтайландырудың математикалық әдістерін қолданумен байланысты [5, 6, 7, 8]. Мысалы, Першуков Н.В. және Карнадуд О.С. (2019) [5] белгісіздік жағдайында математикалық тәсілдердің практикалық қолданылуын көрсететін бюджеттік ресурс шектеулерін ескере отырып, маркетингтік стратегияларды оңтайландырудың математикалық үлгілерін ұсынады. Зерттеудің тағы бір маңызды бағыты - экономикалық және математикалық модельдерге негізделген деректерді талдау және болжау әдістерін пайдалану. Сонымен, Блинова Ю.Ю. (2015) [4] агроөнеркәсіп кешеніндегі нарықтық тенденцияларды болжау дәлдігін жақсарту үшін экономикалық және математикалық модельдеу әдістерін қолдануды зерттейді, бұл неғұрлым негізделген басқару шешімдерін қабылдауға мүмкіндік береді.

Маркетингтік стратегияларды тарату арналарымен біріктіруге ерекше көңіл бөлінеді. Мысалы, зерттеу авторлары [10] персоналды талдау және өнімді тарату арналарын бағалау негізінде маркетингті басқару стратегияларын таңдау модельдерін ұсынды, бұл авторлардың пікірінше, маркетингтік стратегияның көп компонентті сипатын және оның кәсіпорынның қаржылық нәтижелеріне әсерін ескеруге мүмкіндік береді. Яғни, мәні бойынша көп критерийлі мәселе қойылуда.

Агромаркетингінде шешім қабылдауды қолдау үшін заманауи машиналық оқыту технологияларын қолданудың өзектілігін атап өткен жөн. Qiu J. (2021) [12] және Hung-Yi T. (2024) [11] сияқты зерттеулер ауыл шаруашылығы кәсіпорындарын басқаруда интеллектуалды жүйелерді қолдану перспективаларын ашатын үлкен деректерді талдау негізінде маркетингтік стратегияларды әзірлеу үшін нейрондық желілер мен оңтайландыру алгоритмдерін пайдалануды көрсетеді. Алайда қазіргі уақытта агроөнеркәсіптік кешендегі маркетингтік стратегияларды оңтайландыру міндеттері үшін арнайы NSGA-III қолдану бойынша ауқымды зерттеулер жүргізілмегенін атап өткен жөн. NSGA-III алгоритмі қалалық агломерациялардағы қалдықтарды басқару (Qu L. et al., 2019) [13] және сауда стратегияларына негізделген көп агенттік жүйелерде тапсырмаларды бөлу (Yang M. et al., 2025) [14] сияқты басқа қолданбаларда өзінің тиімділігін көрсеткенімен [14], оны қолдану белгілі бір контексте мәдени зерттеулерді жасайды. Біздің зерттеуімізде

толтыру орынды болатын ғылыми олқылықтар.

Бұрыңғы зерттеулерді талдауды қорытындылай отырып, ауылшаруашылық маркетингін көп критериалды оңтайландыруда эволюциялық алгоритмдер мен машиналық оқытуға негізделген әдістерін қолдану, стратегиялық жоспарлаудың тиімділігін және тез өзгертін нарық жағдайларына бейімделуін айтарлықтай арттыратыны сөзсіз. Сондықтан бұл зерттеу аграрлық сектордағы кәсіпорындар үшін оңтайлы маркетингтік стратегияларды және жарнаманы тұжырымдау үшін эволюциялық модельдеу әдістерін, атап айтқанда NSGA-III-ді одан әрі әзірлеуге және қолдануға бағытталған.

Зерттеудің мақсаты мен міндеттері.

Қазақстанның агроөнеркәсіп кешеніндегі маркетингтік стратегияларды оңтайландырудың NSGA-III алгоритмі негізінде көп критериалды оңтайландыру әдісін әзірлеу. Зерттеу мақсатына жету үшін келесі міндеттер шешілді:

-Агроөнеркәсіптік кешендегі маркетингтік бюджетті бөлу проблемасының мақсатты функциялары мен шектеулерін формализациялау.

-Агроөнеркәсіптік маркетингтің ерекшеліктерін ескере отырып, мәселені шешу үшін NSGA-III алгоритмін бейімдеу.

-Гиперкөлем (HV), диверсификация және таралу біркелкілігі (Spacing) метрикасы арқылы ерітінділердің сапасын бағалаумен есептеу экспериментін жүргізу. Сондай-ақ алынған Парето-оңтайлы шешімдерді талдау, оның ішінде бюджеттерді жылжыту арналары бойынша бөлу және критерийлер арасындағы ымыраға келу.

Әдіснама

Қазақстанның ауылшаруашылық саласындағы агроөнеркәсіптік кешенінің маркетингтік стратегиясы мен жарнамалық бюджетті көп критериалды оңтайландыру барысында қарастырылатын критерийлерді ресімдейік.

1. Жарнамалық науқанның тиімділігі (f_1) – өнімді өткізу көлемінің ұлғаюы (мысалы, ауылшаруашылық кәсіпорнының табысының немесе кірісінің артуы).

2. Маркетинг және жарнама шығындары (f_2) – жарнамалық науқандарға және ауыл шаруашылығы өнімдерін жылжытуға жұмсалған жалпы шығындар.

3. Мақсатты аудиторияны қамту деңгейі (f_3) – жарнамалық науқан арқылы жеткен мақсатты аудиторияның үлесі.

4. Жарнамалық стратегияның тұрақтылығы (f_4) – ұзақ уақыт кезеңіндегі әсердің тұрақтылығы (мысалы, маусымдық ауытқулардың төмендеуі).

5. Сату арналарымен интеграция (f_5) – маркетинг күштері мен тарату арналары арасындағы үйлестіру деңгейі (мысалы, онлайн платформалар немесе ауыл шаруашылығы кәсіпорындарының серіктес желілері арқылы тапсырыстар санының артуы).

Критерийлердің әрқайсысын мақсаттық функция түрінде талдап, формалдап көрейік.

Содан кейін [2, 3, 5, 6, 9, 11] зерттеулерге сүйене отырып, біз осы формада мақсаттық функцияларды жаза аламыз.

$$f_1 = \frac{\Delta P}{R} \times 100\%, \quad (1)$$

ΔP – ауылшаруашылық кәсіпорнының өніміне жарнамалық науқан жүргізгеннен кейінгі пайданың артуы.

R – жарнамалық науқанның жалпы шығындары.

Яғни, мән соғұрлым жоғары болады (f_1), соғұрлым жарнама тиімдірек болады.

Критерий (f_2) жарнамалық қызметке арналған жалпы бюджетті көрсетеді. Оны келесідей орнатуға болады:

$$f_2 = \sum_{i=1}^N C_i, \quad (2)$$

C_i – i -ші арнадағы (интернет, БАҚ және т.б.) жарнамалық шығындар;

N – жарнамалық арналардың саны.

Оңтайландыру осы критерийді азайтуды қамтиды.

Критерий (f_3) жарнамалық науқан жеткен мақсатты аудиторияның пайызын көрсетеді, яғни.

$$f_3 = \frac{A_{reach}}{A_{total}} \times 100\%, \quad (3)$$

A_{reach} – аудиторияға жетті,

A_{total} – жалпы мақсатты аудитория.

Критерий (f_4) уақыт бойынша жарнама әсерінің тұрақтылығын көрсетеді, яғни.

$$f_4 = 1 - \frac{\sigma(R(t))}{\mu(R(t))}, \quad (4)$$

$R(t)$ – белгілі бір уақытта сатудың өсуі,

σ – белгілі бір кезеңдегі сатылымның стандартты ауытқуы,

μ – сатудың орташа өсу қарқыны.

Критерий (f_5) маркетинг және сату әрекеттерін үйлестіруді сипаттайды, яғни.

$$f_5 = \frac{S_{online} + S_{offline}}{S_{total}} \times 100\%, \quad (5)$$

S_{total} – тапсырыстардың жалпы саны,

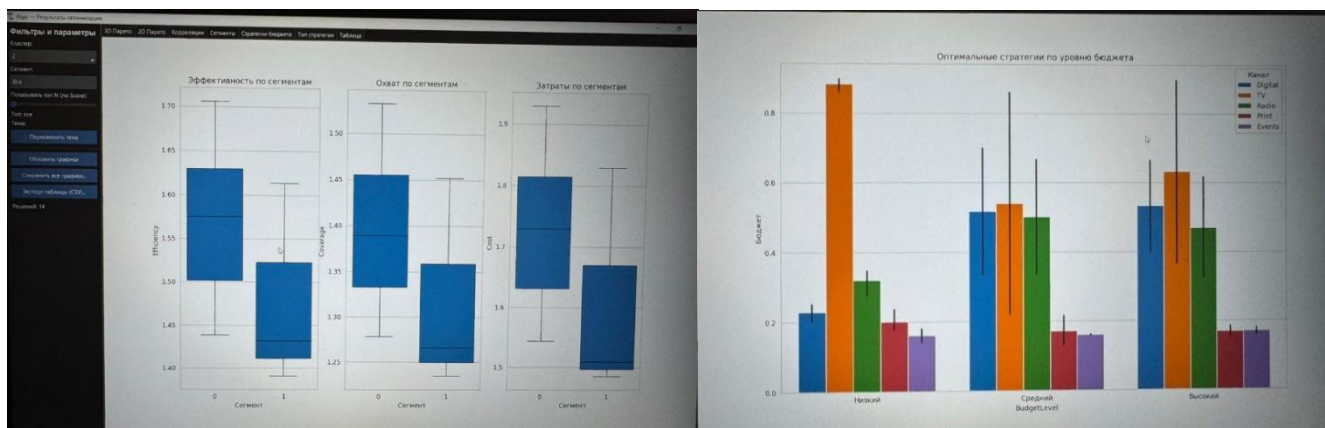
S_{online} – онлайн арналар арқылы тапсырыстар саны,

$S_{offline}$ – желіден тыс арналар арқылы тапсырыстар саны.

Критерийді барынша арттыру маркетинг пен сатудың оңтайлы интеграциясын білдіреді. Сондықтан біз келесі мақсаттарды қанағаттандыратын ымыраға келу шешімін табуымыз керек: барынша арттыру (f_1, f_3, f_3, f_5) және азайту (f_2). Бұл зерттеуде есептің математикалық тұжырымы тек үш мақсатты функцияны – тиімділікті барынша арттыруды қамтыды (f_1), аудиторияның қолжетімділігін арттыру (f_3) және шығындарды азайту (f_2), сондай-ақ әрбір арнаға ең төменгі жарнаға және жалпы жарнама бюджетіне екі шектеу.

Нәтижелер мен талқылау.

Зерттеу барысында алынған нәтижелер көпкритериалды оңтайландыру принциптеріне сәйкес Парето оңтайлы шешімде мақсаттық функциялар $(f_1), (f_2), (f_3)$ оңтайландыру бағыттарын теңестіру үшін өзгертілді. Python кодында тиімділік пен қамту минус белгісімен көрсетілген. $(F[i,0] = -np.sum(x*self.channels[:,0]))$, бұл рутео құрылымының стандартты тәжірибесіне байланысты болды, мұнда барлық мәселелер әдепкі бойынша азайту мәселелері ретінде тұжырымдалады. Нәтижелерді алғаннан кейін $(front = -res.F)$ дұрыс түсіндіру үшін мәндердің инверсиясы орын алады. Шығындар оң болып қалады, өйткені оларды азайту мәселенің бастапқы тұжырымына сәйкес келеді. Осылайша, графиктердегі теріс құн мәндері бастапқы оң мәндерді көрсететін визуализация артефакті болып табылады. Бұл нәтижелер кестесіндегі деректерді талдаумен де расталады, VS Code консолінде модельдеу нәтижелерінің шығысын көрсететін 2-суретті қараңыз (мысалы, -1,46 шығындар 1,46 шартты бірліктердің нақты шығындарына сәйкес келеді). Шешім қабылдау процесінде алынған шешімнің сапасын бағалау маңызды болды, атап айтқанда, келесі нәтижелер алынды. Гиперкөлем (HV = 0,876) және әртараптандыру (Әртүрлілік = 0,561) көрсеткіштері мақсатты көрсеткіштерден асып түсетін Парето фронтының жақсы сапасын көрсетеді. Аралық көрсеткішінің біршама асып кетуі (0,579 мақсатқа қарсы <0,5) шешімдерді бөлудің орташа біркелкі еместігін көрсетеді, бұл қайшы критерийлері бар мәселелерге тән. 2-суреттегі ең жақсы 5 шешім критерийлер арасындағы ымыраны көрсетеді, яғни тиімділіктің максималды мәндері (1.32) және қамту (1.17) теориялық күтулерге сәйкес жоғары шығындармен (~1.46) қол жеткізіледі.



1-сурет. Зерттеу нәтижелері

Сандық арналардың (ең жақсы шешімде 15%) және оқиғалардың (5-ші шешімде 56,7%) басым рөлі олардың жоғары тиімділігіне және бастапқы деректерде қамтылуына сәйкес келеді. Нәтижелердің Парето оңтайлылығының қағидаттарына сәйкестігі мыналармен расталады: 1) 2D графикіндегі тиімділік/қамту және шығындар арасындағы антикорреляция (1-суретте сол жақта); 2) параллель координаталардағы көп бағытты тенденциялар (1-суреттегі графиктер); 3) шектеулерді сақтау (барлық бюджеттер $\geq 0,1$, сома $\leq 1,5$). Нормаланған құрамдас ұпайлар (-0,930-дан -0,970-ке дейін) салмақтық факторларды (тиімділік үшін 0,6, қамту үшін 0,4) және айыпталушы шығындар

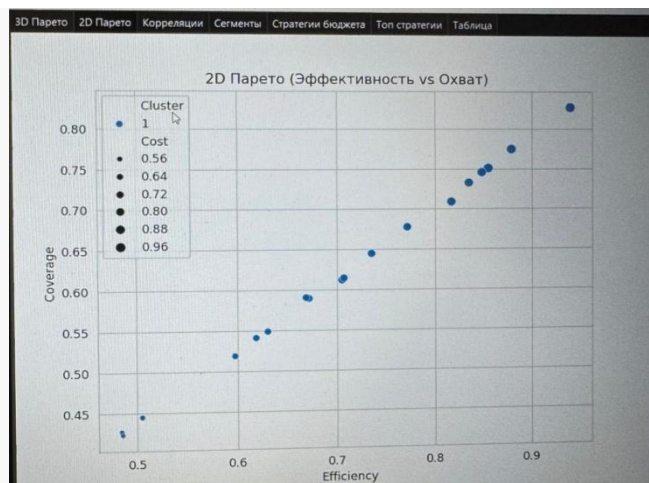
коэффициентін ескере отырып, шешімдерді дұрыс дәрежелейді. Алынған нәтижелерді талдай отырып, NSGA-III алгоритмін қолдану маркетингтік талаптарға жауап беретін, әсіресе ауыл шаруашылығы кәсіпорындары үшін басым емес шешімдердің репрезентативті жиынтығын алуға мүмкіндік берді деп айта аламыз. Ұсынылып отырған үлгі тапсырманың көп критерийлік сипатын ескере отырып, агроөнеркәсіптік кешендегі жарнамалық бюджетті бөлу бойынша басқару шешімдерін қабылдау үшін негіз бола алады.

```
489 | 58680 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0014190961 | f
490 | 58800 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0016605158 | f
491 | 58920 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0017721305 | f
492 | 59040 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0017780855 | f
493 | 59160 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0020856014 | f
494 | 59280 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0023992739 | f
495 | 59400 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0023992739 | f
496 | 59520 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0023938396 | f
497 | 59640 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0030698042 | f
498 | 59760 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0000241417 | f
499 | 59880 | 16 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0032191525 | f
500 | 60000 | 15 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.0008188012 | f

=== QUALITY METRICS ===
Hypervolume: 0.876 (target >0.7)
Spacing: 0.579 (target <0.5)
Diversity: 0.561

=== TOP-5 SOLUTIONS ===
Solution #1 (score: -0.930):
Budgets: [0.596 0.1 0.29 0.1 0.412]
Efficiency: 1.32 | Coverage: 1.17 | Costs: -1.46
Budget allocation (%):
Channel 1: 39.8%
Channel 2: 6.7%
Channel 3: 19.3%
Channel 4: 6.7%
Channel 5: 27.5%

Solution #2 (score: -0.934):
Budgets: [0.51 0.1 0.339 0.115 0.402]
```



2сурет. VS Code консоліндегі зерттеу нәтижелерін шығару

Кейінгі зерттеулерде біз алынған нәтижелерді баламалы NSGA-II алгоритмінің жұмысымен, сондай-ақ жасанды нейрондық желілер сияқты машиналық оқыту әдістерімен салыстыруды жоспарлап отырмыз.

Қорытынды.

NSGA-III алгоритмі агроөнеркәсіптік кешеннің маркетингтік бюджетін көп критериялды оңтайландыру мәселесін шешуде жоғары тиімділік көрсеткені анықталды, ол метрикамен расталады (HV = 0,876, Diversity = 0,561). Кибернетикалық модельдеу барысында қарастырылып отырған келесі критерийлер арасында ымыраға келу белгіленді: жарнама тиімділігін барынша арттыру (1,32) және қамту (1,17) жалпы Паретоның оңтайлылық принципіне сәйкес келетін жоғары шығындармен (~1,46) қол жеткізіледі. Цифрлық арналар мен оқиғалар оңтайлы шешімдерде ең үлкен мәнді көрсетті (сәйкесінше ауыл шаруашылығы кәсіпорындарының өнімдерін жарнамалауға арналған бюджеттің 39,8% және 56,7%), бұл олардың бастапқы деректердегі жоғары тиімділігіне сәйкес келеді. Графиктердегі теріс құн мәндері румоо-да инверттелген мақсатты функциялардың визуализациясының артефакті болып табылады және нәтижелердің мағыналы интерпретациясын бұрмаламайтыны көрсетілген. Мақалада ұсынылған модель агроөнеркәсіптік кешендегі басқару шешімдерін қолдау үшін пайдаланылуы мүмкін екендігі көрсетілді және одан әрі зерттеулер NSGA-III-ны балама әдістермен (NSGA-II, нейрондық желілер) салыстыруға бағытталуы керек.

Авторлардың қосқан үлесі.

Әбілдаева Ж.Т., Ускенбаева Р.К.- жұмыстың тұжырымдамасына немесе дизайнына айтарлықтай үлес қосқан; нәтижелерді жинау, талдау немесе түсіндіру;
Кальпеева Ж.Б.- мәтінді жазу және/немесе оны сыни тұрғыдан қайта қарау;
Қоңырбаев Н.Б., Дәуітбаева А.О.- мақаланың соңғы нұсқасын жариялауға бекіту;
Әбілдаева Ж.Т.- жұмыстың барлық аспектілері үшін жауапты болуға және деректердің дәлдігіне немесе мақаланың барлық бөліктерінің тұтастығына қатысты мәселелерді тиісті түрде зерттеуге және шешуге келісім беру.

Әдебиеттер тізімі

1. Шуленбаева Ф.А., Каменова М.Ж., Дарибаева А.К., Шуленбаева К.С. (2011) Вопросы организации и развития маркетинга в аграрном секторе Казахстана. Научные Записки ОрелГИЭТ, (2). — С. 247–253.
2. Omarkhanova Z.M., Niyazbekova S.U., Varzin V.V., Kerimkhulle S.Y., Nurekenova E.S. (2022) Financial provision of the agro-industrial complex of Kazakhstan: problems and solutions. In Sustainable Agriculture: Circular to Reconstructive, Volume 2. —P. 27-32). Singapore: Springer Nature Singapore.
3. Мадиярова Д.М., Тюленева Т.А., Молдажанов М.Б., Аманбаева А.А. (2020) Механизм интеграции сельскохозяйственного сектора экономики Казахстана в рамках ЕАЭС. Естественно-гуманитарные исследования, (4 (30). — С. 103–109.
4. Сыздықов Б.Ш., Шарипов А.К., Абилкасым А.Б. (2020) Конкурентоспособность агропромышленного комплекса Туркестанской области Казахстана. Проблемы агорынка, (2). — С. 89–99.
5. Блинова Ю.Ю. (2015) Применение экономика-математических методов в маркетинговых исследованиях. In Аналитические и финансово-экономические аспекты развития региональной экономики. — С. 216–219.
6. Першуков Н.В., Карнадуд О. С. (2019) Математические модели в маркетинге. In Россия молодая. — С. 90731–90731).
7. Пономаренко К. В., Затонская И. В. (2016). Методы оптимизации маркетинговой стратегии предприятия. In В сборнике: Современная наука: теоретический и практический взгляд сборник статей Международной научно-практической конференции: — С. 260–262).
8. Garrido A. (2000) A mathematical programming model applied to the study of water markets within the Spanish agricultural sector. Annals of Operations Research, 94. — P. 105–123.
9. Kozlovskiy S., Khadzhynov I., Lavrov R., Skydan O., Ivanyuta N., Varshavska N. (2019). Economic-mathematical modeling and forecasting of competitiveness level of agricultural sector of Ukraine by means of theory of fuzzy sets under conditions of integration into European market.
10. Laburtseva O., Larina, Y., Nahorna O., Vinichenko S., Hordienko V., Al-Shaban A.T.N. (2021) Development of a marketing strategy for enterprise financial growth. Studies of Applied Economics, 39(5).
11. Kovalchuk S.V., Kobets D.L., Zaburmekha Y.M. (2019) Modeling the choice of strategies of marketing management of enterprise personnel. Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk, (2). — P. 163–173.
12. Hung-Yi T. (2024, June). Bp Neural Network Research on Enterprise Marketing Strategy Combination. In 2024 IEEE International Conference on Information Technology,

Electronics and Intelligent Communication Systems (ICITEICS). — С. 1–5. IEEE.

13. Qiu J. (2021, October). An Enterprise Marketing Channel Optimization Strategy in the Context. In The 2021 International Conference on Machine Learning and Big Data Analytics for IoT Security and Privacy: SPIoT-2021 Volume 1. — Vol. 97. — P. 314. Springer Nature.

14. Qu L., Zhou Z., Zhang T., Zhang H., Shi L. (2019). An improved procedure to implement NSGA-III in coordinate waste management for urban agglomeration. Waste Management and Research, 37(11). — P. 1161–1169.

15. Yang M., Zhang B., Shi Z., & Li J. (2025). A hybrid task allocation approach for multi-UAV systems with complex constraints: a market-based bidding strategy and improved NSGA-III optimization. The Journal of Supercomputing, 81(4). — P. 1–33.

**Ж.Т. Абилдаева¹, Р.К. Ускенбаева¹, Ж.Б. Кальпеева¹,
Н.Б. Конырбаев², А.О. Даутбаева²**

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

²*Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан*

Оптимизация распределения рекламного бюджета в АПК на основе алгоритма машинного обучения.

Аннотация. Целью исследования является использование алгоритма многокритериальной оптимизации NSGA-III на основе машинного обучения для решения задач маркетинга и рекламы в агропромышленном комплексе (АПК). В условиях повышения конкурентоспособности и цифровизации экономики Республики Казахстан актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации распределения маркетинговых бюджетов предприятий с учетом таких критериев, как эффективность рекламных кампаний, охват целевой аудитории и снижение затрат. Методология, используемая в работе, предполагает формализацию целевых функций, ограничений и использование NSGA-III для поиска Парето-оптимальных решений. Результаты, полученные в ходе кибернетического моделирования, как правило, свидетельствуют о высоком качестве решений (гиперобъемном), компромиссе между критериями и доминирующей роли цифровых каналов (увеличение бюджета до 15%). Полученные в ходе исследования данные подтверждают потенциальную возможность использования NSGA-III для задач планирования маркетинга в агропромышленном комплексе и могут служить основой для принятия управленческих решений на агропромышленных предприятиях. Результаты исследования подтверждают, что алгоритм NSGA-III обладает значительным потенциалом для совершенствования процессов маркетингового планирования в агропромышленном комплексе и поддержки принятия управленческих решений предприятиями. Данный подход позволяет эффективно использовать ресурсы агропромышленного комплекса и повысить конкурентоспособность на рынке.

Ключевые слова: агропромышленный комплекс, многокритериальная оптимизация, NSGA-III, маркетинговые стратегии, фронт Парето, цифровизация.

**Zh.T. Abildayeva¹, R.K. Uskenbaeva¹, Zh.B. Kalpeyeva¹,
N.B. Konyrbaev², A.O. Dautbayeva²**

¹*Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.*

²*Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan*

Optimization of advertising budget allocation in the agro-industrial complex based on a machine learning algorithm.

Abstract. The study is aimed at using the NSGA-III algorithm for multi-criteria optimization based on machine learning to solve marketing and advertising problems in the agro-industrial complex (AIC). In the context of increasing competitiveness and digitalization of the economy of the Republic of Kazakhstan, the relevance of the work is due to the need to optimize the distribution of marketing budgets of enterprises, taking into account such criteria as the effectiveness of advertising campaigns, coverage of the target audience and cost reduction. The methodology used in the work involves formalization of objective functions, constraints and the use of NSGA-III to find Pareto-optimal solutions. The results obtained during cybernetic modeling usually indicate high quality of solutions (hyper-volumetric), a compromise between the criteria and the dominant role of digital channels (up to 15% increase in the budget). The data obtained during the study confirm the potential use of NSGA-III for marketing planning tasks in the agro-industrial complex and can serve as a basis for making management decisions at agro-industrial enterprises. The results of the study prove that the NSGA-III algorithm has significant potential in improving marketing planning processes in the agro-industrial complex and supporting management decisions of enterprises. This approach allows for efficient use of resources in the agribusiness sector and increased competitiveness in the market.

Keywords: agro-industrial complex, multi-criteria optimization, NSGA-III, marketing strategies, Pareto front, digitalization.

References

1. Shulenbaeva F.A., Kamenova M.Zh., Daribaeva A.K., Shulenbaeva K.S. (2011) Voprosy organizatsii i razvitiya marketinga v agrarnom sektore Kazahstana [Issues of organization and development of marketing in the agricultural sector of Kazakhstan]. *Nauchnye Zapiski OrelGIJeT*, (2), 247–253 p. (in Russ).
2. Omarkhanova Z.M., Niyazbekova S.U., Varzin V.V., Kerimkhulle S.Y., Nurekenova E.S. (2022) Financial provision of the agro-industrial complex of Kazakhstan: problems and solutions. *Sustainable Agriculture: Circular to Reconstructive*, Vol. 2, 27–32p. (in Eng).
3. Madiyarova D.M., Tyuleneva T.A., Moldazhanov M.B., Amanbaeva A.A. (2020) Mekhanizm integratsii sel'skohozjajstvennogo sektora jekonomiki Kazahstana v ramkah EAJeS [Mechanism of integration of the agricultural sector of Kazakhstan within the EAEU]. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya*, 4(30), 103–109p. (in Russ).
4. Syzdykov B.Sh., Sharipov A.K., Abilkassym A.B. (2020) Konkurentosposobnost' agropromyshlennogo kompleksa Turkestanskoy oblasti Kazahstana [Competitiveness of the agro-industrial complex of Turkestan region of Kazakhstan]. *Problemy agrorynka* (2), 89–99p. (in Russ).
5. Blinova Ju.Ju. (2015) Primenenie jekonomiko-matematicheskikh metodov v marketingovyh issledovaniyah [Application of economic-mathematical methods in marketing research].

Analiticheskie i finansovo-jekonomicheskie aspekty razvitija regional'noj jekonomiki. 216–219p. (in Russ).

6. Pershukov N.V., Karnadud O.S. (2019) Matematicheskie modeli v marketinge [Mathematical models in marketing]. In *Rossija molodaja*. 90731–90731p. (in Russ).
7. Ponomarenko K.V., Zatonskaja I.V. (2016) Metody optimizacii marketingovoj strategii predprijatija [Methods of optimization of enterprise marketing strategy]. In *Sovremennaja nauka: teoreticheskij i prakticheskij vzgljad*. 260–262p. (in Russ).
8. Garrido A. (2000) A mathematical programming model applied to the study of water markets within the Spanish agricultural sector. *Annals of Operations Research*. 105–123p. (in Eng).
9. Kozlovskiy S., Khadzhynov I., Lavrov R., Skydan O., Ivanyuta N., Varshavska N. (2019) Economic-mathematical modeling and forecasting of competitiveness level of agricultural sector of Ukraine by means of theory of fuzzy sets under conditions of integration into European market. (in Eng).
10. Laburtseva O., Larina Y., Nahorna O., Vinichenko S., Hordiienko V., Al-Shaban A.T.N. (2021) Development of a marketing strategy for enterprise financial growth. *Studies of Applied Economics*, 39(5). (in Eng).
11. Kovalchuk S.V., Kobets D.L., Zaburmekha Y.M. (2019) Modeling the choice of strategies of marketing management of enterprise personnel. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*, (2), pp. 163–173. (in Eng).
12. Hung-Yi T. (2024, June) BP Neural Network Research on Enterprise Marketing Strategy Combination. In *2024 IEEE International Conference on Information Technology, Electronics and Intelligent Communication Systems (ICITEICS)*, pp. 1–5. IEEE. (in Eng).
13. Qiu J. (2021) An Enterprise Marketing Channel Optimization Strategy in the Context. In *The 2021 International Conference on Machine Learning and Big Data Analytics for IoT Security and Privacy: SPIoT-2021*, Vol. 97, p. 314. Springer Nature. (in Eng).
14. Qu L., Zhou Z., Zhang T., Zhang H., Shi L. (2019) An improved procedure to implement NSGA-III in coordinate waste management for urban agglomeration. *Waste Management & Research*, 37(11), pp. 1161–1169. (in Eng).
15. Yang M., Zhang B., Shi Z., Li J. (2025) A hybrid task allocation approach for multi-UAV systems with complex constraints: a market-based bidding strategy and improved NSGA-III optimization. *The Journal of Supercomputing*, 81(4), pp. 1–33. (in Eng).

Авторлар туралы ақпарат:

Әбілдаева Ж.Т. – хат-хабар авторы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университетінің бағдарламалық инженерия кафедрасының 3-курс докторанты. Алматы, 050013, Қазақстан.

Ускенбаева Р.К.- Т.ғ.д., Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университетінің профессоры, Сәтбаев көшесі 22в, Алматы, 050013, Қазақстан

Кальпеева Ж.Б. – PhD докторы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Сәтбаев көшесі 22в, Алматы, 050013, Қазақстан

Қоңырбаев Н.Б. - PhD докторы, жоба жетекшісі, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда Университетінің «Компьютерлік ғылымдар» БББ меңгерушісі, Абай 55, Қызылорда, Қазақстан

Дәуітбаева А.О. – т.ғ.к., Қорқыт Ата атындағы Қызылорда Университетінің қауымдастырылған профессоры, Абай 55, Қызылорда, Қазақстан

Абилдаева Ж.Т. - автор-корреспондент, докторант 3-го курса кафедры программной инженерии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева. Алматы, 050013, Казахстан.

Ускенбаева Р.К. - д.т.н., профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22в, Алматы, 050013, Казахстан.

Кальпеева Ж.Б. - PhD доктор, руководитель проекта, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22в, Алматы, 050013, Казахстан.

Конырбаев Н.Б. - PhD доктор, руководитель проекта, заведующий кафедрой «Компьютерных наук», Кызылординский университет имени Коркыт Ата, ул. Абая, 55, Кызылорда, Казахстан.

Дәутбаева А.О. – кандидат технических наук, доцент, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, ул. Абая, 55, Кызылорда, Казахстан

Abildaeva Zh.T. - author-correspondent, doctoral student of the 3rd year of the Department of Software Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaeva. Almaty, 050013, Kazakhstan.

Uskenbaeva R.K. - Ph.D., professor, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaeva, ul. Satpaeva, 22v, Almaty, 050013, Kazakhstan.

Kalpeyeva J.B. - PhD doctor, project manager, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaeva, ul. Satpaeva, 22v, Almaty, 050013, Kazakhstan.

Konyrbaev N.B. - PhD doctor, project leader, head of the Computer Science Department, Kyzylorda University named after Korkyt Ata, ul. Abaya, 55, Kyzylorda, Kazakhstan.

Dautbaeva A.O. - candidate of technical sciences, associate professor, Kyzylorda University named after Korkyt Ata, ul. Abaya, 55, Kyzylorda, K



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 73.29.51

Шолу мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-65-82>

Интермодальды тасымалдау: мәні мен маңызы

А.Т.Камысбаева*^{id}, Д.З. Бекжанов^{id}

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы, Қазақстан

E mail: Kamysbayeva.A@stud.satbayev.university, s.bekzhanova@satbayev.university

Аңдатпа. Бұл ғылыми шолу мақалада Қазақстандағы ауыл шаруашылығы өнімдерін интермодальды тасымалдаудың мәні мен маңызы талданады. Зерттеу Қазақстандағы астық және басқа аграрлық өнімдерді жеткізуде бірнеше көлік түрлерін (теміржол, автомобиль, теңіз) үйлестіріп пайдалану тәжірибесіне шоғырланады. Қазақстанның аграрлық логистикасындағы интермодальды тасымалдаудың қазіргі ахуалы, негізгі ерекшеліктері мен проблемалары анықталып, оларды шешуде халықаралық тәжірибенің орны сипатталады. Зерттеу нәтижесінде интермодальды жүйелерді дамыту ауыл шаруашылығы өнімдерін тасымалдаудың тиімділігін арттырып, ішкі және сыртқы нарықтарға жеткізуді жеңілдететіні көрсетіледі. Мақалада тақырып бойынша кемінде 5 Scopus дерекқоры мақалаларына нақты сілтемелер берілген, сонымен қатар Қазақстандағы аграрлық өнімдерді тасымалдау деректері негізінде екі кесте мен екі диаграмма ұсынылған. Зерттеу нәтижелері отандық аграрлық сектордың логистикалық әлеуетін жетілдіру және интермодальды тасымал инфрақұрылымын дамыту бойынша қорытындылар мен ұсыныстар ұсынады.

Түйін сөздер: интермодальды тасымалдау; логистика; ауыл шаруашылығы өнімдері; көлік инфрақұрылымы; Қазақстан; аграрлық экспорт; мультимодальды көлік; тасымалдау тиімділігі

Кіріспе

Бүгінгі жаһандану дәуірінде жүк тасымалының тиімділігі мен жылдамдығы экономиканың көптеген салаларының дамуына тікелей әсер етеді. Интермодальды тасымалдау – жүктерді бір бүтін тасымалдау бірлігімен (контейнер, тіркеме) бірнеше түрлі көлік түрлерімен тасымалдау үрдісі, мұнда көлікті ауыстырғанда жүкті қайта тиеу талап етілмейді [1]. Бұл ұғым логистикада тасымалдаудың бірізділігін арттыруға және әр түрлі көлік түрлерінің артықшылықтарын үйлестіре пайдалануға мүмкіндік береді. Интермодальды (кейде мультимодальды деп те аталады) тасымалдау арқылы жалпы тасымал шығындары автокөлікпен тек бір өзі тасымалдауға қарағанда төмен болуы тиіс, сонда ғана ол тартымды болмақ [1]. Интермодальды жүйелер жүк қозғалысының тиімділігін көтеріп, тасымал уақытын қысқартып, шығындарды азайтуға септігін тигізеді.

Қазақстан – аумақ көлемі жағынан әлемдегі ең ірі елдердің бірі әрі теңізге тікелей шыға алмайтын (континенттік) мемлекет. Мұндай географиялық ахуал сыртқы сауда тасымалдарында біраз қиындық туғызады: жүктерді шетел нарықтарына шығару үшін көршілес елдердің порттары мен көлік желілерін пайдалануға тура келеді, бұл тасымал қашықтығын ұзартып, құнын арттырады [2]. Мысалы, Орталық Азия қаласынан жүк контейнерін Шанхай портына жеткізу құны Еуропадағы (Польша немесе Түркиядан) теңізбен жеткізуге қарағанда 5 есе қымбат екендігі атап өтілген [2]. Осыған қарамастан, Қазақстанның Еуразия құрлығының кіндігінде орналасуы оны транзиттік және логистикалық хаб ретінде дамытуға зор мүмкіндік береді. Ел басшылығы Еуропа мен Азияны, солтүстік пен оңтүстікті байланыстыратын көлік дәліздерін дамытуға және оларды толыққанды логистикалық жүйеге айналдыруға баса назар аударып отыр [3]. Тәуелсіздік жылдарында Қазақстанда мыңдаған шақырым жаңа теміржол және автомобиль жолдары салынып, трансқұрлықтық бағыттар (мысалы, Батыс Еуропа – Батыс Қытай дәлізі) қалыптасты [2].

Ауыл шаруашылығы – Қазақстан экономикасының маңызды секторы және елдің астық, ұн экспорты бойынша әлемдегі орны айтарлықтай. Алайда, аграрлық өнімдердің тиімді нарықтарға жетуінде тасымал шығындары айтарлықтай роль атқарады. Зерттеулер көрсеткендей, Қазақстанда ауыл шаруашылығы өнімдерінің нарықтық бағасының 40%-ына дейінгі үлесі тасымалдауға жұмсалатын шығындар болуы мүмкін [3]. Бұл көрсеткіш ауыл шаруашылығы жеткізу тізбегінде логистиканың қаншалықты қымбатқа түсетінін және неге оны оңтайландыру қажеттігін аңғартады. Ұзақ қашықтықтар, инфрақұрылымның жеткіліксіздігі және көлік түрлерінің тиімді байланыспауы – осының бәрі фермерлер мен экспорттаушылар үшін қосымша кедергілер туғызады [4]. Мысалы, алыс қашықтыққа тасымалдауда Қазақстанда теміржолға балама жоқ деуге болады, алайда *теміржол паркінің тозуы, “тар жерлердің” болуы, жоғары тарифтер* және т.б. проблемалар жиі айтылады [4]. Сол сияқты, жол инфрақұрылымының кейбір өңірлерде нашарлығы мен *шаруалардың өз көлік құралдарының тапшылығы* астықты егінжайдан элеваторға дейін жеткізудің өзін қиындатады [4]. Мұндай түйткілдерді шешуде интермодальды тасымалдау тәсілдерін енгізу маңызды орын алмақ – яғни, тасымал тізбегінің әр буынында ең тиімді көлік түрін пайдалану және олардың үйлесімді әрекеттесуін қамтамасыз ету.

Бұл мақалада интермодальды тасымалдаудың теориялық негіздері мен оның артықшылықтары қарастырылады. Қазақстан жағдайындағы ауыл шаруашылығы өнімдері логистикасының қазіргі статистикалық деректері талданып, теміржол-жол,

теміржол-теңіз комбинацияларының рөлі бағаланады. Сонымен бірге, АҚШ, Еуропа және өзге елдер тәжірибесіндегі ауыл шаруашылығы жүктерін мультимодальды тасымалдау мысалдары келтіріліп, Қазақстанға қолдануға болатын тұстары баяндалады. Зерттеудің мақсаты, нысаны мен пәні, гипотезасы төменде нақтырақ баяндалған.

Қазақстан Республикасындағы ауыл шаруашылығы өнімдерін ішкі және сыртқы нарықтарға жеткізу барысындағы интермодальды тасымалдау үдерісі зерттеу нысаны болып табылады. Астық, ұн, майлы дақылдар секілді негізгі аграрлық өнімдерді тасымалдау кезінде қолданылатын әр түрлі көлік түрлері (теміржол, автокөлік, теңіз/өзен кемелері, т.б.) және олардың тоғысындағы инфрақұрылым (элеваторлар, порттар, логистикалық хабтар) осы нысанның құрамдас бөлігі ретінде қарастырылады.

Зерттеу пәні–ауыл шаруашылығы өнімдерін интермодальды тасымалдаудың тиімділігі, ерекшеліктері мен оның экономикалық маңызын талдау. Яғни, бірнеше көлік түрін ықпалдастыра пайдалану ауыл шаруашылығы логистикасының шығындарына, жылдамдығына, географиясына және жалпы бәсекеге қабілеттілігіне әсерін зерттеу. Сондай-ақ пән шеңберінде Қазақстандағы интермодальды тасымалдау тізбегін ұйымдастырудың (мысалы, *астықты шаруашылықтан – элеваторға – портқа – шетел нарығына жеткізу* жолдарының) нақты мәселелері мен оларды жетілдіру жолдары қарастырылады.

Мақала мақсаты– «интермодальды тасымалдау» ұғымының Қазақстанның агроөнеркәсіп кешені логистикасындағы мәнін ашып көрсету және оның аграрлық өнімдерді тиімді жеткізудегі маңызын ғылыми тұрғыда негіздеу. Атап айтқанда, Қазақстан жағдайында ауыл шаруашылығы өнімдерін бірнеше көлік түрімен тасымалдаудың артықшылықтары мен кездесетін кедергілерін анықтап, саланың бәсекеге қабілеттілігін арттыру үшін интермодальды тәсілдерді қолдану бойынша ұсыныстар әзірлеу. Бұл мақсатқа жету үшін Қазақстандағы қазіргі деректерді талдап, халықаралық озық тәжірибемен салыстыра отырып, интермодальды тасымалдың экономикалық тиімділігін бағалау көзделеді.

Қойылған мақсатқа сәйкес келесі зерттеу міндеттері айқындалды:

1. Интермодальды тасымалдаудың теориялық негіздерін зерделеу: ғылыми әдебиетке шолу жасап, интермодальды тасымалдау түсінігін, оны ұйымдастыру принциптерін және артықшылықтарын сипаттау; мультимодальды және интермодальды тасымал ұғымдарының ерекшеліктерін анықтау [1].

2. Қазақстандағы ауыл шаруашылығы өнімдері тасымалының қазіргі жағдайын талдау: астық және басқа да өнімдерді ішкі нарықта және экспортқа тасымалдауда пайдаланылатын негізгі көлік түрлерінің (теміржол, автожол, теңіз) үлесін, тасымал көлемдерін статистикалық деректер негізінде көрсету; тасымал инфрақұрылымының (астық терминалдары, порттар) жай-күйін баяндау.

3. Интермодальды тасымалдаудың аграрлық сектор үшін маңызын негіздеу: тасымал шығындарының өнімнің өзіндік құнына әсерін талдап, бірнеше көлік түрін үйлестіре пайдаланудың тиімділігін сандық және сапалық көрсеткіштер арқылы дәйектеу (мысалы, теміржол тасымалының үлесін ұлғайту арқылы тасымал шығынын төмендету мүмкіндігі) [3].

4. Қазақстандағы интермодальды тасымалдың негізгі мәселелерін анықтау: қазіргі кездегі кедергілерді талдау (инфрақұрылымдық шектеулер, технологиялық үйлесімсіздік, тарифтік саясат, т.б.) және нақты мысалдар келтіру

(жекелеген жылдардағы тасымал көрсеткіштеріне шолу, тасымалдауда туындайтын түйткілдер) [4].

5. алықаралық тәжірибені шолу: ауыл шаруашылығы өнімдерін интермодальды тасымалдау бойынша шет елдердегі (АҚШ, Еуропа, Ресей, т.б.) озық тәсілдерді қарастыру – мысалы, АҚШ-та астық экспортында теміржол мен өзен баржаларының үйлесімі қалай қолданылатыны [5]. Еуропада тез бұзылатын өнімдерді жеткізуде теңіз жолын пайдалану (Short Sea Shipping) арқылы интермодальды желілерді дамыту тәжірибесі [6]. солардың Қазақстан үшін пайдалы тұстарын анықтау.

6. Практикалық ұсыныстар ұсыну: зерттеу нәтижелері негізінде Қазақстанда ауыл шаруашылығы өнімдерін интермодальды тасымалдау жүйесін жетілдіру бойынша ұсыныстар әзірлеу (логистикалық хабтар құру, тарифтік ынталандыру, халықаралық көлік дәліздеріне интеграция, т.б.).

7. Бастапқы зерттеу гипотезасы: интермодальды тасымалдау шешімдерін енгізу Қазақстанның аграрлық өнімдерін ішкі және сыртқы нарықтарға жеткізудің тиімділігін айтарлықтай арттырады, тасымалға жұмсалатын шығындарды төмендетеді және экспорттық географияны кеңейтеді. Яғни, егер Қазақстан өзінің көлік инфрақұрылымын дамытып, теміржол, автожол және теңіз тасымалдарын біртұтас жүйе ретінде үйлестірсе, онда ауыл шаруашылығы өнімдерін тасымалдау жылдамдығы мен сенімділігі артып, өнімнің бәсекеге қабілеттілігі күшейеді деп болжануда. Мысалы, астықты тек автокөлікпен тасымалдаудан гөрі, алдымен теміржолмен негізгі бағытта, кейін қысқа қашықтықта автокөлікпен жеткізу (яғни мультимодальды тәсіл) арзанырақ және көлемді партияларды жылдам жөнелтуге мүмкіндік береді деген тұжырым тексеріледі. Сондай-ақ гипотезаға сәйкес, интермодальды тасымал тізбегін құру ішкі нарықта да (өңірлер арасындағы агроөнім қозғалысы), сыртқы саудада да (экспорттық маршруттар) тиімді, алайда оны іске асыру үшін тиісті инфрақұрылым мен ұйымдық шаралар қажет.

Әдіснама

Зерттеу әдістемесі ретінде комплексті әдебиетке шолу, салалық статистикалық деректерді талдау және салыстырмалы талдау тәсілдері қолданылды. Алдымен интермодальды тасымалдау тақырыбындағы ғылыми жарияланымдар (соның ішінде Scopus базасында индекстелген кемінде 5 мақала) мұқият зерттелді. Олардың ішінде жалпы теориялық еңбектер де [1], Қазақстан және ұқсас елдерге қатысты арнайы зерттеулер де бар [7]. Теориялық шолу интермодальды тасымалдың ұғымдық аппараты мен оған әсер етуші факторларды түсінуге көмектесті.

Содан кейін Қазақстан Республикасының ресми органдары (Ұлттық статистика бюросы, Ауыл шаруашылығы министрлігі, «Қазақстан темір жолы» ҰК, т.б.) жариялаған деректер және бұқаралық ақпарат құралдарындағы мәліметтер негізінде соңғы жылдардағы аграрлық өнім өндірісі, экспорты және тасымалы бойынша сандық көрсеткіштер жиналды. Атап айтқанда, астық өндірісі мен экспортының динамикасын көрсететін кесте мен диаграмма дайындалды (мысалы, 2022 жылы – жоғары өнім мен экспорт, 2021 және 2023 жылдары – төмендеу байқалады) [8]. Жүктерді тасымалдауда теміржолдың үлесі, автокөлікпен тасымалдаудың шектеулері сияқты көрсеткіштер талданды. Зерттеу барысында салыстырмалы талдау әдісі қолданылып, Қазақстанның

жағдайы халықаралық тәжірибемен салыстырылды. Мысалы, АҚШ-тағы астық жеткізу жүйесінде теміржол мен су көлігінің үйлесімі (өзен баржалары арқылы Мексика шығанағына тасымалдау) кең қолданылатыны ескеріліп Қазақстан үшін Каспий теңізі арқылы тасымалдау ұқсас рөл атқара алатыны талқыланды. Сондай-ақ Еуропа Одағының елдерінде тез бұзылатын ауыл шаруашылығы өнімдерін интермодальды тасымалдау (қысқа теңіз маршруты + теміржол) тәжірибесі қарастырылды [5;6].

Кестелік және графикалық талдау әдістері нәтижелерді көрнекі түрде көрсету үшін пайдаланылды. Зерттеу барысында алынған деректер негізінде 2 кесте (астық өндірісі мен экспорт динамикасы, интермодальды тасымалдың тиімділігіне қатысты салыстырмалар) және 2 диаграмма (өндіріс-экспорт графигі, экспорттық бағыттар құрылымы) құрылды. Бұл визуалды материалдар түйінді үрдістерді айқындауға көмектеседі.

Барлық пайдаланылған дереккөздерге сілтемелер берілді, оның ішінде кемінде бесеуі – Scopus базасында тіркелген рецензияланатын журнал мақалалары. Мысалы, Kazakhstan-дағы көлік дәліздерін дамыту және оның аймақтық экономикаға ықпалы жайлы 2020 жылғы Sustainability журналындағы мақала (Scopus-индекстелген) пайдаланылды, сондай-ақ Қазақстанда ауыл шаруашылығы өнімдерін тасымалдау шығындары туралы мәлімет беретін 2023 жылғы MDPI басылымындағы зерттеу нәтижелері келтірілді [3;7].

Зерттеу шеңберінде алынған мәліметтерді талдау нәтижелері келесі бөлімде ұсынылады.

Нәтижелер мен талқылау

Интермодальды тасымалдау – логистиканың заманауи тренді, ол бір жүкті бір тасымалдау бірлігі арқылы (мысалы, стандартты контейнерлер) бірнеше түрлі көлік құралдарымен жеткізуге мүмкіндік береді. Интермодальды жүйелерде өнімділік көрсеткіштерін жүйелі түрде өлшеу – стратегиялық шешім қабылдау мен ресурстарды оңтайлы бөлу үшін негізгі құрал [9]. Мұндай тәсілде жүктің өзін әр көлікке қайта тиеп отырмайды, бұл уақыт үнемдейді және өнімнің зақымдану тәуекелін азайтады [1]. Интермодальды жүйенің экономикалық тиімділігі оның әр бөлігі бөлек жұмыс істегеннен жоғары болуы тиіс: әр көлік түрі өзіне тиімді бөлікті орындайды. Мәселен, автокөлік икемділігімен жақын жерге тез жеткізуді қамтыса, теміржол үлкен көлемді жүкті алысқа арзан тасиды, ал теңіз кемелері халықаралық тасымалдауда ең төмен тариф ұсынады. Егер осы буындар дұрыс ұштасса, жалпы тасымал құны тек жүк көлігімен тасуға қарағанда төмен болады.

Интермодальды тасымалдауды тиімді жүргізу үшін бірнеше талап бар: инфрақұрылымның үйлесімділігі (бір көліктен екіншісіне жүк бірлігі оңай ауысатын терминалдар), жоспарлау мен басқарудың біртұтастығы (тасымалдаудың барлық кезеңін қадағалайтын логистикалық үйлестіруші) және құқықтық/тарифтік жағдайдың қолайлылығы. Дұрыс ұйымдастырылған жағдайда интермодальды логистика жүкті жеткізу уақытын қысқартып, тасымалдаудың сенімділігін арттырады, сондай-ақ ірі көлемді партияларды тиімді жөнелтуге мүмкіндік береді. Халықаралық тәжірибеде ауыл шаруашылығы өнімдерінің интермодальды тасымалы кеңінен пайдаланылады. АҚШ мысалында, елдің астық белдеуіндегі фермалар ауқымды өндірілген астықты алдымен теміржол немесе өзен баржаларымен порттарға жеткізіп, одан әрі теңіз кемелерімен экспорттайды. АҚШ-тың батыс және орталық штаттарында жиналған бидайдың 31%-ы Миссисипи өзені арқылы баржалармен Мексика шығанағындағы

порттарға тасымалданады екен – бұл интермодальды тасымалдың (өзен кемесі + мұхит кемесі) айқын мысалы. Осындай тәсіл бір жағынан теміржол мен автокөлікті босатып, арзан су жолын пайдаланып отыр, екінші жағынан, жүк ірі теңіз кемелеріне тікелей тиеліп, экспортқа жөнелтіледі. Еуропада да ауыл шаруашылығы өнімдерін мультимодальды жеткізу жолға қойылған: мысалы, Испаниядан Ұлыбританияға жемістер мен көкөністер қысқа теңіз қатынасы (паром) + теміржол + жүк көлігі комбинациясымен жеткізілетін жобалар бар. Бұл жүк тасымалының қоршаған ортаға әсерін азайтып, магистраль жолдардағы көлік жүктемесін төмендетеді. Көрші Ресейде де соңғы жылдары астық экспортында өзен және теңіз порттарын пайдалану өсіп, астық тиелген контейнерлік пойыздар Қиыр Шығыс порттарына дейін жеткізіліп, одан әрі теңізбен Қытай мен Оңтүстік-Шығыс Азияға жөнелтіле бастағаны белгілі – бұл да интермодальды тасымал түрі.

Сонымен, интермодальды тасымалдау үлгісінің мәні – тасымалдау тізбегін біртұтас процес ретінде қарастырып, әр кезеңге ең оңтайлы көлік түрін қолдану. Бұлай үйлестіру нәтижесінде тасымал жылдамдығы артатынын, шығындар қысқаратынын көптеген елдердің тәжірибесі көрсетіп отыр [1]. Қазақстан үшін бұдан шығатын қорытынды: астық, ұн, май өнімдері секілді ірі көлемді жүктерді алыс нарықтарға жеткізу міндеті тұрғанда, көліктің әр түрінің артықшылығын пайдаланатын интеграцияланған тасымал жүйесін құру қажет. Мұны іске асырудың әлеуеті мен кедергілерін талдау үшін енді Қазақстанның өз жағдайына назар аударайық.

Қазақстанның аграрлық логистикасының қазіргі ахуалы (өндіріс және экспорт динамикасы)

Қазақстан астық өндірісі бойынша әлемде жетекші он елдің қатарына кіреді және ұн экспортынан тұрақты түрде алдыңғы орындарды иеленеді. Елдің климаттық жағдайларына байланысты астық өнімділігі жылдан жылға айтарлықтай ауытқуы мүмкін, бұл өз кезегінде экспорт көлеміне тікелей әсер етеді. 1-кестеде Қазақстандағы соңғы онжылдықтағы кейбір жылдардағы астық өндірісі және экспорт көлемдері көрсетілген. Ал 1-графикте өндіріс пен экспорттың динамикасы салыстырмалы түрде бейнеленген.

1-кесте. Қазақстандағы астық өндірісі және экспорт көлемдері (таңдамалы жылдар)

Жыл (маркетингтік жыл)	Астық өндірісі, млн т	Экспорт (астық + ұн, млн т)
2011/12 (рекордтық)	26,9	15,0
2017/18	22,0 (бағалау)	9,87
2022/23	22,0	10,7
2023/24	17,1	7,7
2024/25 (болжау)	26,7	12,0

Ескертпе: 2011/12 маркетинг жылы – 2011 жылғы егін және 2011 қыркүйек – 2012 тамыз аралығындағы экспорт; 2024/25 – 2024 жылғы егін және келесі 12 айдағы күтілетін экспорт. Экспорт көлеміне астық баламасындағы ұн да кіреді.

Бұл деректер Қазақстан астық шаруашылығының өнімділігі құбылмалы екенін және инфрақұрылымның сол өзгерістерге ілесу қажеттігін көрсетеді. 2011 жылы ауа райы қолайлы болып, ел тарихындағы ең үлкен өнім – шамамен 27 млн тонна астық жиналған.

Сол жылы үкімет 15 млн тонна астық экспорттау мақсатын қойған еді. Алайда мұндай рекордтық көлемдерді сақтап, нарыққа шығару инфрақұрылымға үлкен салмақ түсірді – вагондар тапшылығы, порт мүмкіндіктерінің шектеулілігі байқалды. 2017-2018 жылдары өндіріс орташа деңгейде (шамамен 20-22 млн т) болып, экспорт жылына 8-10 млн тоннаны құрады. 2021 жылы құрғақшылық салдарынан өнім 16,3 млн тоннаға дейін төмендеп, оның салдары 2021/22 экспорт маусымында сезілді (шамамен 7 млн т деңгейінде). Ал 2022 жылы қолайлы жағдай қайта орнап, 22 млн т астық жиналды [8]. 2022/23 маркетингтік жылы Қазақстан астық пен ұнды қосқанда 10,7 млн тонна экспорттап, соңғы жылдардағы рекордты жаңартты. 2023 жылы егін тағы да азайып, 17,1 млн т болды, сәйкесінше 2023/24 маусымында экспорт шамамен 7,7 млн т-ға түсіп қалды. 2024 жылы еліміз қайтадан рекордтық өнім алды – 26,7 млн тонна астық жиналды, бұл соңғы он жылдағы ең жоғары көрсеткіш. Үкімет осы өнімнің экспорттық әлеуетін 12 млн тонна деп бағалап отыр (оның ішінде 7–7,5 млн т бидай, 1,3–1,4 млн т арпа, 0,3 млн т жүгері және 1 млн т майлы дақылдар) [8].



1-сурет. Қазақстандағы астық өндіру және экспорт динамикасы: рекордтық жылдар мен құлдыраулар (дереккөз: Қазақстан АШМ, Ұлттық статистика бюросы деректері негізінде)

1-суреттен байқалғандай, өндіріс көлемі жылдар бойынша айтарлықтай құбылып отырса да, экспорт мөлшері салыстырмалы түрде өндірістен төмен деңгейде тұрақтанады (ішкі тұтыну мен қорды есептегенде). Орта есеппен Қазақстан жыл сайын өндірген астықтың шамамен 40-45% экспортқа шығаруға қабілетті екені көрінеді (мысалы, 18-20 млн т өндіре отырып, 8-9 млн т сату). Астық экспортындағы негізгі үлесті бидай мен одан өндірілген ұн құрайды. Қазақстан дәстүрлі түрде әлемдегі ең ірі ұн экспорттаушы мемлекеттердің бірі болып келді. Экспорт географиясы бойынша Қазақстан астық пен ұнды ең алдымен келесі нарықтарға жеткізіп келген: Орталық Азия елдері (Өзбекстан,

Тәжікстан, Түрікменстан, Қырғызстан), Ауғанстан, Иран, сондай-ақ Ресей арқылы Қара теңіз порттарына шығып, одан әрі Кавказ және Жерорта теңізі елдеріне, Қытай және кейбір жылдары Еуропа нарықтарына шағын партиялар жөнелтіледі. Соңғы рекордтық өнім барысында үкімет дәстүрлі нарықтармен қатар алыс шетелге де белсендірек шығу стратегиясын айтты – мысалы, Қытай, Солтүстік Африка және Еуропа елдеріне экспортты ұлғайту жоспары жарияланды. 2024 жылғы мол астықты сату үшін жаңа бағыттар ретінде Италия, Латвия, Испания секілді Еуропа елдері, сондай-ақ Египет, Алжир тәрізді Африка нарықтары аталды. Бұл жаңа нарықтар Қазақстаннан географиялық алыста орналасқан, оларды игеру үшін көлік логистикасы күрделірек (ауыл шаруашылығы жүгі бірнеше елден транзитпен өтуі тиіс). [8].

Осы орайда, Қазақстанның қазіргі тасымал инфрақұрылымының мүмкіндіктері мен әлсіз тұстарын атап өту керек. Теміржол желісі – қазақстандық жүк тасымалының «қаңқасы». Елдегі жүктер айналымының 52,2%-ын теміржол көлігі қамтамасыз етеді, әсіресе ауыр және алыс қашықтыққа тасымалдауда оның үлесі басым. 2025 жылдың алғашқы тоқсанында теміржолмен тасылған астық көлемі 3,6 млн тоннаны құрап, бір жыл бұрынғыдан 49%-ға артқаны тіркелді – бұл соңғы бес жылдағы рекордтық көрсеткіш. Оның 2,8 млн тоннасы экспортқа жөнелтілген, бұл былтырғыдан 52% артық [2]. Яғни, өнім көп болған жылы теміржолдың жүк көтеруі айтарлықтай өсіп, экспорттың негізгі ауыртпалығын көтереді. Мысалы, 2025 жылғы наурызда тек бір айда 914 мың тонна астық экспортталғанының 463 мың тоннасы Орталық Азия елдеріне жөнелтілді (бұл бағытта өткен жылғыдан 48% көп) – мұның бәрі теміржол арқылы іске асты. Автомобиль көлігі көбіне ауыл ішіндегі, өңір ішіндегі тасымалдауда пайдаланылады: егіс алқабынан жақын маңдағы элеваторға немесе теміржол станциясына дейін жеткізу; сондай-ақ көрші мемлекеттермен шекара маңындағы саудада (мысалы, Қырғызстанға ұн, Ресеймен шектес аймақтарға өнім тасу) қолданылады. Дегенмен, автотасымал қашықтық өскен сайын қымбатқа түседі және жол инфрақұрылымы мен шекара өткелдерінің өткізу қабілетіне тәуелді. Теңіз және өзен көлігі Қазақстанда тікелей сыртқы тасымалдауда аз үлес алады, тек Каспий теңізі арқылы Әзербайжан бағытында және Ресейдің Еділ-Кама өзен жүйесі арқылы шағын көлемде іске асады. 2022 жылы Каспий теңізіндегі Құрық портында жаңа астық терминалы іске қосылды, бұл жылына шамамен 1 млн тоннаға дейін астық паром арқылы Әзербайжан мен ары қарай Грузия-Түркияға жіберуге мүмкіндік береді. Бұған дейін Каспийдегі Ақтау портында да астық терминалы жұмыс істеген (қуаты ~1,5 млн т/жыл), бірақ оның мүмкіндігі шектеулі болатын. Құрықтағы жаңа терминал Қазақстанның Транскаспий халықаралық көлік дәлізіне (ТХКД, «Орта дәліз») қосылу әлеуетін арттырады [8].

Қорыта айтқанда, Қазақстанның аграрлық логистикасы соңғы жылдары өндіріс көлеміне бейімделу үшін барынша күш салуда. Рекордтық өнімдер жылы қосымша тасымал қуатын жұмылдыру, «тар жерлерді» кеңейту талабы туындайды. Мысалы, 2024 жылдың өнімін экспорттау үшін үкімет теміржол тарифтеріне жеңілдік енгізуді (өнімді алыс нарықтарға шығару үшін), азық-түлік корпорациясы арқылы 2 млн тонна астық сатып алып, нарықты тұрақтандыруды, вагон паркін тиімді пайдалануды қолға алды. Дәстүрлі орталықазиялық нарықтар 7-8 млн тоннадан артық астықты қабылдай алмайтыны белгілі болғандықтан, қалған өнімді Қытай, Иран, Кавказ арқылы Таяу Шығыс пен Африкаға шығару міндеті тұр. Бұл міндетті орындау көп жағдайда интермодальды тасымал тізбектерін ұйымдастыруға тікелей тәуелді – яғни, астықты мыңдаған шақырым

қашықтыққа тиімді жеткізу үшін теміржол+теңіз комбинацияларын қолдану. Теңіз-теміржол интермодальды тасымалдау жүйелері үлкен көлемдегі жүктерді арзан әрі экологиялық қауіпсіз жеткізу мүмкіндігін береді [10].

Интермодальды тасымалдың Қазақстан үшін маңызы және басым бағыттары

Жоғарыдағы деректер мен үрдістер интермодальды тәсілдің Қазақстан аграрлық секторы үшін шешуші маңызын көрсетеді. Ең алдымен, тасымал шығындарын төмендету мәселесін атап өтсек. Қазақстан ішінде өндірілген ауыл шаруашылығы өнімдері елдің негізгі егіншілік өңірлерінен (Солтүстік Қазақстан, Ақмола, Қостанай облыстары) тұтынушыларға және экспорттық шекараларға дейін ұзақ жол жүреді. Көп жағдайда тасымал қашықтығы мыңдаған шақырыммен өлшенеді. Осы жолда жүк түріне байланысты әр көлік түрінің экономикалық тиімділігі әртүрлі: автокөлікпен 1000 км-ге бидай тасу өте қымбат, ал теміржолмен сол қашықтыққа неғұрлым арзан, бірақ теміржол ауылдағы егіс даласына бара алмайды. Сол себепті теміржол тасымалы мен автомобиль тасымалын дұрыс үйлестіру – ішкі логистиканың кілті. Жоғарыда айтылған 40%-ға дейінгі логистикалық шығындар (өнім бағасындағы) деңгейін төмендету үшін астықты негізгі магистраль бойымен теміржолға тиіп жіберіп, ферма басындағы бастапқы учаске мен соңғы дестинациядағы тарату учаскелерінде ғана автокөлікті пайдалану тиімді екені мәлімделген [3]. Бұл – классикалық интермодальды схема.

Қазақстанның экспорттық бағыттарын қарасақ, басты нарық – Орталық Азияға (Өзбекстан, Тәжікстан, Түрікменстан, Қырғызстан, Ауғанстан) жеткізу негізінен теміржол және автокөлік комбинациясымен жүреді. Мысалы, өзбек нарығына бидайдың басым бөлігі теміржол құрамаларымен барады, ал ұн автокөліктермен де тасымалданады. 2-суретте 2024/25 маркетингтік жылына болжанған астық экспортын аймақтар бойынша бөлу көрсетілген – мұнда дәстүрлі Орталық Азия нарығының үлесі шамамен үштен бір, ал жаңа алыс нарықтардың (Таяу Шығыс, Африка, Еуропа) да әрқайсысы шамамен 17%-дан болмақ деген үміт бар. Ескеретін жайт – Өзбекстан жеке категория ретінде бөлініп көрсетілген, себебі ол Қазақстан астық экспортының ең ірі бір нарығы (жекелеген жылдары жалпы экспорттың ~30%-ы). 2024/25 ж. болжамда әрқайсы 2 млн тоннадан Еуропа, Африка, Таяу Шығыс және Өзбекстанға тиесілі деп жоспарланған [8]. Қытайға шамамен 1 млн т, қалған Орталық Азия мен Ауғанстанға ~3 млн т бағытталуы мүмкін деп бағаланады (2-суреттегі үлес). Бұл экспорт бағыттарының әртүрлілігі интермодальды тасымал маршруттарының да сан алуандығын талап етеді. Мысалы, Африка немесе Еуропаға астық жеткізу үшін теңіз қатынасы міндетті.

Қазақстан астығы немесе ұны алдымен Қара теңізге немесе Балтық теңізіне дейін теміржолмен, содан соң теңізбен кемемен жеткізіледі. Балтық бағытында өнімді Ресей теміржолы арқылы Латвия/Литва порттарына тасу қажет (бұл жайғасымда қазір геосаяси жағдай күрделі). Альтернативтісі – Транскаспий маршруты: Қазақстан-Әзербайжан теміржол-фери желісі арқылы астық Баку немесе грузин порттарына жетіп, әрі қарай Қара теңізбен Түркия немесе Жерорта теңізі арқылы Африкаға шыға алады. Бұл жерде құрлық (теміржол) + теңіз интермодальды тасымалы орын алады. 2022-2023 жылдары бұл «Орта дәліз» арқылы Қазақстаннан 100 мыңдаған тонна астық жіберілгені тіркелді, алайда көлемі Ресей бағытынан аздау болды. Дегенмен, 2024 жылғы рекордтық өнім осы дәлізге сұранысты арттырды – Қытай, Түркия және Әзербайжан компаниялары Қазақстан астығын транзиттеуге қызығушылық танытуда. Үкімет Құрық портындағы

жаңа терминалдың қуатын толық пайдаланып, жылына 2 млн тоннаға дейін астық пароммен тасымалдауды көздеп отыр [8].



2-сурет. 2024/25 ж. болжанған астық экспортын аймақтар бойынша бөлу (Жалпы 12 млн т экспорт потенциалының үлестері) Өзбекстан және басқа Орталық Азия бағыты дәстүрлі нарық (шамамен 50%), ал Африка, Таяу Шығыс, Еуропа секілді алыс нарықтарға да жалпының жартысына жуығы бағытталуда.

Қытай бағыты – жеке ерекше тақырып. Қытай әлемнің ең ірі астық импорттаушыларының бірі, алайда Қазақстан бидайына қатаң фитосанитарлық талаптар қоятын және сауда келісімдері шектеулі болатын. Соңғы жылдары екі ел арасында келісімдер нәтижесінде белгілі бір мөлшерде Қазақстан астығы Қытайға экспорттала бастады (негізінен бидай, арпа және майлы дақылдар). Бұл экспорт теміржол арқылы контейнерлермен жүзеге асады. 2025 жылдың басында Қытайға 500 мың тонна құрамажем (мал азығы) экспортталғаны хабарланды – бұл алдыңғы жылдан 5,5 есе көп. Яғни, контейнерлік интермодальды тасымал (Қытайға баратын пойыздар құрамында) ауыл шаруашылығы жүктері үшін де пайдаланылуда. Контейнерге тиеу – интермодальды жүйеге табиғатынан сай, өйткені контейнерлерді кез келген көлікке ауыстыра беруге болады. Қазақстанның «Достық» және «Алтынкөл» шекара бекеттерінде құрғақ порттар бар, бұл контейнермен тасымал тиімділігін арттырады. Қытайға автокөлікпен тасу да бар, бірақ көлемі аз және ол да шекарада теміржолға қарағанда баяу. Сондықтан болашақта Қазақстан–Қытай арасындағы астық саудасы тек теміржолдық-интермодальды үлгіде (контейнермен жеткізіп, Қытай ішіндегі тарату желісіне қосу) өседі деп күтіледі. Жалпы, Қазақстан астық экспортында теміржол + теңіз және теміржол автокөлік комбинациялары негізгі интермодальды үлгі болып отыр. Бұл үлгілердің маңызын мына факторлар айқындайды:

1. Үлкен көлемді тиімді тасымалдау: бір жолғы жөнелтілім 50-60 вагондық пойыз (4-5 мың тонна) және кемеге теңізде 20-30 мың тонна тиелуі мүмкін. Мұндай көлемді тек автокөлікпен жеткізу мүмкін емес. Контейнерлік тасымал арқылы да жинақтау керек. Демек, теміржол мен теңізді кіріктіру экспорттық партияларды жинақтап, тиімді тасымалдауға жол ашады.

2. Транзиттік тәуелділікті азайту: Каспий арқылы шығу Ресей транзитіне балама, бұл санкциялық және геосаяси тәуекелдерді төмендетеді. Сол сияқты, Иран арқылы «Солтүстік–Оңтүстік» дәлізіне қосылу (теміржол+теңіз, Парсы шығанағына) Қазақстан астығын Оңтүстік Азия мен Таяу Шығысқа шығаруы мүмкін. 2022 жылы Иранға экспорт жанданып, 250 мың тонна арпа жөнелтілді– бұл бағыттағы интермодальды мүмкіндікті (Қазақстан–Түрікменстан теміржолы + Иран порттары) көрсетеді.

Логистикалық тізбекті толықтыру: Елдегі жүздеген шағын фермерлік шаруашылықтардан астық жинап, шетелге жеткізу – көп сатылы процесс. Интермодальды тәсіл осы процестің әр сатысын біріктіреді. Мысалы, қазір астықты фермерден сатып алып, элеваторда жинақтап, теміржолмен портқа жеткізіп, экспортқа шығарумен айналысатын мамандандырылған операторлар қалыптасып жатыр. «Астық Транс» сияқты компаниялар вагондарды қамтамасыз етіп, тасымалды ұйымдастырады. Болашақта логистикалық хабтар (мультимодальды орталықтар) құру жоспарлануда – онда жүктерді көлік түрлері арасында тиімді ауыстырып тиелетін болады.

Интермодальды тасымал тек астыққа ғана емес, басқа да аграрлық жүктерге маңызды. Мысалы, ет және көкөніс өнімдерін суытылған күйде жеткізу үшін суық тізбек логистикасы керек, онда автомобиль және әуе көлігін теміржол-тоңазытқыш контейнерлермен ұштастыру қарастырылуда. Қазіргі кезде бұның көлемі аз, бірақ болашақта ауыл шаруашылығының әртараптануына байланысты өсуі мүмкін.

Интермодальды тасымалды дамытудағы кедергілер және оларды жою жолдары

Қазақстанда интермодальды тасымалдауды жолға қою бірқатар құрылымдық кедергілерге тіреледі. Солардың бірі – инфрақұрылымның шектеулері. Әсіресе астық логистикасында элеваторлардың, терминалдардың тапшылығы және қолда барының техникалық жағдайы мәселе болып келеді [4]. Көптеген элеваторлар Кеңес дәуірінде салынған, жаңғыртуды қажет етеді, олардың теміржолға, порттарға қолжетімділігі әрқелкі. Жекелеген өңірлерде (мысалы, Батыс Қазақстанда) астық сақтайтын және ірі партия қалыптастыратын хабтар аз, сондықтан ол жақтың диқандары өнімін алыс солтүстіктегі элеваторларға тасуға мәжбүр. Бұл артық тасымал шығыны. Сондықтан өңірлік деңгейде арнайы маркетингтік инфрақұрылым – желілік, тораптық және порттық элеваторлар жүйесін дамыту – өнімді бүкіл жеткізу тізбегінің тиімділігін анықтайды [4]. Бұл бағытта 2010-жылдары қабылданған бірнеше бағдарлама болды, алайда толық іске асты деп айту қиын.

Екіншіден, вагон паркі мен тасымал жабдықтарының тозуы проблемасы бар. Теміржол паркіндегі астық тасығыш вагондардың орташа жасы үлкен, жинақы (hopper) вагондар мен контейнер платформалары саны шектеулі. Жүк вагондары тапшылығы жиі орын алады, әсіресе егін науқаны кезеңінде «пик» жүктемеде [4]. Мемлекеттік «Қазақстан темір жолы» компаниясы мен жеке меншік операторлар бұл түйткілді шешу үшін инвестицияларын көбейтуде, дегенмен қажеттілікті толық өтемейді. Гүлден Нұғмановалардың (т.б. зерттеушілердің) атап өткеніндей, жүк вагондарының парк

жаңаруын тездету, заманауи логистикалық IT жүйелер енгізу тасымал тиімділігін арттырудың алғышарты (мысалы, вагон айналымын бақылау, тиеу-түсіруді жылдам үйлестіру) [4].

Үшіншіден, тарифтік және нормативтік кедергілер бар. Теміржол тарифтері кейде жоғары болып, ішкі нарық пен экспорттың байланысын әлсіретеді деп саналады. Мысалы, ауыл шаруашылығы өндірушілеріне теміржол тарифінде жеңілдік болмаған жағдайларда олар алыс аудандарға өнім жіберуге қызықпай қалуы мүмкін. Қазіргі кезде астық пен ұн экспортына жеңілдікті тарифтер қарастырылған (транзиттік тарифке қарағанда айтарлықтай төмен, бұл белгілі бір деңгейде көмектеседі. Бірақ мәселе тарифте ғана емес, шекарадан өту процестерінің күрделілігі – құжат рәсімдеу, рұқсаттар алу, баж салығы мәселелері интермодальды тізбектің кідірісін туғызады. Осыны шешу үшін көрші елдермен тиісті келісімдер мен «жасыл дәліздер» жасау қажет. Мысалы, 2023 жылы Қазақстан мен Қытай арасында ауыл шаруашылығы өнімдерінің саудасын жеңілдетуге бағытталған хаттамаларға қол қойылды, бұл шекарадағы карантиндік тексеруді тездетуге ықпал етеді деп күтілуде.

Төртіншіден, менеджмент және үйлестіру мәселесі. Интермодальды тасымалдау табысты болуы үшін бүкіл тізбек бір орталықтан немесе өзара тығыз үйлестіріліп басқарылуы керек. Қазір Қазақстанда әр буын (шаруа – дайындаушы – тасымалдаушы – экспорттаушы) көбіне жеке әрекет етеді. Логистикалық қызметтер нарығы дамып келе жатса да, аграрлық секторда әлі де ұсақ шаруашылықтардың кооперацияға қабілетсіздігі байқалады. Бұл тасымалдау шығындарын ұлғайтады: әр фермер өз өнімін жеке шығарса, вагон толмай қалуы немесе жолда үзіліс болуы мүмкін. Шешімі – кооперативтер мен агрохолдингтер негізінде өнімді бірігіп сатуға шығару, яғни партияларды ірілендіру. Қазақстанда астық трейдерлері бұл функцияны ішінара атқарады, бірақ жергілікті жерлерде логистикалық кооперация тетіктерін (мысалы, қауымдастықтар арқылы) дамытуға әлеует бар.

Халықаралық тәжірибе көрсеткендей, интермодальды тасымалдың экономикалық қайтарымы жоғары болуы үшін көлік дәлізі экономикалық дәлізге айналуы тиіс. Яғни, жүк дәліздерінің бойында логистикалық қызметтер, өңдеу-сақтау кәсіпорындары дамып, қосымша құн тізбегі қалыптасқанда ғана толық тиімділікке қол жетеді. Қазақстанның көлік саясаты да дәл осыны көздейді: мысалы, Батыс Еуропа – Батыс Қытай дәлізін салғанда, оның бойында өнеркәсіптік аймақтар, қоймалар, сервистік орталықтар ашу жоспарланған [3]. Сол сияқты, «Нұрлы жол» бағдарламасы аясында құрылған құрғақ порт (Қорғастағы «KTZE – Хоргос» және Ақтау портындағы арнайы экономикалық аймақ) – интермодальды инфрақұрылымның элементтері. Интермодальды жүйенің тиімділігіне оннан астам фактор әсер етеді: инфрақұрылым сапасы, жоспарлау, нормативтік сәйкестік, тарифтік икемділік және технологиялық интеграция [11].

Интермодальды тасымалды дамыту бойынша ұсыныстар: Жоғарыда айтылған кедергілерді азайту және Қазақстанның аграрлық логистикасын жетілдіру үшін төмендегідей шаралар ұсынылады:

1. Логистикалық хабтар желісін құру: Астық өндірісі шоғырланған өңірлерде заманауи элеваторлар мен мультимодальды терминалдар салу қажет. Олар жол, теміржол қатынасымен ыңғайлы түйісуі және жылдам тиеу-түсіру жабдықтарымен қамтылуы тиіс. Мысалы, Солтүстік Қазақстан – Ақмола – Қостанай үшбұрышында халықаралық деңгейдегі астық хабы (тұқым тазалау, кептіру, сақтау, вагонға/контейнерге тиеу қызметтерімен)

ұйымдастырылса, фермерлер өнімін сол жерге жеткізіп, әрі қарай трейдерлер теміржолмен экспортқа жөнелтер еді. Бұл АҚШ-тағы ел ішіндегі терминалдардың қызметіне ұқсас модель.

2. Каспий және оңтүстік бағыттарды дамыту: Ақтау және Құрық порттарының астық өңдеу мүмкіндіктерін кеңейтіп, тұрақты фидерлік кемелер немесе паром желілерін субсидиялау қарастырылуы керек. Транскаспий бағытының тартымдылығын арттыру үшін тарифтік жеңілдіктер мен «бір терезе» қағидатын енгізу қажет (Әзербайжан, Грузия тараптарымен келісіп). Сондай-ақ Иран арқылы Парсы шығанағына шығу үшін Түрікменстан–Иран теміржолында жеңілдетілген өту келісімдері және ирандық Бендер-Аббас, Чабахар порттарымен әріптестік орнату керек. Бұл бағыт Қазақстанға Үндістан, Пәкістан сынды ірі нарықтарға жол ашуы мүмкін.

3. Контейнерлендіруді ынталандыру: Астық пен басқа да бұйымдарды контейнермен тасымалдауды қолдау маңызды. Контейнерлік тасымалдың артықшылығы – оларды кез келген көлікке артып, ұсақ партиялармен де жеткізуге болады. Қазірдің өзінде қытайлық CNPC компаниясы Қазақстан бидайын контейнермен Қытайға тасымалдауды бастаған. Осыны кеңейту үшін вагон-платформалар санын көбейту, жүк жөнелтушілерге контейнерлік жөнелтілімге жеңілдік беру шаралары қажет.

4. Цифрландыру және басқаруды жетілдіру: Интермодальды логистиканы тиімді жүргізу үшін жүк ағынын нақты уақыт режимінде бақылау, вагондар мен көлік құралдарының қозғалысын үйлестіру, шекарадан өту құжаттарын алдын ала электронды рәсімдеу сияқты IT шешімдер енгізу керек. «KTZ Express» секілді логистикалық операторлар өз платформаларын агроөндірушілерге бейімдеп, оларға тасымал брондау, қадағалау қызметтерін қолжетімді етуі тиіс. Интермодальды тасымал саласында сенсорлар, позициялау технологиялары мен веб-платформалар сияқты цифрлық шешімдер жүк қозғалысын нақты уақыт режимінде қадағалауға және көліктер арасындағы өзара әрекеттестікті оңтайландыруға мүмкіндік береді [11].

5. Халықаралық ынтымақтастық: Қазақстан халықаралық көлік ұйымдарымен (TRACECA, OSJD, т.б.) белсенді жұмыс істеп, көпжақты келісімдер арқылы тасымал рәсімдерін оңайлату керек. Мысалы, дүниежүзілік банктің «Логистика тиімділігі индексында» көрсеткіштерді жоғарылату үшін көрші елдермен шекара инфрақұрылымын жақсарту, бірыңғай талаптар қабылдау пайдалы. Сондай-ақ шетелдік инвестиция тарту арқылы жаңа логистикалық жобаларды іске асыру (мысалы, Қытайдың «Бір белдеу – бір жол» бастамасы аясында Қазақстан арқылы өтетін мультимодальды маршруттарды қаржыландыру) мүмкіндігін пайдалану керек.

Жоғарыда аталған шараларды іске асыру интермодальды тасымал гипотезасының дұрыстығын іс жүзінде дәлелдеуге көмектеседі – яғни, интеграцияланған көлік жүйесі аграрлық сектордың экспорттық әлеуетін арттыратынын көрсетеді.

Қорытынды

Қазақстанда интермодальды тасымалдау жүйесін дамыту – ауыл шаруашылығы өнімдерін ішкі және сыртқы нарықтарға тиімді жеткізудің шешуші факторына айналып отыр. Жүргізілген зерттеу бұл тезисті бірнеше қырынан дәлелдейді. Біріншіден, теориялық тұрғыдан интермодальды тасымалдың мәні жүкті бірнеше көлік түрінің ең тиімді қасиеттерін үйлестіре отырып тасымалдауда екені анықталды. Бұл

әсіресе аумақтары кең, өндіріс пен тұтыну нүктелері алыс орналасқан Қазақстан үшін өте өзекті.

Екіншіден, статистикалық деректерді талдау Қазақстанның астық өндірісі өзгермелі болғанымен, тасымал инфрақұрылымының шектеулері бар екенін көрсетті. Соңғы жылдардағы астық экспорты 7-10 млн тонна шамасында «қысылып» қалды, бұл ішкі логистикалық «тар жерлердің» әсері деуге болады. 1-кестеде көрсетілгендей, Қазақстан 2011 жылы 27 млн т астық өндірсе де, экспорт 15 млн тоннадан аспады. Ал 2022 жылғы жоғары өнім (22 млн т) кезінде экспорт 10,7 млн т-ға жетіп, рекорд жаңартты. Демек, өндіріс өссе де, оны өткізу тиісті тасымал жүйесіне тәуелді. Теміржолдың тасымалдау мүмкіндігі белгілі бір шекке ие, сондықтан балама бағыттар мен тәсілдер (теңіз жолы, контейнерлік тасымал) іске қосылуы қажет екені айқындалды.

Үшіншіден, интермодальды тасымалдың экономикалық тиімділігі нақты мысалдармен негізделді. Қазақстан жағдайында тасымал шығындары өнім бағасының 30-40%-ына жететіндігі анықталды, бұл түпкілікті бағаны қымбаттатып, бәсекеге қабілеттілікті төмендетеді. Интермодальды тәсіл – жүктің негізгі бөлігін теміржолмен, қалғанын автокөлікпен немесе теңізбен тасу – осындай шығындарды кемітуге мүмкіндік беретіні белгілі болды. АҚШ және Еуропа тәжірибесінен үйрене отырып, Қазақстан өз астығын Каспий теңізі арқылы экспорттау, өзен-кеме қатынасын дамыту арқылы тасымал тиімділігін арттыра алатыны талқыланды.

Төртіншіден, интермодальды тасымалды дамыту үшін шешілуі керек мәселелер айқындалды: инфрақұрылымды жаңарту (элеваторлар, порттар), вагон паркін көбейту, цифрлық логистика, көрші елдермен ынтымақтастық. Бұл мәселелерді шешу бойынша нақты ұсыныстар берілді (логистикалық хабтар құру, тариф жеңілдіктері, т.б.). Егер осы шаралар орындалса, Қазақстанның көлік дәліздері толыққанды логистикалық және экономикалық дәліздерге айналып, өңірлік дамытуға мультипликативті әсер ететіні күтіледі [3].

Зерттеу нәтижесінде бастапқы қойылған гипотеза расталды: интермодальды тасымалдау шешімдерін енгізу Қазақстанның аграрлық өнімдерін жеткізу тиімділігін шынында жақсарттады. Мысалы, 2025 жылдың басында теміржол арқылы астық тасымалының 49%-ға өсуі (рекордтық өнімге орай) және оның басым бөлігі экспортқа бағытталуы – интермодальды жүйенің (теміржол + теңіз/авто) сұранысқа ие екенін дәлелдейді. Орталық Азия нарығына астық пен ұн жеткізуде теміржол желісі шешуші роль атқарса, жаңа нарықтарға шығуда теңіз бағыттарын игеру маңызды болып тұр. Бұл өзгерістердің барлығы интеграцияланған тасымал жүйесін құрумен тікелей байланысты.

Қорыта айтқанда, Қазақстан үшін интермодальды тасымалдау – *логистикалық тиімділікке қол жеткізудің және жаһандық азық-түлік нарығындағы бәсекеде алда болудың кепілі*. Елдің көлік инфрақұрылымына соңғы жылдары салынған ірі инвестициялар (жаңа теміржол желілері, автожол дәліздері, порт кешендері) өз жемісін беруі үшін оларды өзара байланыстырып пайдалану қажет. Интермодальды жүйе – дәл сол байланыстырудың тетігі. Бұл тетікті дұрыс жұмыс істетіу Қазақстанның астық экспорты көлемін орта мерзімді болашақта 15 млн тонна және одан жоғары деңгейге көтеруге әлеуеті бар деп тұжырым жасауға болады. Әрі бұл тек сандық өсім емес, сапалық тұрғыда да тиімді тасымал құрылымын қалыптастыру болмақ. Интермодальды жүйелердің тұрақтылығы мен бейімделгіштігін арттыру жүк жеткізудің үзіліссіздігін қамтамасыз ету үшін маңызды болып табылады [13].

Алдағы уақытта жүргізілетін саясат пен бизнес шешімдері осы зерттеу ұсыныстарын ескерсе, Қазақстан Еуразиядағы басты аграрлық хабқа және көлік-логистикалық торабына айналу мақсатына бір қадам жақындайды. Бұл ауыл шаруашылығы өнімдерін интермодальды тасымалдау ғана емес, жалпы еліміздің көлік-логистика саласының тұрақты дамуына септігін тигізері сөзсіз.

Авторлардың қосқан үлесі.

Камысбаева А.Т - материалдарды жинау, алынған деректерді талдау және түсіндіру, жұмыстың негізгі мақсаты мен міндеттерін анықтау және тұжырымдау, қолжазбаның жобалық нұсқасын жасау, деректерді жинау, модельдеу, болжау және мақала жазу.

Д.З.Бекжанов- деректерді жинау, талдау, мәтін жазу.

Әдебиеттер тізімі

1. ResearchGate – Ғылыми зерттеу және жарияланымдар платформасы. – [Электронды ресурс]. – Қолжетімді: <https://www.researchgate.net> (қолжетімді күні: 13.05.2025).
2. The Astana Times. Kazakhstan's Agricultural Industry Shows Positive Growth Despite Pandemic // *The Astana Times*, 10.02.2021. – [Электронды ресурс]. – Қолжетімді: <https://astanatimes.com> (қолжетімді күні: 13.05.2025).
3. MDPI. Sustainability Journal – Ашық ғылыми журналдар базасы (Scopus). – [Электронды ресурс]. – Қолжетімді: <https://www.mdpi.com> (қолжетімді күні: 13.05.2025).
4. Revista Espacios – Логистика және экономика саласындағы халықаралық ғылыми журнал (Scopus). – [Электронды ресурс]. – Қолжетімді: <https://www.revistaespacios.com> (қолжетімді күні: 13.05.2025).
5. U.S. Wheat Associates. U.S. Wheat Export Logistics. – [Электронды ресурс]. – Қолжетімді: <https://www.uswheat.org> (қолжетімді күні: 13.05.2025).
6. Colab.ws. Multimodal Transport and Food Logistics in Europe. – [Электронды ресурс]. – Қолжетімді: <https://www.colab.ws> (қолжетімді күні: 13.05.2025).
7. Business Perspectives – Экономика, көлік және логистика бойынша ғылыми журналдар базасы (Scopus). – [Электронды ресурс]. – Қолжетімді: <https://www.businessperspectives.org> (қолжетімді күні: 13.05.2025).
8. Qazinform – Қазақстан жаңалықтар агенттігі. – [Электронды ресурс]. – Қолжетімді: <https://www.inform.kz> (қолжетімді күні: 13.05.2025).
9. Hou, Y., Chen, X. Performance measurement in intermodal freight transport systems: literature review and research agenda // *Research in Transportation Business & Management*. – 2022. – Vol. 43. – Article ID: 100736. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100736> (Scopus).
10. Salimova, M., Chen, Q. Factors influencing intermodal transport efficiency and sustainability // *Cogent Sustainability*. – 2022. – Vol. 4(1). – Article ID: 2050789. – DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2050789> (Scopus).
11. Salimova, M., Chen, Q. Factors influencing intermodal transport efficiency and sustainability // *Cogent Sustainability*. – 2022. – Vol. 4(1). – Article ID: 2050789. – DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2050789> (Scopus).

12. Gnap, J., Čamaj, J., Novák, F. Digitalization and Automation in Intermodal Freight Transport // *Logistics*. – 2022. – Vol. 2(1). – P. 23–34. – DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics2010003> (Scopus).
13. Yang, L., Xu, C. Evaluating the sustainability and resilience of an intermodal freight transport network // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2024. – Vol. 181. – Article ID: 103312. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103312> (Scopus).

А.Т.Камысбаева*, Д.З.Бекжанов

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

Интермодальные перевозки: сущность и значение

Аннотация. В данной научной обзорной статье анализируется сущность и значение интермодальных перевозок сельскохозяйственной продукции в Казахстане. Исследование будет сосредоточено на практике комбинированного использования нескольких видов транспорта (железнодорожного, автомобильного, морского) в поставках зерна и другой аграрной продукции в Казахстане. Выявляется современное состояние интермодальных перевозок в аграрной логистике Казахстана, основные особенности и проблемы, описывается место международного опыта в их решении. В результате исследования было показано, что развитие интермодальных систем повышает эффективность транспортировки сельскохозяйственной продукции и облегчает ее доставку на внутренний и внешний рынки. В статье даны конкретные ссылки не менее чем на 5 статей базы данных Scopus по теме, а также представлены две таблицы и две диаграммы на основе данных транспортировки аграрной продукции в Казахстане. Результаты исследования дают выводы и рекомендации по совершенствованию логистического потенциала отечественного аграрного сектора и развитию инфраструктуры интермодальных перевозок.

Ключевые слова: интермодальные перевозки, логистика, сельскохозяйственная продукция, транспортная инфраструктура, Казахстан; аграрный экспорт, мультимодальный транспорт, эффективность перевозок.

A.Kamysbaeva, D. Bekzhanov

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

Intermodal transportation: essence and significance

Abstract. This scientific review article analyzes the essence and significance of intermodal transportation of agricultural products in Kazakhstan. The study will focus on the practice of combined use of several modes of transport (rail, road, sea) in the supply of grain and other agricultural products in Kazakhstan. The article identifies the current state of intermodal transportation in agricultural logistics in Kazakhstan, the main features and problems, and describes the place of international experience in their solution. As a result of the study, it was shown that the development of intermodal systems increases the efficiency of transportation of

agricultural products and facilitates their delivery to domestic and foreign markets. The article provides specific links to at least 5 Scopus database articles on the topic, as well as two tables and two diagrams based on agricultural transportation data in Kazakhstan. The results of the study provide conclusions and recommendations for improving the logistics potential of the domestic agricultural sector and developing the infrastructure of intermodal transportation.

Keywords: intermodal transportation; logistics; agricultural products; transport infrastructure; Kazakhstan; agricultural exports; multimodal transport; transportation efficiency

References

1. ResearchGate – Gylym zertteu zhane zhariyalanymdar platformasi. – [Electronic resource]. – Welcome: <https://www.researchgate.net> (timid kuni: 05/13/2025).
2. The Astana Times. Kazakhstan's Agricultural Industry Shows Positive Growth Despite Pandemic // The Astana Times, 02/10/2021. – [Electronic resource]. – Welcome: <https://astanatimes.com> (Date: 05/13/2025).
3. MDPI. Sustainability Journal – Ashyk gylym journaldar bazasy (Scopus). – [Electronic resource]. – Welcome: <https://www.mdpi.com> (timid kuni: 05/13/2025).
4. Revista Espacios – Logistics zhane economics salasyndagi halykaralyk gylym magazine (Scopus). – [Electronic resource]. – Welcome to: <https://www.revistaespacios.com> (Timmy kuni: 05/13/2025).
5. U.S. Wheat Associates. U.S. Wheat Export Logistics. – [Electronic resource]. – Welcome to: <https://www.uswheat.org> (Timid kuni: 05/13/2025).
6. Colab.ws Multimodal Transport and Food Logistics in Europe. – [Electronic resource]. – Welcome to: <https://www.colab.ws> (timid kuni: 05/13/2025).
7. Business Perspectives – Economics, kol zhane logistics boyynsha gylym journaldar bazasy (Scopus). – [Electronic resource]. – Welcome: <https://www.businessperspectives.org> (date: 05/13/2025).
8. Qazinform – Kazakhstan zhanyktar agency. – [Electronic resource]. – Welcome: <https://www.inform.kz> (timid kuni: 05/13/2025).
9. Hou, Y., Chen, X. Performance measurement in intermodal freight transport systems: literature review and research agenda // Research in Transportation Business & Management. – 2022. – Vol. 43. – Article ID: 100736. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100736> (Scopus).
10. Salimova, M., Chen, Q. Factors influencing intermodal transport efficiency and sustainability // Cogent Sustainability. – 2022. – Vol. 4(1). – Article ID: 2050789. – DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2050789> (Scopus).
11. Salimova, M., Chen, Q. Factors influencing intermodal transport efficiency and sustainability // Cogent Sustainability. – 2022. – Vol. 4(1). – Article ID: 2050789. – DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2050789> (Scopus).
12. Gnap, J., Čamaj, J., Novák, F. Digitalization and Automation in Intermodal Freight Transport // Logistics. – 2022. – Vol. 2(1). – P. 23–34. – DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics2010003> (Scopus).
13. Yang, L., Xu, C. Evaluating the sustainability and resilience of an intermodal freight transport network // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2024. – Vol. 181. – Article ID: 103312. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103312> (Scopus).

Сведения об авторах:

Камысбаева Айжан Талгатовна – автор для корреспонденции, докторант Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, 050013, Алматы, Казахстан.

Бекжанов Динар Заркумович - сеньор-лектор, к.т.н. Костанайский инженерно-экономический университет имени М. Дулатова

Камысбаева Айжан Талгатовна – хат-хабар авторы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университетінің докторанты, Сәтбаев көшесі, 22, 050013, Алматы, Қазақстан.

Бекжанов Динар Заркумович-сеньор-лектор, т. ғ. к. М. Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті

Kamysbaeva Aizhan- Corresponding author, PhD student, Satbayev University, 22 Satpaev str., 050013, Almaty, Kazakhstan (Kamysbayeva.A@stud.satbayev.university)

Bekzhanov Dinar -senior lecturer, candidate of technical sciences, Kostanay Engineering and economic university named after M. Dulatov



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 55.13.99
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-83-95>

Цилиндрлік бөлшекті 3d басып шығару үшін аз инвестициямен WAAM платформасын пайдалану мүмкіндігін зерттеу

Қ.Е Кудиярбек^{1*} , Е.З.Нұғман^{1,2} , А.Қ. Мустафа^{1,2} 
М.Қ. Сағынтай^{1,2} , И.М. Дюсебаев¹ 

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
Алматы қ., Қазақстан

²TOO "RnD Center", Алматы, Қазақстан

*E mail: kudiyarbek.k@gmail.com, e.nugman@satbayev.university,
a.mustafa@satbayev.university, skmuchagali-2009@mail.ru, nomad.i.m.13@mail.ru*

Аңдатпа. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) - бұл доғалық дәнекерлеу процесіне негізделген металл аддитивті өндіріс технологиясы, ол сымды электродты балқыту арқылы қабаттап металл бөлшектерді қалыптастыруға мүмкіндік береді. Заманауи зерттеудің басым бөлігі роботталған дәнекерлеу жүйесін пайдаланады. Бұл зерттеуде аз инвестициялы және қарапайым конфигурация негізінде құрастырылған WAAM жүйесін қолданып, цилиндрлік бөлшектерді жасаудың мүмкіндігі зерттелді. Құрылғы ретінде айналмалы үстел мен тік бағыттағы Z-ось қозғалыс модулімен үйлесімі арқылы жүзеге асырылды. Құю процесі GMAW (Gas Metal Arc Welding) әдісімен жасалынды. Сымды электрод ретінде нарықта жиі кездесетін ER70S-6 аз көміртекті болат қолданылды. Және 100% аргон қорғаныш газын пайдалану арқылы жүргізілді. Басылып шыққан цилиндрлік бөлшек кесіліп, ажарлау-жылтыратудан кейін микроскоп арқылы микроқұрылымдық талдау жүргізілді. Микроқұрылымда дәндер ұсақ, изотропты формада таралған, ал қабатаралық шекараларда ақаулар мен тотығу іздері байқалмады. Бұл жылудың біркелкі бөлінгенін және қорғаныш ортаның дұрыс таңдалғанын көрсетті. Алынған нәтижелер қарапайым WAAM жүйесін қолдана отырып, жоғары сапалы металл компоненттерін жасауға болатынын және бұл әдістің шағын өндірістер мен зертханалар үшін қолжетімді шешім бола алатынын дәлелдейді.

Түйін сөздер: WAAM технологиясы, көміртекті болат, дәнекерлеу параметрлері, цилиндрлік бөлшек, микроқұрылым

Түсті 05.06.2025. Жөнделді 10.10.2025. Мақұлданды 16.10.2025. Онлайн қолжетімді 30.12.2025

* хат-хабар үшін автор

Кіріспе

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) - сымды балқытып, қабаттап металл бұйымдарын жасауға негізделген аддитивті технология [1]. Бұл әдіс ұнтаққа негізделген Selective Laser Melting (SLM) немесе Electron Beam Melting (EBM) сияқты күрделі технологияларға қарағанда арзанырақ [2,3], өнімділігі жоғары [4]. WAAM доғалы дәнекерлеу технологиясына негізделген және өндірістік масштабтағы бөлшектерді жасауға мүмкіндік береді [5,6].

Алайда WAAM-ға қатысты қазіргі зерттеулердің басым бөлігі күрделі және қымбат роботтандырылған жүйелерді пайдалануға негізделген [3]. Күрделі пішінді бөлшектерді жасау үшін көп ості роботтарсыз, үш ості жүйелермен де жұмыс істеуге болады [7]. Цилиндрлік бөлшекті дайындау үшін тек айналмалы үстел мен екі ось жеткілікті [8]. Мұндай қарапайым конфигурация арқылы өндіріс шығынын едәуір төмендете отырып, қабат сапасы жағынан бәсекеге қабілетті нәтижеге қол жеткізуге болады. Қарапайым конфигурация WAAM технологиясын аз шығынмен шағын және орта өндіріс орындарына, ғылыми зертханаларға және жөндеу учаскелеріне енгізу өзекті әрі маңызды болып табылады [9].

Осындай қарапайым конфигурациялық жүйемен алынған қабаттардың сапасын жан-жақты бағалау үшін микроқұрылымдық зерттеу ерекше маңызға ие [10]. Микроқұрылымдық талдау қабатаралық байланыстың сапасын, дәннің өсу бағытын, кеуектердің түзілуін және басқа да ықтимал ақаулардың бар жоғын көрсетеді [11]. Сондықтан бұл жұмыста қарапайым WAAM конфигурациясымен цилиндрлік үлгілер жасалынып, олардың микроқұрылымы зерттеледі. Бұл өз кезегінде тиімділігі жоғары әрі арзан өндірістік шешімдерді негіздеуге мүмкіндік береді.

Әдіснама

Қабаттарды құю үшін диаметрі 0.8 мм ER70S-6 маркалы дәнекерлеу сымы пайдаланылды. 1- кестеде AWS A5.18 стандарты бойынша сымының химиялық құрамы көрсетілген.

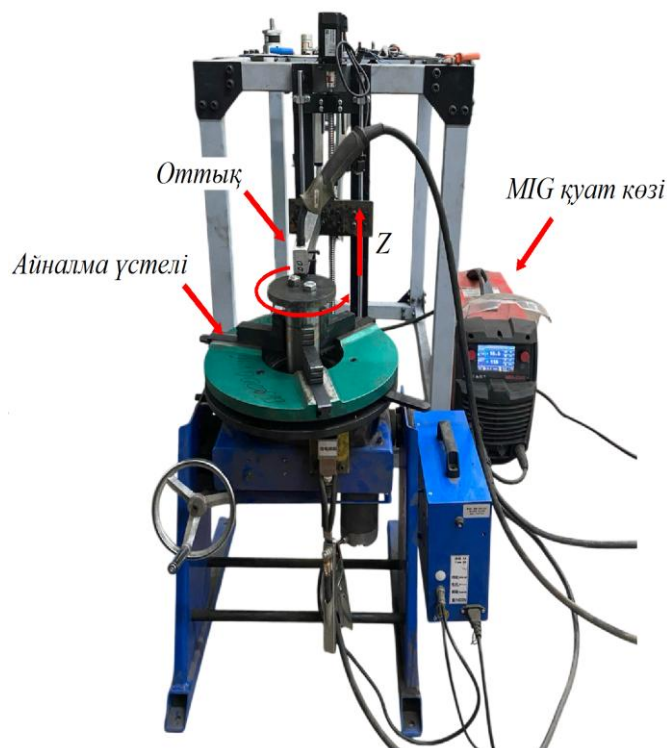
1-кесте. ER70S-6 сымының химиялық құрамы (массалық үлесі, %) [12]

Элемент	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
Құрамы	0.06-0.15	1.40-1.85	0.8-1.15	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15	Қал.

Бұл зерттеуде қолданылған WAAM жүйесі қарапайым әрі үнемді конфигурацияға негізделді. Жүйе айналмалы үстел және тік бағыттағы Z-ось қозғалыс модулімен жабдықталған. Жетек ретінде қадамдық қозғалтқыш қолданылды (1 сурет). Айналмалы үстелге субстрат бекітілді, субстрат диаметрі Ø140 мм және қалыңдығы 12 мм болатын аз көміртекті болат дайындама қолданылды. Z-осі бойымен оттық орнатылды. Құю процесі GMAW (Magnetta MIG-220S) аппаратымен жүргізілді. Қорғаныш газ ретінде 100% аргон қолданылды. Аргон инертті газ болғандықтан, ол доға аймағында тотығуды азайтып, балқу тұрақтылығын арттырады және кеуек санын азайтады [13]. Әсіресе аз көміртекті

болаттарды басу кезінде бұл маңызды[14].

Негізгі дәнекерлеу параметрлері 2-кестеде көрсетілген. Қабат пен шүмек арақашықтығы 7 мм-ге тең болды. Құйылған цилиндрлік қабырға 10 қабаттан тұрды. Қабат қалыңдығы 5 мм, биіктігі 3 мм, құйылған цилиндр диаметрі Ø115 мм, цилиндр биіктігі 30 мм (2-сурет).



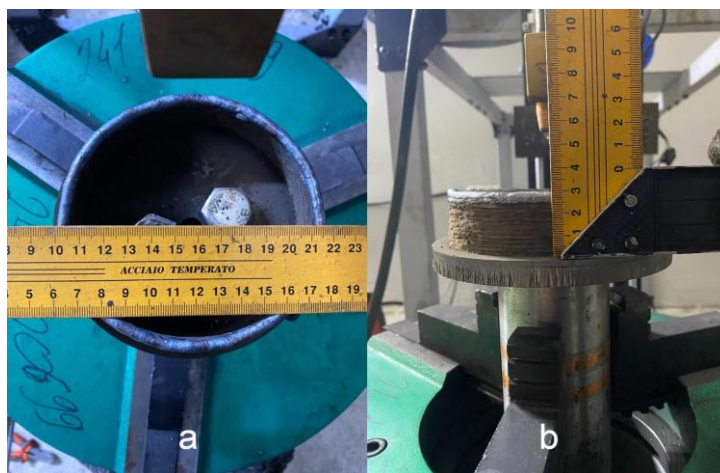
1-сурет. Өндіру үшін пайдаланылған GMAW-WAAM платформасы

Үлгі бөлме температурасында ауада суытылды.

2-кесте. Дәнекерлеу параметрлері (GMAW-MIG процесі)

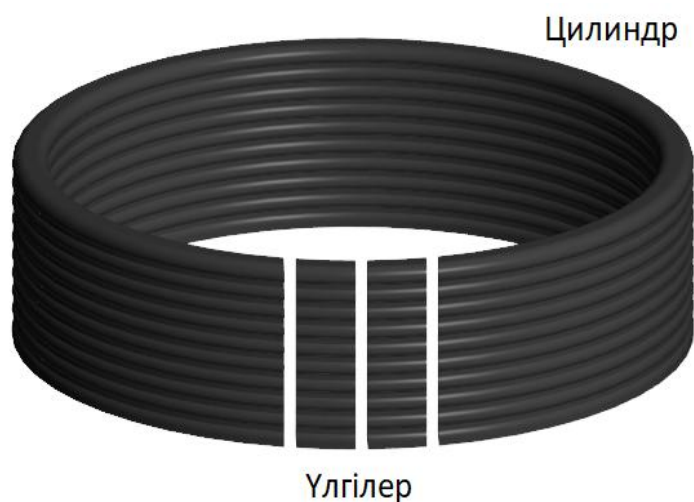
Параметр	Мәні	Бірлігі
Доғалық ток	119	А
Доғалық кернеу	18.3	В
Сымды беру жылдамдығы	6.7	м/мин
Қабат құю жылдамдығы	360	мм/мин
Субстраттың айналу жылдамдығы	1	айн/мин

Микроструктуралық зерттеу жүргізу үшін үлгі цилиндрлік қабырғадан тік бағытта сектор түрінде кесіліп алынды (3-сурет). Зерттеу үлгісі цилиндрдің төменгі бөлігінен жоғарғы жағына дейінгі қабаттарды қамтыды, бұл термиялық әсер мен құрылымдық өзгерістердің биіктік бойынша таралуын бақылауға мүмкіндік берді. Микроструктуралық зерттеу WAAM әдісімен дайындалған цилиндрлік бөлшектерден алынған металлографиялық шлифтерде жүргізілді.



2-сурет. Басып шыққан цилиндрлік компонент: а) үстінен қарағандағы көрініс б) алдынан қарағандағы көрініс

Үлгілер алдымен механикалық әдіспен тік қимада кесіліп, кейін Buehler EcoMet автоматтандырылған ажарлау-жылтырату жүйесінде стандартты металлографиялық дайындық протоколына сәйкес өңделді (ASTM E3-11)[15]. Алдымен әртүрлі gritті SiC қағаздарымен, P320–1200 бірізділікпен ажарланып, кейін алмаз пасталары көмегімен $9\text{ }\mu\text{m} \rightarrow 3\text{ }\mu\text{m} \rightarrow 1\text{ }\mu\text{m}$ -ге жылтыратылды. Жылтыратылған беттер HCl ерітіндісінде химиялық өңдеуден өтті, бұл феррит-перлит фазаларын, қабатаралық шекараларды айқын көруге мүмкіндік берді.



3-сурет. Зерттеуге дайын үлгі

Зерттеу Leica DMi8 инверттелген оптикалық микроскопында 50–1000× үлкейту ауқымында жүргізілді. Құрылымды жалпы сипаттау үшін әр қабат аймағынан көлденең және тік бағытта шлифтер алынды. 50× үлкейту – макроақауларды анықтау үшін, 100×–200× үлкейту – дән бағыты мен шекараларын бағалау үшін, 500×–1000× үлкейту – перлит пен ферриттің морфологиясын және микро фазалық қатынасты анықтау үшін қолданылды. Анализ барысында дән түзілу бағыты, қабаттар арасындағы шекаралар, фазалық құрылым (феррит-перлит), ықтимал ақаулар зерттелді.

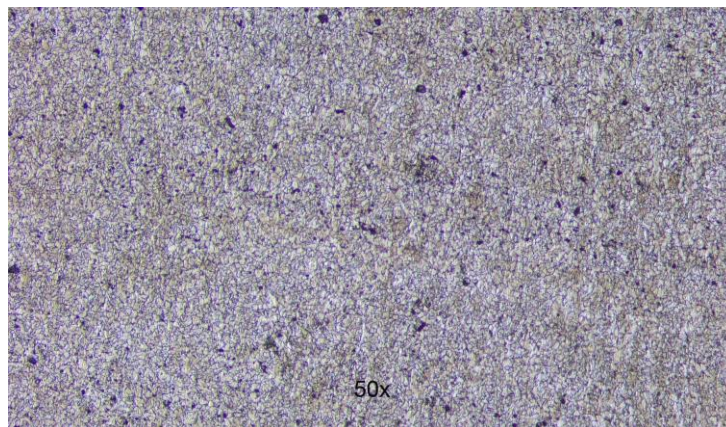
Нәтижелер мен талқылау

50× үлкейту (4-сурет) кезінде зерттелген үлгіде макроақаулар мен толық балқымау аймақтары байқалмады. Бұл қабатаралық металлургиялық байланыстың толық және сапалы жүзеге асқанын дәлелдейді. Қабаттардың арасындағы шекаралар визуалды түрде ажыратылғанымен, құрылым үздіксіз және біртекті болғаны байқалды.

100×–200× үлкейту (5-сурет) ауқымында жүргізілген бақылау барысында дәндердің шекаралары нақты көрінді. Дәндер бір-бірімен тығыз орналасқан, ұсақ әрі көпбұрышты пішінге ие. Дән түзілу бағыты негізінен изотропты, яғни қабат биіктігі бойынша бағытталмаған, бұл жылу енгізудің бірқалыпты және айналмалы WAAM конфигурациясымен жақсы басқарылғанын көрсетеді.

500×–1000× үлкейту (6-сурет) деңгейінде феррит пен перлиттің фазалық құрылымы айқындалды. Феррит матрицасында ұсақ перлит аралшалары шашыранды түрде таралған. Перлиттің мөлшері аз, бірақ жеткілікті түрде байқалады. Екі фазаның арасындағы шекаралар анық және контрастылы. Фазалар арасында үздіксіз өту байқалмайды, яғни кристалдану мен салқындау режимі жақсы бақыланған.

Жалпы алғанда, алынған құрылым біркелкі, тығыз және ақаусыз, дәндер арасындағы шекаралар айқын, ал феррит-перлит фазалық арақатынасы төмен көміртекті болатқа тән тепе-тең құрылымды көрсетеді. Бұл WAAM процесінің тұрақты орындалғанын және өңделген аймақтарда құрылымдық бұзылыстардың болмағанын растайды.

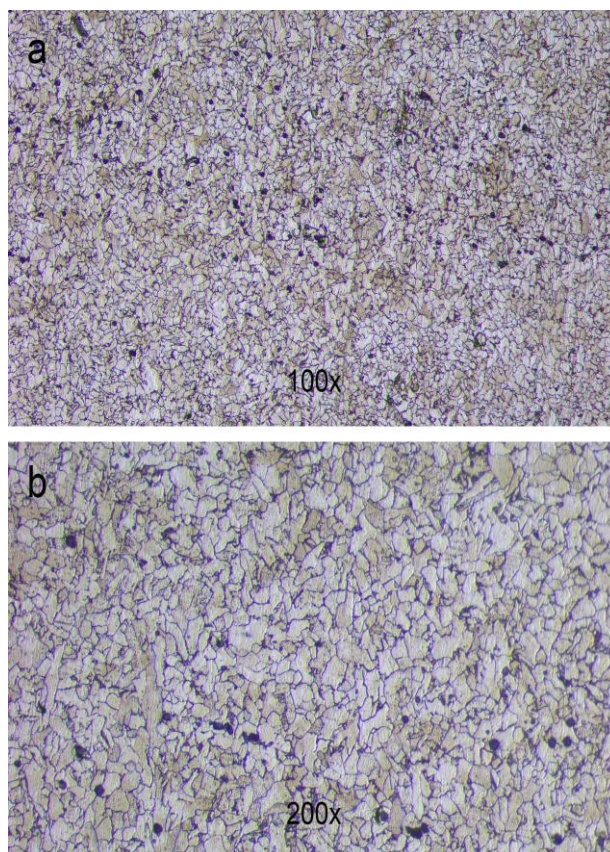


4-сурет. Микроқұрылым: 50× үлкейту

Bellamkonda және әріптестерінің (2021) [16] зерттеуінде WAAM арқылы алынған көміртекті болат компоненттерінде қабаттар арасындағы бағытталған дән өсуі байқалып, төменгі қабаттарда жылу жинақталуынан дәндердің өсуі тіркелген болатын. Ал біздің

жағдайда әр қабат аймағында дәндер ұсақ әрі изотропты пішінде таралған, бұл айналмалы үстел конфигурациясының термиялық жүктемені тең бөлуді қамтамасыз еткенін көрсетеді.

Сонымен қатар, Т. Роп және т.б. (2019) [4] зерттеулерінде WAAM әдісімен алынған төмен көміртекті болат құрылымында тотығу және кірме фазалардың болу ықтималдығы көрсетілген. Ал біз қолданған 100% аргон атмосферасы бұл факторларды тиімді түрде басып, шөгу мен тотығу өнімдерінің пайда болуын болдырмады. Бұл біздің жағдайдағы қорғаныш газдың тиімді таңдалғанын дәлелдейді

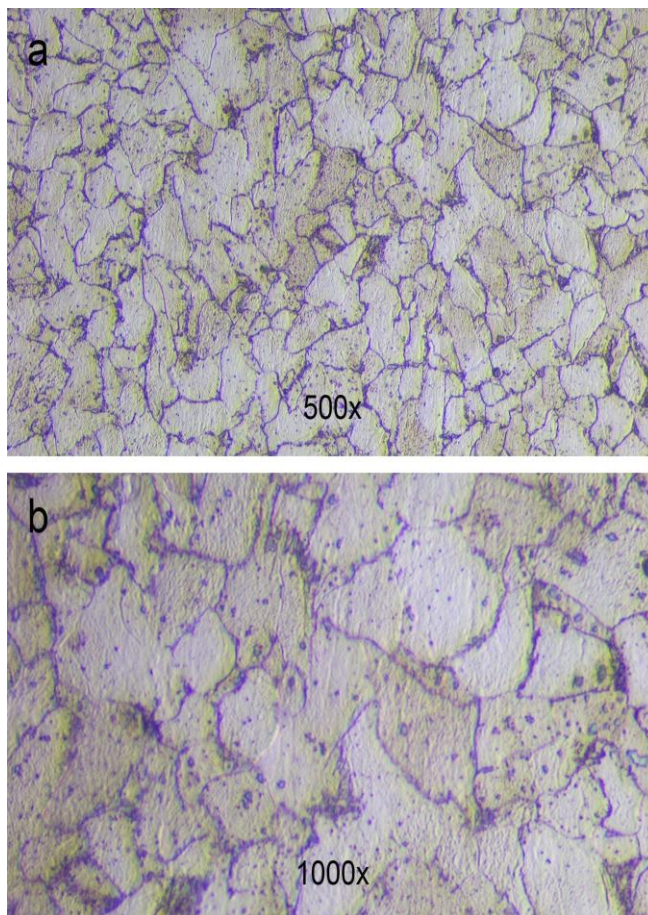


5-сурет.Микроқұрылым: а)100х үлкейту б)200х үлкейту

Алынған нәтижелер өнеркәсіптік роботтар мен жоғары класты қуатты дәнекерлеу көздерімен [4,16] жүргізілген зерттеулермен бәсекелесе алатын деңгейде болды. Жалпы, алынған микроструктуралық нәтижелер басқа зерттеулермен салыстырғанда жоғары сапалы және біркелкі құрылымның қалыптасқанын дәлелдейді. Бұрынғы әдебиеттерде келтірілген кейбір WAAM жұмыстарында қабатаралық ақаулар мен дәндердің өсуі жылу жинақталуына және біркелкі емес энергия енгізуге байланысты байқалса[17,18], бұл жұмыста мұндай құбылыстар тіркелген жоқ. Бұл өз кезегінде қолданылған конфигурацияның тиімділігін көрсетеді.

Жалпы, бұл зерттеу ресурстары шектеулі ортада – шағын өндіріс орындарында, зерттеу институттарында және білім беру мекемелерінде қолдануға болатын модульдік WAAM жүйелерін дамытудың өзектілігін көрсетеді. Жоғары инвестиция мен инженерлік

күрделілікке байланысты бұған дейін қолжетімсіз болған WAAM технологиясын кеңінен енгізуге жол ашады.



6-сурет. Микроқұрылым: а) 500× үлкейту б) 1000× үлкейту

Қорытынды

Осы уақытқа дейінгі WAAM зерттеулердің басым бөлігі күрделі және көп инвестиция қажет ететін қымбат роботтар қолданылды. Бұл зерттеуде аз инвестициямен, қарапайым WAAM конфигурациясын қолданып, 3d цилиндрлік бөлшектерді басу тиімділігі зерттелді. Осындай қарапайым конфигурациялық мүмкіндігін бағалау үшін микроқұрылымдық зерттеу маңызды. Айнаlmалы үстел мен тік бағыттағы Z-ось қозғалыс модулімен үйлесімі арқылы сапалы цилиндрлік бөлшек алынды. Сынаманы микроқұрылымын зерттеуде: 50× үлкейтуде құрылымы үздіксіз және біркелкі екені байқалды және макроақаулар, толық балқымау аймақтары байқалмады, бұл металлургиялық байланыстың сапасын көрсетті. 100×–200× үлкейтуде дәндердің ұсақ, көпбұрышты әрі изотропты таралғаны анықталды, бұл жылу біркелкі бөлінгенін және қорғаныш газдың тиімді таңдалғанын көрсетті. Ал 500×–1000× үлкейтуде феррит матрицасындағы перлит аралшалары анық көрініп, фазалық құрылымның контрастылы әрі тұрақты екені байқалды. Нәтижесінде металл бөлшектерді аддитивті әдіспен аз шығынмен жасауға болатынын және таңдалған

конфигурацияның тиімділігі дәлелденді. Бұл WAAM технологиясын шағын өндіріс орындарында, оқу және зерттеу мекемелерінде қолдануға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бұл жұмыс алдағы зерттеулерге негіз болады. WAAM технологиясын қолжетімді етіп, оны өндірістік кәсіпорындарға енгізуге жол ашады.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

ЖТН АР23487120 «Әскери мақсатта қолданылатын цилиндр тәріздес бөлшектерді жасау технологиясын әзірлеу»

Авторлардың қосқан үлесі

Кудиярбек Қ.Е. – мақала тақырыбын ұсынды, зерттеу концепциясын әзірледі, эксперимент жүргізді және мақаланың алғашқы нұсқасын жазды.

Нұғман Е.З. – әдеби шолу жүргізіп, нәтижелерді талдауға қатысты, мақаланың құрылымын жетілдірді.

Мустафа А.Қ. – қолданылған әдістерді таңдады және әдістемелік бөлімді жазуға атсалысты.

Сағынтай М.Қ. – зерттеу нәтижелерін интерпретациялады және техникалық суреттер мен кестелерді дайындады.

Дюсебаев И.М. – мақаланың ғылыми редакциясын жүргізді және соңғы нұсқасын бекітуге қатысты.

Әдебиеттер тізімі

1. Alaboudi S.F. The innovation in wire arc additive manufacturing (WAAM): A review // Materials Research Proceedings. – 2023. – Vol. 31. – P. 522. – DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644902592-54>. - ағылшын тіліндегі журнал
2. Navarro M., Matar A., Diltemiz S.F., Eshraghi M. Development of a low-cost wire arc additive manufacturing system // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 6, № 1. – P. 3. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6010003>. - ағылшын тіліндегі журнал
3. Knezović N., Topić A. Wire and arc additive manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2018. – Vol. 65. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90893-9_7. - конференция материалдары
4. Ron T., Levy G.K., Dolev O. et al. Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process // Metals. – 2019. – Vol. 9. – Article 888. – DOI: <https://doi.org/10.3390/met9080888>. - ағылшын тіліндегі журнал
5. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering. – 2021. – Vol. 13. – Article 100330. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>. - ағылшын тіліндегі журнал
6. Shah A.A., Aliyev R., Zeidler H., Krinke S. A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 97. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7030097>. - ағылшын тіліндегі журнал
7. Nagamatsu H., Sasahara H., Mitsutake Y., Hamamoto T. Development of a cooperative

- system for wire and arc additive manufacturing and machining // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 31. – Article 100896. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100896>. - ағылшын тіліндегі журнал
8. Lockett H., Ding J., Williams S., Martina F. Design for wire + arc additive manufacture: design rules and build orientation selection // Journal of Engineering Design. – 2017. – Vol. 28. – P. 568. – DOI: <https://doi.org/10.1080/09544828.2017.1365826>. - ағылшын тіліндегі журнал
9. Khan A.U., Madhukar Y.K. An economic design and development of the wire arc additive manufacturing setup // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 91. – P. 182. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.166>. - ағылшын тіліндегі журнал
10. Kumar N., Bhavsar H., Mahesh P.V.S. et al. Wire arc additive manufacturing – a revolutionary method in additive manufacturing // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 285. – Article 126144. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126144>. - ағылшын тіліндегі журнал
11. Wang J., Zhu K., Zhang W. et al. Microstructural and defect evolution during WAAM resulting in mechanical property differences for AA5356 component // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 22. – P. 982. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.116>. - ағылшын тіліндегі журнал
12. ER70S-6 Carbon Steel Welding Wire // Technical Specification Sheet. – The Harris Products Group, A Lincoln Electric Company. – Mason, OH, USA, 2008. – [Электрон. ресурс] – URL: <https://www.harrisproductsgroup.com/en/>. - техникалық сипаттама
13. Rao Z., Liao S., Tsai H.-L. Effects of shielding gas compositions on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 107. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3291121>. - ағылшын тіліндегі журнал
14. Purwaningrum Y., Triyono T., Pu M., Alfariz F. Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding (GMAW) of low carbon steel (LR Grade A) // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 705. – P. 250. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.705.250>. - ағылшын тіліндегі журнал
15. ASTM E3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. – ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011. – [Электрон. ресурс] – URL: <https://www.astm.org/e0003-11.html>. - стандарт
16. Bellamkonda P.N., Malarvizhi S., Balasubramanian V. Mechanical properties of wire arc additive manufactured carbon steel cylindrical component made by gas metal arc welding process // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2021. – Vol. 30. – P. 188. – DOI: <https://doi.org/10.1515/jmbm-2021-0019>. - ағылшын тіліндегі журнал
17. Cunningham C., Flynn J.M., Shokrani A. et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 22. – P. 672. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>. - ағылшын тіліндегі журнал
18. Tonelli L., Sola R., Laghi V. et al. Influence of interlayer forced air cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured 304L austenitic stainless steel // Steel Research International. – 2021. – Vol. 92. – DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202100175>. - ағылшын тіліндегі журнал

Қ.Е. Кудиярбек*¹, Е.З. Нұғман^{1,2}, А.Қ. Мустафа^{1,2}, М.Қ. Сағынтай^{1,2}, И.М. Дюсебаев¹

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

²ТОО "RnD Center", г.Алматы, Казахстан

Изучение возможности использования платформы WAAM для 3D-печати цилиндрической детали с минимальными инвестициями

Аннотация. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) - это технология аддитивного производства металлов, основанная на процессе дуговой сварки, которая позволяет формировать металлические детали слоями путем плавления проволоочного электрода. В подавляющем большинстве современных исследований используется роботизированная система сварки. В этом исследовании была изучена возможность изготовления цилиндрических деталей с использованием системы WAAM, построенной на основе низкоинвестиционной и простой конфигурации. В качестве устройства реализовано сочетание поворотного стола и вертикального Z-осевого модуля движения. Процесс литья производился методом GMAW (Gas Metal Arc Welding). В качестве проводного электрода использовалась распространенная низкоуглеродистая сталь ER70S-6. И 100% аргон проводился с использованием защитного газа. Вырезана цилиндрическая деталь, после шлифовки-полировки проведен микроструктурный анализ под микроскопом. В микроструктуре зерна распределены в мелкой изотропной форме, а на межслойных границах не наблюдалось дефектов и следов окисления. Это показало равномерное распределение тепла и правильный выбор защитной среды. Полученные результаты доказывают, что с помощью простой системы WAAM можно создавать высококачественные металлические компоненты и что этот метод может быть доступным решением для небольших производств и лабораторий.

Ключевые слова: Технология WAAM, углеродистая сталь, параметры сварки, цилиндрическая деталь, микроструктура

K.E.Kudiyarbek^{1*}, Y.Z.Nugman^{1,2}, A.K.Mustafa^{1,2}, M.K.Sagyntay^{1,2}, I.M.Dyussebayev¹

¹Satbayev university, Almaty city, Kazakhstan

²LLP «RnD Center», Almaty, Republic of Kazakhstan

Exploring the possibility of using the WAAM platform for 3D printing of cylindrical parts with minimal investment

Abstract. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is an additive manufacturing technology for metals based on the arc welding process, which allows metal parts to be formed in layers by melting a wire electrode. The vast majority of modern studies use a robotic welding system. This study investigated the possibility of manufacturing cylindrical parts using a WAAM system based on a low-investment and simple configuration. The device implemented a combination of a rotary table and a vertical Z-axis motion module. The casting process was performed using the GMAW (Gas Metal Arc Welding) method. Common low-carbon steel ER70S-6 was used as the wire electrode, and 100% argon was used as the shielding gas. A cylindrical part was cut out, and after

grinding and polishing, a microstructural analysis was performed under a microscope. In the microstructure, the grains are distributed in a fine isotropic form, and no defects or traces of oxidation were observed at the interlayer boundaries. This showed uniform heat distribution and the correct choice of protective environment. The results obtained prove that high-quality metal components can be created using a simple WAAM system and that this method can be an affordable solution for small-scale production and laboratories.

Keywords: WAAM technology, carbon steel, welding parameters, cylindrical part, microstructure

References

1. Alaboudi S.F. The innovation in wire arc additive manufacturing (WAAM): A review // Materials Research Proceedings. – 2023. – Vol. 31. – P. 522. – DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644902592-54>.
2. Navarro M., Matar A., Diltemiz S.F., Eshraghi M. Development of a low-cost wire arc additive manufacturing system // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 6, № 1. – P. 3. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6010003>.
3. Knezović N., Topić A. Wire and arc additive manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2018. – Vol. 65. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90893-9_7.
4. Ron T., Levy G.K., Dolev O. et al. Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process // Metals. – 2019. – Vol. 9. – Article 888. – DOI: <https://doi.org/10.3390/met9080888>.
5. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering. – 2021. – Vol. 13. – Article 100330. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>.
6. Shah A.A., Aliyev R., Zeidler H., Krinke S. A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 97. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7030097>.
7. Nagamatsu H., Sasahara H., Mitsutake Y., Hamamoto T. Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 31. – Article 100896. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100896>.
8. Lockett H., Ding J., Williams S., Martina F. Design for wire + arc additive manufacture: design rules and build orientation selection // Journal of Engineering Design. – 2017. – Vol. 28. – P. 568. – DOI: <https://doi.org/10.1080/09544828.2017.1365826>.
9. Khan A.U., Madhukar Y.K. An economic design and development of the wire arc additive manufacturing setup // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 91. – P. 182. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.166>.
10. Kumar N., Bhavsar H., Mahesh P.V.S. et al. Wire arc additive manufacturing – a revolutionary method in additive manufacturing // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 285. – Article 126144. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126144>.
11. Wang J., Zhu K., Zhang W. et al. Microstructural and defect evolution during WAAM resulting in mechanical property differences for AA5356 component // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 22. – P. 982. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.116>.

12. ER70S-6 Carbon Steel Welding Wire // Technical Specification Sheet. – The Harris Products Group, A Lincoln Electric Company. – Mason, OH, USA, 2008. – [Электрон. ресурс] – URL: <https://www.harrisproductsgroup.com/en/>. [technical specifications]
13. Rao Z., Liao S., Tsai H.-L. Effects of shielding gas compositions on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 107. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3291121>.
14. Purwaningrum Y., Triyono T., Pu M., Alfariz F. Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding (GMAW) of low carbon steel (LR Grade A) // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 705. – P. 250. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.705.250>.
15. ASTM E3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. – ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011. – [Электрон. ресурс] – URL: <https://www.astm.org/e0003-11.html>. [standard]
16. Bellamkonda P.N., Malarvizhi S., Balasubramanian V. Mechanical properties of wire arc additive manufactured carbon steel cylindrical component made by gas metal arc welding process // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2021. – Vol. 30. – P. 188. – DOI: <https://doi.org/10.1515/jmbm-2021-0019>.
17. Cunningham C., Flynn J.M., Shokrani A. et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 22. – P. 672. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>.
18. Tonelli L., Sola R., Laghi V. et al. Influence of interlayer forced air cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured 304L austenitic stainless steel // Steel Research International. – 2021. – Vol. 92. – DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202100175>.

Авторлар туралы мәлімет:

Кудиярбек Қ.Е., Сәтбаев университеті, «машина жасау» кафедрасының докторанты, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com.

Нұғман Е.З., PhD докторы, Сәтбаев университеті, «машина жасау» кафедрасының меңгерушісі және қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., 050013, ғылыми қызметкер, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.nugman@satbayev.university.

Мустафа А.Қ., PhD докторы, Сәтбаев университеті, «машина жасау» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., 050013, ғылыми қызметкер, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4751-7141>

Сағынтай М.Қ., PhD докторы, Сәтбаев университеті, «машина жасау» кафедрасының аға оқытушысы, ғылыми қызметкер, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: skmuchagali-2009@mail.ru.

Дюсебаев И.М., PhD докторы, "Алматы Электрқалқан зауыты" ЖШС, бас инженер, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru.

Кудиярбек Қ.Е., докторант кафедрасы «Машиностроение» Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com.

Нугман Е.З., доктор PhD, ассоциированный профессор кафедры «Машиностроение», КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, 050013; научный сотрудник ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: e.nugman@satbayev.university.

Мустафа А.Қ., доктор PhD, ассоциированный профессор кафедры «Машиностроение», КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, 050013; научный сотрудник ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru.

Сағынтай М.Қ., PhD, старший преподаватель кафедры «Машиностроение», КазНИТУ им. К.И. Сатпаева; научный сотрудник ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: skmuchagali-2009@mail.ru.

Дюсебаев Ильяс Мурзаханович – PhD, главный инженер ТОО «Алматинский завод Электроштит», г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru.

Kudiyarbek K.E, PhD candidate, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com.

Nugman Y.Z. ,PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013; Researcher, RnD Center LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.nugman@satbayev.university.

Mustafa A.K., PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013; Researcher, RnD Center LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru.

Sagyntai M.K., PhD, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University; Researcher, RnD Center LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: skmuchagali-2009@mail.ru.

Dyussebayev I.M., PhD, Chief Engineer, PhD, "Almaty Electroschit Plant" LLP, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru.





IRSTI 67.25.25

Review

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-96-110>

Green areas on highways and streets: a comprehensive study of the benefits and challenges of implementing vegetation on roadways

Quratulain Saifullah¹ , Muhammad Faisal Rehman¹ ,
L.A. Zhaksylykova² , A.M. Saurbayeva² , K.K. Arynov² 

¹ *Department of Architectural Engineering and Design, University of Engineering and Technology, Lahore, Pakistan*

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

*E mail: qsaifullah@bi-mace.com, faisal.rehman@uetpeshawar.edu.pk,
Sara.zhaksylykova@mail.ru, saurbayeva_am_1@enu.kz, arynov_kk@enu.kz*

Abstract. With the rapid expansion of urban areas, roadside green infrastructure has become a critical element of sustainable urban planning. While green areas along highways and streets occupy a relatively small share of the urban carbon sink, they provide disproportionate ecological and social benefits, including improved air quality, carbon sequestration, effective stormwater management, heat island mitigation, and support for biodiversity. This study employs a qualitative comparative case study approach, drawing on literature and policy analysis from Kyoto (Japan), Hangzhou (China), and Riyadh (Saudi Arabia), to evaluate how differing climatic and urban contexts shape the design, performance, and challenges of roadside vegetation. The findings highlight that canopy type, planting methodology, and policy frameworks have a strong influence on the effectiveness of RGI, particularly in regulating temperature, controlling pollution, and supporting ecological connectivity. However, the study also identifies common challenges across contexts, such as spatial constraints, high maintenance demands, and vulnerability to climate extremes. Addressing these issues requires integrated strategies that combine ecological design, long-term governance, and context-specific policies. The paper concludes by emphasizing that effective roadside greening can enhance urban resilience, provided it is supported by informed planning and sustained management.

Keywords: urban vegetation, street trees, roadside landscaping, carbon sequestration, urban tree management

Introduction

Even the most diminutive natural elements may effectuate substantial transformation in the urban milieu. Trees serve as the city's "lungs" and reservoirs of "carbon stock", while landscaping approaches often reflect cultural significance, emotions, and symbolism. In addition to aesthetics, these aspects impact human psychology and bring movement and energy to otherwise boring urban landscapes [1]. The built environment is primarily influenced by transportation infrastructure, which has enduring impacts on mobility systems as well as the broader environmental, economic, and social framework [2, 3]. Highways are vital to national development initiatives, serving as crucial infrastructure that addresses social needs and supports economic progress.

Cities distinguished by their "green" character are increasingly imperiled by the deterioration of natural components, especially street trees. Landscapes are influenced by several human factors, including land use, urban design configurations (e.g., roadway layouts), vandalism, and stewardship [4]. Intense traffic volumes exacerbate the deterioration of roadside vegetation [5]. Consequently, roadside air quality has become a significant public health issue. In Europe, vehicular traffic was responsible for around 60% of particle number emissions in 2010, with concentrations in heavily trafficked urban areas reaching as high as 90% [6]. Vulnerable establishments, including educational institutions, healthcare facilities, and the residential regions situated within 150 meters of main thoroughfares, face heightened danger.

Urban habitats impose particularly severe circumstances on trees, characterized by thermal stress, suboptimal soils, drainage complications, and spatial constraints. Inadequate planting tactics may result in resource wastage and tree death. Meticulous consideration of species selection, planting timing, and ecological conditions is essential for ensuring survival [7].

Empirical research substantiates the ecological significance of roadside plantings. In Nagpur, India, avenue plantings and institutional landscapes featured a diverse array of trees, with roadside plants yielding the most biomass due to their larger tree diameters [6]. Mediterranean Cypress barriers in Istanbul lowered nanoparticle concentrations by as much as 37%, yielding direct health advantages for pedestrians [6]. These examples demonstrate that well-designed roadside vegetation promotes air quality, reduces surface temperatures, enhances thermal comfort for walkers, and reduces carbon footprints.

Nevertheless, obstacles persist. Restricted tree-pit dimensions, inadequate drainage, and soil compaction often impede sustained growth [8]. Although several studies emphasize the comfort of car occupants, surveys indicate that drivers usually underestimate the benefit of roadside plantings, despite their extensive ecological and public health importance [9]. This contradiction underscores the need for comprehensive strategies that integrate transportation, health, and environmental concerns.

Sustainable road-building approaches are increasingly being used. Green roads constructed using carbon-neutral or recycled materials can help reduce emissions, absorb excess heat, and decrease dependence on natural resources [10]. These strategies correspond with international climate objectives and provide an opportunity to integrate roadside green infrastructure (RGI) with sustainable engineering methodologies.

Conceptual background

Principles of RGI. RGI encompasses the integration of vegetation and ecological design into transport corridors to deliver multiple benefits, including pollution reduction, temperature

regulation, and biodiversity enhancement. Vegetation can act as both a filter and a barrier, capturing fine particles on its leaves and thereby reducing human exposure. However, dense vegetation may also restrict airflow, potentially leading to localized pollutant buildup [11].

Airborne particulate matter (PM) and ultrafine particles (UFPs), primarily emitted by vehicles, pose a significant health hazard [12]. Roadside trees can reduce exposure for pedestrians, cyclists, and residents, though the effectiveness varies by canopy structure, density, and species-specific tolerance to air pollution [13, 14]. Highway vegetation acts as a porous medium, influencing airflow, pollutant dispersion, and deposition [15, 16]. In this way, roadside trees are not merely ornamental - they serve as living infrastructure, providing measurable ecological services [17].

Considerations for the selection of species. Species selection is a cornerstone of successful RGI. Criteria include growth rate, drought and pollution tolerance, canopy density, and lifespan [7]. Tree girth and canopy architecture are also critical: dense, broad canopies improve shading and particulate capture but may trap pollutants in narrow street canyons [12]. Optimal species, therefore, balance pollution removal capacity with site-specific spatial and climatic constraints [1,18].

Biodiversity considerations extend beyond trees to include associated insects, birds, and pollinators, which rely on roadside vegetation as habitat and movement corridors [19]. Tree selection should therefore favor species that support diverse ecological interactions, enhancing urban biodiversity resilience. However, trade-offs exist: long-lived species grow slowly, while fast-growing trees often have short lifespans [20]. Proactive planning must therefore combine functional, ecological, and aesthetic criteria in species choice.

Components of RGI. The efficacy of RGI is contingent upon both biological and structural elements. Essential elements include tree-pit dimensions, drainage conditions, pruning intensity, adjacent land use, sidewalk width, and the existence of bicycle paths or tree guards [4]. The urban environment influences the interaction of these components with pollution loads and human use.

Sustainable engineering approaches complement RGI by enhancing vegetation. Green roads built using recycled or carbon-neutral materials, such as fly ash, slag, rice husk ash, synthetic rubber, or plastic, decrease greenhouse gas emissions and improve road durability [10]. This integration converts roadways from carbon-intensive to environmentally beneficial infrastructure.

The nascent idea of green corridors - transport pathways aimed at enhancing fuel economy, minimizing CO₂ emissions, and fostering biodiversity - demonstrates the intersection of ecological design and transportation planning [21]. International instances, such as Denmark and Vatican City attaining carbon neutrality, illustrate how RGI and green roads may aid in accomplishing global sustainability objectives.

The methodology

This study employs a qualitative, comparative case study methodology, complemented by a critical literature review, to investigate the components, performance, and challenges of roadside green infrastructure (RGI) in urban environments. Three cities - Kyoto, Japan; Hangzhou, China; and Riyadh, Saudi Arabia were selected based on their contrasting climate zones, urbanization patterns, and distinctive green infrastructure practices. The research proceeded in three stages:

- 1) Document analysis - a review of peer-reviewed publications, policy reports, and case studies (2014–2023) with an emphasis on urban ecology, environmental engineering, and landscape planning.

2) Comparative analysis – evaluation of key RGI parameters, including: tree species selection and canopy types, planting methodologies, temperature control, air pollution mitigation, and biodiversity value.

1-Table. Comparative overview of RGI practices in Kyoto, Hangzhou, and Riyadh.

Indicator	Kyoto, Japan	Hangzhou, China	Riyadh, Saudi Arabia
Urban context	Dense, historic city; compact urban form	Rapidly urbanizing megacity; mix of old/new districts	Low-density, car-dependent metropolis
Climate zone	Moderately humid climate, with a pronounced urban heat island effect	Humid subtropical climate, hot and humid summer	Arid climate, extremely high summer temperatures
Dominant canopy type	Mixed deciduous–evergreen (e.g., Zelkova, Ginkgo, Camphor trees)	Broadleaf deciduous and evergreen mix (e.g., Platanus, Cinnamomum, Osmanthus)	Drought-tolerant evergreen species (e.g., Date palm, Acacia, Conocarpus)
Planting methodology	Narrow tree pits with stone grates; emphasis on aesthetic alignment with streets	Large avenue plantations; integration with parkways and waterways	Spaced plantings along wide boulevards; irrigation-supported roadside plantations
Pollution control methods	Vegetation barriers near traffic corridors; emphasis on particulate capture	Green corridors with layered vegetation; integration of water bodies for cooling	Limited direct air filtration; emphasis on dust suppression and shading
Temperature regulation	Shading + evapotranspiration reduce the surface heat island	Combined shading + water cooling effects in summer	Shade provision primary; high evapotranspiration limited by aridity
Biodiversity value	Supports pollinators and native urban fauna	High tree diversity enhances bird and insect populations	Limited diversity; mostly monocultures adapted to arid soils
Unique challenges	Space constraints in historic districts; root	High urban growth pressures; risk of	Extreme heat, scarce water, soil salinity; high cost of irrigation maintenance

	confinement in narrow pits	monoculture disease outbreaks	
Tree survival rate factors	Soil compaction, limited pit volume	Competition for space with infrastructure; intensive maintenance needed	Dependence on artificial irrigation; vulnerability to drought and water scarcity
Policy/management focus	Strong emphasis on cultural landscape preservation	Integration of “eco-civilization” policies into urban greening	Strategic greening in line with Vision 2030 sustainability goals

3) Performance indicators – identification of measurable outcomes, such as: decline in the temperature of the air and the surface; Pollutant absorption efficacy (e.g., PM2.5, NOx); Spatial configurations and tree survival rates (e.g., the design of tree pits, the presence of grates); The influence of land use patterns on the sustainability of vegetation.

This comparative paradigm aims to provide context-specific insights on optimizing RGI to mitigate environmental stresses while improving urban resilience and livability.

Comparative case studies

Kyoto city, Japan

In Kyoto, Japan, a study highlights the relationship between local land use planning and the growth of street trees, which are considered essential ecological assets. These trees provide ecological connectivity, alleviate heat island effects, and support wildlife. Effective street tree planting involves careful design, selection of appropriate species, and measures to protect them from pedestrian damage. Local planners have enhanced tree conditions through detailed attention to planting strategies, reflecting the complex factors influencing urban success in developed regions [6].

Hangzhou city, Zhejiang province, China

Roadside trees are vital to urban forests, enhancing the environment by cooling and humidifying air during summer through solar radiation management. However, quantifying their impact on air temperatures is challenging due to their complex 3D structures and varying planting types. Research in China indicated that umbrella canopy designs yield the best cooling effects, while columnar shapes provide the least benefit. Canopy cover reduces the amount of solar energy reaching road surfaces, thereby helping to lower air temperatures. The cooling and humidification effects are closely linked to canopy shape, with species featuring pileate, spherical, or high pyramidal canopies recommended for plantings along highways. Two-sided plantings are also advocated for metropolitan areas [22].

Riyadh’s green highway

The thoughtful landscape strategy for highways in Saudi Arabia enhances not only aesthetics but also functionality, fostering increased tree cover and biodiversity, and creating urban ecological corridors. This design approach reflects the understanding of the past, rooted in the Elemental Heritage of Saudi Arabia, which influences the city's evolution through culture, ecology, history, architecture, and topography. By integrating these factors, the design preserves historical

and cultural elements while ensuring development, emphasizing a balance of the core elements: Fire, Earth, Water, and Wind. To highlight the similarities and differences across the three contexts,

Table 1 presents a comparative overview of RGI practices, linking canopy types, planting methods,

and key challenges in Kyoto, Hangzhou, and Riyadh.

Challenges and future direction

Despite proven benefits, roadside plantations remain highly vulnerable in rapidly urbanizing regions. In Asia, mature trees are frequently removed to accommodate road widening, metro corridors, or subterranean infrastructure such as gas lines and sewage systems [3,7]. These pressures result in fragmented planting strips, reduced soil volumes, and higher mortality rates.

Future directions for RGI must address three interlinked challenges:

- *Spatial constraints* – ensuring adequate soil, drainage, and continuous planting strips rather than isolated pits;
- *Biodiversity protection* – integrating ecological restoration and corridor planning into roadside design [19];
- *Governance and perception* – overcoming the undervaluation of vegetation by motorists and ensuring long-term stewardship.

Findings/Discussion

Structural and biological factors influencing RGI performance. Efficient RGI depends on the harmonious integration of biological and structural elements. In the three case studies, several crucial elements were consistently recognized as vital for success: (i) the choice of pollution-resistant and rapidly growing species, (ii) regular maintenance practices including pruning and canopy management, and (iii) adequately sized and continuous tree pits to facilitate healthy root growth [1, 20]. Complementary infrastructure components - such as bike lanes, flowerbeds, and expansive sidewalks - are similarly significant in mitigating soil compaction and protecting root zones from trampling [23]. These approaches, when combined, promote resilient canopies, enhance pollution collection efficiency, and promote ecological stability in densely populated urban environments.

Climatic and ecological advantages. Unique meteorological and urban characteristics influenced the environmental benefits of RGI in each location.

- Kyoto, Japan: Low-canopied, terrestrial trees improved ecological connectedness and alleviated the urban heat island phenomenon. Meticulous species selection yielded elevated survival rates, especially in settings of space limitation [6].

- In Hangzhou, China, umbrella-shaped canopies lowered surface air temperatures by as much as 2.5 °C relative to asphalt, while dual-sided roadside plants enhanced shade and soil moisture retention [22].

- Riyadh, Kingdom of Saudi Arabia: In the dry environment, green roadway designs created ventilation corridors that enhanced microclimatic comfort. These techniques amalgamate ecological design with cultural legacy, underscoring the synergy between contemporary infrastructure and old environmental wisdom.

Comprehensive research indicates that canopy shape has a significant impact on air pollution deposition, ventilation, and temperature regulation. Porous vegetation may promote the dispersion of pollution, but thick foliage can entrap delicate particulate matter in urban street

canyons, exacerbating near-road air quality. This highlights the importance of tailoring canopy design to individual sites. Socio-ecological issues. Notwithstanding their advantages, RGI initiatives encounter considerable limitations.

The fast urban growth in Asian megacities often results in the elimination of older trees, creating fragmented and narrow planting strips with reduced ecological efficacy [23]. Recently planted roadside trees have experienced elevated death rates due to vandalism, inadequate care, grazing pressures, and persistent exposure to automobile pollution [20]. In India, roadside plantings face significant biotic stressors, including encroachment, overcrowding, and fires, which compromise their long-term viability despite extensive planting initiatives [20].

The urban form also presents issues. Elevated roadway canyons impede ventilation and entrap pollutants, exacerbating exposure levels for pedestrians [23]. Although barriers, such as fences or plant belts, help mitigate traffic-related air pollution (TRAP), they may also raise societal concerns over accessibility, aesthetics, and fire hazards [26, 32]. Moreover, conflicts between root systems and urban infrastructure (e.g., sidewalks, drainage systems) hinder the long-term viability of RGI projects [20].

Innovative practices and future directions. Emerging strategies demonstrate how RGI can evolve beyond conventional street tree planting. Incorporating recycled materials, including fly ash, plastics, and steel slag, into pavement construction improves road durability while lowering CO₂ emissions [24]. Similarly, Low Impact Development (LID) practices, such as rainwater harvesting for irrigation in Taichung (Taiwan), integrate water-sensitive design into transportation infrastructure [27]. Bioengineering techniques, including slope stabilization with native vegetation, further enhance erosion control and reduce landslide risks [28, 29]. At the global level, advanced climate mitigation approaches, including direct air capture and peatland restoration, underscore the importance of integrating urban RGI with broader negative-emission strategies [24]. While resource-intensive, these technologies complement the immediate benefits of strategically placed vegetation, which captures pollutants most effectively when located near emission sources [30]. Policy implications for urban planners. The comparative evidence from Kyoto, Hangzhou, and Riyadh suggests several actionable insights:

- Structural design is decisive: Canopy shape, pit size, and planting layout influence pollutant control more strongly than species choice alone [11, 23].
- Context-specific approaches are essential: Cooling should be prioritized in humid regions (Hangzhou), ventilation in the arid areas (Riyadh), and ecological connectivity in dense historic districts (Kyoto) [6, 22].
- Socio-ecological resilience must be built in: Without adequate maintenance, protection from vandalism, and adaptation to local biotic pressures, even well-designed RGI projects suffer high mortality [20].
- Circular economy and eco-design add value: Recycled construction materials, water-sensitive designs, and ecosystem-based engineering practices improve both sustainability and cost-effectiveness [24, 27].

In sum, RGI has demonstrated strong potential to mitigate air pollution, reduce thermal stress, and enhance urban biodiversity. Yet, its long-term effectiveness depends on balancing ecological, structural, and socio-economic factors while adopting context-sensitive planning frameworks that align with both local and global sustainability goals.

Conclusion

This comparative analysis of RGI in Kyoto, Hangzhou, and Riyadh highlights the commonalities and unique challenges of implementing urban vegetation policies in diverse climatic and cultural contexts. Kyoto exemplifies the significance of ecological connectedness in densely populated urban environments, Hangzhou showcases the cooling capabilities of umbrella-shaped canopies, and Riyadh highlights the need for ventilation corridors in desert regions.

The results validate that structural elements - such as canopy type, planting arrangement, and tree pit design - are crucial for reducing pollution and managing thermal conditions. Nonetheless, these advantages are often compromised by socio-ecological obstacles, such as insufficient maintenance, biotic stressors, and urban encroachment. Innovative strategies, such as the use of recycled materials, water-sensitive design, and bioengineering methods, offer promising avenues for enhancing resilience and sustainability.

The policy implications are evident: urban areas must implement context-specific, multi-faceted solutions that emphasize structural design, guarantee long-term maintenance, and integrate circular economy concepts. Consequently, roadside green infrastructure may transition from a decorative element to an essential aspect of climate-responsive and socially resilient urban development.

Acknowledgement, conflict of interests

No conflicts of interest.

The contribution of the authors.

Quratulain Saifullah – conceptualization, methodology, international case study review, manuscript writing (initial draft);

Muhammad Faisal Rehman – data analysis, literature review, visualization, editing;

L.A. Zhaksylykova – contextual adaptation, validation of conclusions, critical review of manuscript;

A.M. Saurbayeva – supervision, academic editing, structure development, final proofreading;

K.K. Arynov – scientific advising, overall project leadership.

References

1. Guneroglu N., Bekar M., Kaya Sahin E. Plant selection for roadside design: the view of landscape architects // Environmental Science and Pollution Research. -2019. -№26(33). -P. 34430–34439. DOI: 10.1007/s11356-019-06562-4.
2. Meyer M., Hunter M., Eisenman A. Comparison of “Green Road Rating” Systems: Final Report. Sustainable Streets and Highways [Электронный ресурс].
3. Adzar J. A., Zakaria R., Aminudin E., Rashid M. H. S. A., Munikanan V., Shamsudin S. M., Rahman M. F. A., & Wah C. K. Development of operation and maintenance sustainability index for penarafan hijau jabatan kerja raya (pHJKR) green road rating system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. -2019. -№527(1). DOI: 10.1088/1757-899X/527/1/012058.
4. Tan X., Shibata S. Factors influencing street tree health in constrained planting spaces: Evidence from Kyoto City, Japan // Urban Forestry and Urban Greening. -2022. -№67. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127416.

5. Angelstam P., Khaulyak O., Yamelynets T., Mozgeris G., Naumov V., Chmielewski T. J., Elbakidze M., Manton M., Prots B., & Valasiuk S. Green infrastructure development at European Union's eastern border: Effects of road infrastructure and forest habitat loss // Journal of Environmental Management. -2017. №193. -P. 300–311. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.017.
6. Ozdemir H. Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution // Science of the Total Environment. -2019. -№659. -P. 1176–1185. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.262.
7. Lahoti S., Lahoti A., Joshi R. K., & Saito O. Vegetation structure, species composition, and carbon sink potential of urban green spaces in Nagpur City, India // Land. -2020. №9(4). DOI: 10.3390/land9040107.
8. Zaki S. A., Toh H. J., Yakub F., Saudi A. S. M., Ardila-Rey J. A., & Muhammad-Sukki F. Effects of roadside trees and road orientation on thermal environment in a tropical city // Sustainability (Switzerland). -2020. -№12(3). DOI: 10.3390/su12031053.
9. Shaaban K., Shakeel K., Rashidi T. H., & Kim I. . Measuring users' satisfaction of the road network using structural equation modeling // International Journal of Sustainable Transportation. -2022. -№16(9). -P. 792–803. DOI: 10.1080/15568318.2021.1934916.
10. Attahiru Y. B., Aziz M. M. A., Kassim K. A., Shahid S., Wan Abu Bakar W. A., NSashruddin T. F., Rahman F. A., & Ahamed M. I. A review on green economy and development of green roads and highways using carbon neutral materials // Renewable and Sustainable Energy Reviews. -2019. -№101. P. 600–613. DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.036.
11. Zheng T., Zhang S., Li X. B., Wu Y., Jia Y. P., Wu C. L., He H. Di & Peng Z. R. Impacts of vegetation on particle concentrations in roadside environments // Environmental Pollution. -2021. -№282. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117067.
12. Wang H., Maher B. A., Ahmed I. A. M. & Davison B. Efficient Removal of Ultrafine Particles from Diesel Exhaust by Selected Tree Species: Implications for Roadside Planting for Improving the Quality of Urban Air // Environmental Science and Technology. -2019. -№53(12). -P. 6906–6916. DOI: 10.1021/acs.est.8b06629.
13. Ozdemir H. Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution // Science of the Total Environment. -2019. -№659. -P. 1176–1185. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.262.
14. Singh H., Bandyopadhyay S., Kumar A., Singh M., Malik A., Kumari G., Raturi A., Yadav S. K., Kumar M., Barthwal S., Thakur A., & Rawat P. S. Understanding the physiological and biophysical response of urban roadside plantations for assessing adaptation and mitigation mechanisms toward vehicular emissions // Urban Climate. -2022. -№44. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101183.
15. Muthu M., Gopal J., Kim D. H. & Sivanesan I. Reviewing the impact of vehicular pollution on road-side plants – future perspectives // Sustainability (Switzerland). -2021. -№13(9). DOI: 10.3390/su13095114.
16. Hashad K., Yang B., Baldauf R. W., Deshmukh P., Isakov V., & Zhang K. M. Designing roadside green infrastructure to mitigate traffic-related air pollution using machine learning // Science of the Total Environment. -2021. -№773. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144760.
17. Yang H., Chen T., Lin Y., Buccolieri R., Mattsson M., Zhang M., Hang J. & Wang Q. Integrated impacts of tree planting and street aspect ratios on CO dispersion and personal exposure in full-scale street canyons // Building and Environment. -2020. -№169. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106529.
18. Deshmukh P., Isakov V., Venkatram A., Yang B., Zhang K. M., Logan R. & Baldauf R. The effects of roadside vegetation characteristics on local, near-road air quality // Air Quality, Atmosphere and Health. -2019. -№12(3). -P. 259–270. DOI: 10.1007/s11869-018-0651-8.

19. New T. R., Sands D. P. A., Taylor G. S. Roles of roadside vegetation in insect conservation in Australia // Austral Entomology. -2021. -№60(1). -P. 128–137. DOI: 10.1111/aen.12511.
20. Ragula A., Chandra K. K. Tree species suitable for roadside afforestation and carbon sequestration in Bilaspur, India // Carbon Management. -2020. -P. 369–380. DOI: 10.1080/17583004.2020.1790243.
21. Demir E., Bektaş T., Laporte G. A review of recent research on green road freight transportation // European Journal of Operational Research. -2014. -№237(3). -P. 775–793. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.12.033.
22. Cai Y., Li C., Ye L., Xiao L., Gao X., Mo L., Du H., Zhou Y. & Zhou G. Effect of the roadside tree canopy structure and the surroundings on the daytime urban air temperature in summer // Agricultural and Forest Meteorology. -2022. -№316. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.108850.
23. Huang Y., Lei C., Liu C. H., Perez P., Forehead H., Kong S., & Zhou J. L. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons // Environmental Pollution. -2021. -№280. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116971.
24. Tiwari A., Kumar P. Integrated dispersion-deposition modelling for air pollutant reduction via green infrastructure at an urban scale // Science of the Total Environment. -2020. -№723. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138078.
25. Kumar P., Zavala-Reyes J. C., Tomson M. & Kalaiarasan G. Understanding the effects of roadside hedges on the horizontal and vertical distributions of air pollutants in street canyons // Environment International. -2022. -№158. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106883.
26. Hashad K., Yang B., Baldauf R. W., Deshmukh P., Isakov V. & Zhang K. M. Enhancing the local air quality benefits of roadside green infrastructure using low-cost, impermeable, solid structures (LISS) // Science of the Total Environment. -2020.-№717. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137136.
27. Lin J.-Y., Chen C.-F., Ho C.-C. Evaluating the effectiveness of green roads for runoff control // Journal of Sustainable Water in the Built Environment. -2018. -№4(2). DOI: 10.1061/jswbay.0000847.
28. Klatzel F. Green roads: Building environmentally friendly, low maintenance rural roads through local participation [Электронный ресурс].
29. Bhatti U. A., Yu Z., Hasnain A., Saqib & Nawaz A., Yuan L., Wen L., Mughair & Bhatti A. Evaluating the impact of roads on the diversity pattern and density of trees to improve the conservation of species [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16627-y>
30. Chen X., Wang X., Wu X., Guo J. & Zhou Z. Influence of roadside vegetation barriers on air quality inside urban street canyons // Urban Forestry and Urban Greening. -2021. -№63. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127219.

**Куратулайн Саифулла¹, Мухаммад Фейсал Рехман¹,
Л.А. Жаксылыкова², А.М. Саурбаева^{2*}, К.К. Арынов²**

¹Инженерия және технология университеті, Лахор, Пәкістан

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

**Автомобильдер мен көшелердегі жасыл аймақтар: жол бойына өсімдіктер
отырғызудың артықшылықтары мен қиындықтарына жан-жақты шолу**

Аңдатпа. Қалалық аумақтардың қарқынды кеңеюімен бірге жол бойындағы жасыл инфрақұрылым орнықты қала жоспарлаудың маңызды элементіне айнауда. Дегенмен, автомагистральдар мен көшелер бойындағы жасыл аймақтар қалалық көміртек сіңіргішінің салыстырмалы түрде шағын үлесін алатын болса да, олар экологиялық және әлеуметтік тұрғыдан айтарлықтай пайда әкеледі. Олардың қатарында ауаның сапасын жақсарту, көмірқышқылды сіңіру, нөсер суларын тиімді басқару, «қалалық жылу аралы» әсерін төмендету және биоалуантүрлілікті қолдау бар. Бұл зерттеуде Киото (Жапония), Ханчжоу (Қытай) және Эр-Рияд (Сауд Арабиясы) қалаларындағы әдебиеттер мен саясаттық талдауға негізделген сапалық салыстырмалы кейс-стади әдісі қолданылып, әртүрлі климаттық және урбанистік жағдайлардың жол бойындағы көгалдандырудың жобалануына, тиімділігіне және қиындықтарына қалай әсер ететіні бағаланады. Зерттеу нәтижелері тәждің түрі, отырғызу әдістері және саяси шеңберлер жасыл инфрақұрылымның тиімділігіне, әсіресе температураны реттеу, ластануды бақылау және экологиялық байланыстылықты қамтамасыз етуге айтарлықтай ықпал ететінін көрсетті. Сонымен қатар, барлық контекстер үшін ортақ мәселелер анықталды: кеңістіктің шектеулілігі, жоғары күтім шығындары және климаттық төтенше жағдайларға осалдық. Бұл мәселелерді шешу үшін экологиялық жобалау, ұзақ мерзімді басқару және контекстке сәйкес саясатты үйлестіретін кешенді стратегиялар қажет. Қорытындылай келе, тиімді жол бойы көгалдандыру қалалардың тұрақтылығын арттыра алады, егер ол сауатты жоспарлау және жүйелі басқарумен қамтамасыз етілсе.

Түйін сөздер: қалалық өсімдіктер, дала ағаштары, жол жиегін көгалдандыру, көміртексіңіру, қалалық ағаштарды басқару.

**Куратулайн Саифулла¹, Мухаммад Фейсал Рехман¹,
Л.А. Жаксылыкова², А.М. Саурбаева^{2*}, К.К. Арынов²**

¹Университет инженерии и технологий, Лахор, Пакистан

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

Зелёные зоны вдоль автомагистралей и улиц: комплексный взгляд на преимущества и вызовы внедрения растительности в дорожную инфраструктуру

Аннотация. С быстрым расширением городских территорий придорожная зеленая инфраструктура становится важнейшим элементом устойчивого городского планирования. Несмотря на то что зеленые зоны вдоль автомагистралей и улиц занимают относительно небольшую долю городского углеродного поглотителя, они обеспечивают несоразмерно большие экологические и социальные преимущества, включая улучшение качества воздуха, секвестрацию углерода, эффективное управление ливневыми водами, снижение эффекта городского теплового острова и поддержку биоразнообразия. В данном исследовании используется качественный сравнительный метод кейс-стади, основанный на анализе литературы и политических стратегий в Киото (Япония), Ханчжоу (Китай) и Эр-Рияде (Саудовская Аравия), для оценки того, как различные климатические и урбанистические контексты влияют на проектирование, эффективность и проблемы придорожной растительности. Результаты показывают, что тип кроны, методы посадки и политические рамки оказывают значительное влияние на эффективность зеленой инфраструктуры, особенно в регулировании температуры, контроле загрязнения и

поддержке экологической связанности. Однако исследование также выявило общие проблемы для всех контекстов, такие как пространственные ограничения, высокая потребность в уходе и уязвимость к климатическим экстремумам. Решение этих вопросов требует интегрированных стратегий, сочетающих экологический дизайн, долгосрочное управление и контекстно-специфическую политику. В заключение подчеркивается, что эффективное озеленение дорожных территорий может повысить устойчивость городов при условии его поддержки грамотным планированием и постоянным управлением.

Ключевые слова: городская растительность, уличные деревья, озеленение вдоль дорог, углеродный баланс, управление городскими деревьями.

References

1. Guneroglu N., Bekar M., Kaya Sahin E. Plant selection for roadside design: the view of landscape architects // Environmental Science and Pollution Research. -2019. -№26(33). -P. 34430–34439. DOI: 10.1007/s11356-019-06562-4.
2. Meyer M., Hunter M., Eisenman A. Comparison of “Green Road Rating” Systems: Final Report. Sustainable Streets and Highways [Электронный ресурс].
3. Adzar J. A., Zakaria R., Aminudin E., Rashid M. H. S. A., Munikanan V., Shamsudin S. M., Rahman M. F. A., & Wah C. K. Development of operation and maintenance sustainability index for penarafan hijau jabatan kerja raya (pHJKR) green road rating system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. -2019. -№527(1). DOI: 10.1088/1757-899X/527/1/012058.
4. Tan X., Shibata S. Factors influencing street tree health in constrained planting spaces: evidence from Kyoto City, Japan // Urban Forestry and Urban Greening. -2022. -№67. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127416.
5. Angelstam P., Khauliyak O., Yamelynets T., Mozgeris G., Naumov V., Chmielewski T. J., Elbakidze M., Manton M., Prots B., & Valasiuk S. Green infrastructure development at European Union’s eastern border: Effects of road infrastructure and forest habitat loss // Journal of Environmental Management. -2017. №193. -P. 300–311. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.017.
6. Ozdemir H. Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution // Science of the Total Environment. -2019. -№659. -P. 1176–1185. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.262.
7. Lahoti S., Lahoti A., Joshi R. K., & Saito O. Vegetation structure, species composition, and carbon sink potential of urban green spaces in Nagpur City, India // Land. -2020. №9(4). DOI: 10.3390/land9040107.
8. Zaki S. A., Toh H. J., Yakub F., Saudi A. S. M., Ardila-Rey J. A., & Muhammad-Sukki F. Effects of roadside trees and road orientation on thermal environment in a tropical city // Sustainability (Switzerland). -2020. -№12(3). DOI: 10.3390/su12031053.
9. Shaaban K., Shakeel K., Rashidi T. H., & Kim I. . Measuring users’ satisfaction of the road network using structural equation modeling // International Journal of Sustainable Transportation. -2022. -№16(9). -P. 792–803. DOI: 10.1080/15568318.2021.1934916.
10. Attahiru Y. B., Aziz M. M. A., Kassim K. A., Shahid S., Wan Abu Bakar W. A., NSashruddin T. F., Rahman F. A., & Ahamed M. I. A review on green economy and development of green roads and highways using carbon neutral materials // Renewable and Sustainable Energy Reviews. -2019. -№101. P. 600–613. DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.036.

11. Zheng T., Zhang S., Li X. B., Wu Y., Jia Y. P., Wu C. L., He H. Di & Peng Z. R. Impacts of vegetation on particle concentrations in roadside environments // *Environmental Pollution*. -2021. -№282. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117067.
12. Wang H., Maher B. A., Ahmed I. A. M. & Davison B. Efficient Removal of Ultrafine Particles from Diesel Exhaust by Selected Tree Species: Implications for Roadside Planting for Improving the Quality of Urban Air // *Environmental Science and Technology*. -2019. -№53(12). -P. 6906–6916. DOI: 10.1021/acs.est.8b06629.
13. Ozdemir H. Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution // *Science of the Total Environment*. -2019. -№659. -P. 1176–1185. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.262.
14. Singh H., Bandyopadhyay S., Kumar A., Singh M., Malik A., Kumari G., Raturi A., Yadav S. K., Kumar M., Barthwal S., Thakur A., & Rawat P. S. Understanding the physiological and biophysical response of urban roadside plantations for assessing adaptation and mitigation mechanisms toward vehicular emissions // *Urban Climate*. -2022. -№44. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101183.
15. Muthu M., Gopal J., Kim D. H. & Sivanesan I. Reviewing the impact of vehicular pollution on road-side plants – future perspectives // *Sustainability (Switzerland)*. -2021. -№13(9). DOI: 10.3390/su13095114.
16. Hashad K., Yang B., Baldauf R. W., Deshmukh P., Isakov V., & Zhang K. M. Designing roadside green infrastructure to mitigate traffic-related air pollution using machine learning // *Science of the Total Environment*. -2021. -№773. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144760.
17. Yang H., Chen T., Lin Y., Buccolieri R., Mattsson M., Zhang M., Hang J. & Wang Q. Integrated impacts of tree planting and street aspect ratios on CO dispersion and personal exposure in full-scale street canyons // *Building and Environment*. -2020. -№169. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106529.
18. Deshmukh P., Isakov V., Venkatram A., Yang B., Zhang K. M., Logan R. & Baldauf R. The effects of roadside vegetation characteristics on local, near-road air quality // *Air Quality, Atmosphere and Health*. -2019. -№12(3). -P. 259–270. DOI: 10.1007/s11869-018-0651-8.
19. New T. R., Sands D. P. A., Taylor G. S. Roles of roadside vegetation in insect conservation in Australia // *Austral Entomology*. -2021. -№60(1). -P. 128–137. DOI: 10.1111/aen.12511.
20. Ragula A., Chandra K. K. Tree species suitable for roadside afforestation and carbon sequestration in Bilaspur, India // *Carbon Management*. -2020. -P. 369–380. DOI: 10.1080/17583004.2020.1790243.
21. Demir E., Bektaş T., Laporte G. A review of recent research on green road freight transportation // *European Journal of Operational Research*. -2014. -№237(3). -P. 775–793. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.12.033.
22. Cai Y., Li C., Ye L., Xiao L., Gao X., Mo L., Du H., Zhou Y. & Zhou G. Effect of the roadside tree canopy structure and the surroundings on the daytime urban air temperature in summer // *Agricultural and Forest Meteorology*. -2022. -№316. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.108850.
23. Huang Y., Lei C., Liu C. H., Perez P., Forehead H., Kong S., & Zhou J. L. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons // *Environmental Pollution*. -2021. -№280. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116971.
24. Tiwari A., Kumar P. Integrated dispersion-deposition modelling for air pollutant reduction via green infrastructure at an urban scale // *Science of the Total Environment*. -2020. -№723. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138078.
25. Kumar P., Zavala-Reyes J. C., Tomson M. & Kalaiarasan G. Understanding the effects of roadside hedges on the horizontal and vertical distributions of air pollutants in street canyons //

Environment International. -2022. -№158. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106883.

26. Hashad K., Yang B., Baldauf R. W., Deshmukh P., Isakov V. & Zhang K. M. Enhancing the local air quality benefits of roadside green infrastructure using low-cost, impermeable, solid structures (LISS) // Science of the Total Environment. -2020.-№717. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137136.

27. Lin J.-Y., Chen C.-F., Ho C.-C. Evaluating the effectiveness of green roads for runoff control // Journal of Sustainable Water in the Built Environment. -2018. -№4(2). DOI: 10.1061/jswbay.0000847.

28. Klatzel F. Green roads: Building environmentally friendly, low maintenance rural roads through local participation [Электронный ресурс].

29. Bhatti U. A., Yu Z., Hasnain A., Saqib & Nawaz A., Yuan L., Wen L., Mughair & Bhatti A. Evaluating the impact of roads on the diversity pattern and density of trees to improve the conservation of species [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16627-y>

30. Chen X., Wang X., Wu X., Guo J. & Zhou Z. Influence of roadside vegetation barriers on air quality inside urban street canyons // Urban Forestry and Urban Greening. -2021. -№63. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127219.

Information about the authors:

Quratulain Saifullah – Master of Construction Management, University of Engineering and Technology, Lahore. CEO of Bimace Studio, operating under the Republic of Pakistan, Australia and the USA. Address: 10 Cartmell Way, Balga, WA 6061, Australia.

Muhammad Faisal Rehman – Master of science in urban Infrastructure Planning and Management, Associate professor, University of Engineering and Technology, Grand Trunk Road (G.T. Road), 54890, Lahore, Punjab, Pakistan.

Saurbayeva A.M. – corresponding author, PhD, Senior lecturer at the Architecture Department of L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, 010000, Astana, Kazakhstan

Zhaksylykova L.A. – Master of architecture, acting associate professor, Architecture Department of L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, 010000, Astana, Kazakhstan

Arynov K.K. – Doctor of architecture, Head of the Architecture Department of L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, 010000, Astana, Kazakhstan

Қуратулайн Саифулла – Құрылыс менеджменті магистрі, Инженерия және технология университеті. Bimace Studio компаниясының бас директоры, ол Пәкістан, Аустралия және АҚШ заңнамасы аясында жұмыс істейді. Мекенжайы: 10 Cartmell Way, Balga, WA 6061, Аустралия.

Мухаммад Фейсал Рехман – Қалалық инфрақұрылымды жоспарлау және басқару саласындағы ғылым магистрі, доцент, Инженерия және технология университеті, Гранд-Транк жолы (G.T. Road), 54890, Лахор, Пенджаб, Пәкістан.

Саурбаева А.М. – хат-хабар авторы, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Сәулет» кафедрасының аға оқытушысы, Сәтпаев көшесі, 2, 010000, Астана, Қазақстан.

Жақсылықова Л.А. – сәулет магистрі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық

университетінің «Сәулет» кафедрасының доцент м.а., Сәтпаев көшесі, 2, 010000, Астана, Қазақстан.

Арынов Қ.К. – сәулет докторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Сәулет» кафедрасының меңгерушісі, Сәтпаев көшесі, 2, 010000, Астана, Қазақстан.

Куратулайн Саифулла – магистр управления в строительстве, Университет инженерии и технологий, Лахор. Генеральный директор студии Vimase, осуществляющей деятельность в рамках законодательства Пакистана, Австралии и США. Адрес: 10 Cartmell Way, Balga, WA 6061, Австралия.

Мухаммад Фейсал Рехман – магистр наук в области планирования и управления городской инфраструктурой, доцент, Университет инженерии и технологий, Гранд-Транк Роуд (G.T. Road), 54890, Лахор, Пенджаб, Пакистан.

Саурбаева А.М. – автор для корреспонденции, PhD, старший преподаватель кафедры «Архитектура» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, 010000, Астана, Казахстан.

Жаксылыкова Л.А. – магистр архитектуры, и.о. доцент кафедры «Архитектура» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, 010000, Астана, Казахстан.

Арынов К.К. – доктор архитектуры, заведующий кафедрой «Архитектура» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, 010000, 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/>).



МРНТИ 55.42.27

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-111-123>

Сравнительный анализ распределения давления компрессионных поршневых колец в цилиндре двс

А.К. Каукаров^{1*} , Б.У. Жаманбаев² , У.Ш. Кокаев² ,
Н.С. Сауханов¹ , Э.А. Бегимкулова³ 

¹Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актюбе, Казахстан

²Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан.

³АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан

E mail: altynbek-79@mail.ru, kokayev_ush@enu.kz, zhaman78@mail.ru,
eb_199292@mail.ru, nurgazy.saukhanov@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается сравнительный анализ удельного давления на стенку цилиндра, создаваемого традиционным компрессионным поршневым кольцом и альтернативной конструкцией, состоящей из двух полуколец. Основное внимание уделено теоретическим аспектам формирования и распределения контактного давления между поршневым кольцом и зеркалом цилиндра. Приведены математические модели, описывающие напряжённо-деформированное состояние кольца при установке в цилиндр, а также предложен упрощённый подход к расчёту давления для конструкции из двух полуколец без учёта упругости материала. Расчёты показали, что для цельного кольца характерна неравномерная эпюра давления с пиковыми значениями, что может способствовать ускоренному износу элементов цилиндра-поршневой группы. Также приведены рекомендации по выбору материалов и геометрических параметров колец, позволяющих повысить герметичность камеры сгорания и ресурс двигателя. Авторы подчёркивают, что применение конструкции из двух полуколец может стать перспективным направлением в модернизации поршневых колец двигателей внутреннего сгорания, особенно в условиях повышенных температур и нагрузок. Представленные материалы могут быть полезны инженерам, исследователям и разработчикам при проектировании и анализе элементов ЦПГ.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, компрессионные поршневые кольца, полукольца, эпюра давления, удельное давление.

Введение

Компрессионные поршневые кольца являются одним из ключевых элементов цилиндро-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Их задача заключается не только в обеспечении герметичности камеры сгорания, но и в выполнении ряда дополнительных, не менее значимых функций: регулирование расхода масла, участие в теплообмене между поршнем и стенкой цилиндра, а также стабилизация положения поршня при его движении. Эффективность выполнения всех этих функций в значительной степени определяется величиной и характером распределения удельного давления, с которым поршневые кольца прижимаются к зеркалу цилиндра [1]. Правильное формирование давления обеспечивает минимальные утечки газов, стабильность работы двигателя и увеличение его ресурса.

Исследование удельного давления поршневых колец является важной задачей как при проектировании новых двигателей, так и при совершенствовании существующих конструкций. На современном этапе развития двигателестроения всё большее внимание уделяется вопросам повышения экономичности, экологичности и долговечности агрегатов, что напрямую связано с эффективностью работы поршневых колец. Традиционные компрессионные кольца остаются наиболее распространённым типом уплотнений, применяемых в ДВС, однако их конструкция имеет ряд ограничений. Наибольшие сложности связаны с тем, что давление по окружности кольца распределяется неравномерно, что может приводить к локальным зонам повышенного износа, снижению герметичности и появлению дополнительных потерь на трение.

Удельное давление на стенку цилиндра определяется двумя основными факторами: собственными упругими силами кольца и давлением газов, проникающих за кольцо. Базовое прижатие создаётся за счёт упругой деформации кольца при его установке в канавку поршня и последующем сжатии в цилиндре. Эта величина сравнительно невелика — от 0,05 до 0,2 МПа, в зависимости от типа двигателя, конструкции кольца и его размеров [2]. При этом в работе двигателя решающую роль играет давление газов, поступающих в замковую щель и за кольцо. Оно может многократно увеличивать общую силу прижатия и существенно влияет на характер распределения нагрузки.

Неравномерность распределения удельного давления является одной из основных проблем традиционных поршневых колец. Например, при каплевидной или грушевидной эпюре давления значения могут изменяться от 0,45 до 2,85 МПа, что приводит к значительным нагрузкам на определённых участках поверхности цилиндра [3]. Эти локальные пиковые значения ускоряют износ цилиндров и колец, уменьшают ресурс ЦПГ и ухудшают условия формирования смазочной плёнки. В условиях высоких оборотов и повышенных температур такие явления могут привести к увеличению расхода масла, снижению компрессии и появлению задиров.

Анализ существующей научной литературы подтверждает высокую актуальность проблемы. В работе [4] исследовано влияние геометрии кольца на распределение давления. Авторы демонстрируют, что традиционные конструкции неизбежно создают зоны локального перенапряжения, что приводит к ускоренному износу цилиндров. В исследовании [5] предложена альтернативная конструкция поршневого кольца, выполненная из двух независимых полуколец. Такой подход позволяет добиться более равномерного распределения давления и снижает силу трения, что положительно сказывается на КПД и ресурсе двигателя.

В другом исследовании [6] рассматривается влияние материалов и покрытий на износостойкость колец. Было показано, что новые композиционные материалы и многослойные покрытия способны значительно улучшить теплоотвод, устойчивость к износу и стабильность при высоких температурах. При этом особое внимание уделяется вопросу взаимодействия кольца с цилиндром в условиях переменных нагрузок, когда традиционные кольца подвержены повышенным деформациям.

Работа [7] посвящена численному моделированию контактных напряжений и давлений между поршневым кольцом и цилиндром. Моделирование методом конечных элементов позволяет выявить пиковые зоны нагрузки и оценить влияние различных факторов: овальности цилиндра, термических деформаций, скорости поршня, толщины смазочной плёнки. Результаты показывают, что традиционные кольца склонны к резким скачкам давления в зоне замка, что особенно заметно на высоких оборотах.

Таким образом, удельное давление компрессионного поршневого кольца является одним из ключевых параметров, определяющих эффективность, долговечность и надёжность работы двигателя. Оптимизация этого параметра требует комплексного подхода, включающего совершенствование конструкции, использование новых материалов, моделирование нагрузок и внедрение инновационных технологий покрытия поверхности.

Особый интерес в последние годы вызывают конструкции поршневых колец, состоящие из двух полуколец. Благодаря отсутствию зоны замка в традиционном понимании и снижению внутренних напряжений такие конструкции позволяют обеспечить более равномерное распределение давления и уменьшить зоны локального износа. Это особенно важно для современных ДВС, работающих при высоких температурных и механических нагрузках, где традиционные поршневые кольца могут быть недостаточно эффективны.

Исходя из этого, цель данной статьи состоит в проведении сравнительного анализа удельного давления, создаваемого традиционным поршневым кольцом и конструкцией из двух полуколец. В ходе работы рассматриваются теоретические основы формирования давления, приводятся данные численных расчётов, анализа распределения нагрузки и обсуждаются результаты моделирования. Кроме того, уделено внимание возможным преимуществам альтернативной конструкции в части повышения ресурса цилиндро-поршневой группы и оптимизации работы двигателя.

Методология

Теоретические основы давления на стенку цилиндра традиционного компрессионного поршневого кольца

Давление компрессионного поршневого кольца на стенку цилиндра формируется в основном за счёт упругих деформаций кольца, возникающих при его установке в цилиндр. В свободном состоянии кольцо имеет внешний диаметр больше, чем внутренний диаметр цилиндра. При установке кольцо принудительно сжимается до размера цилиндра, вследствие чего в материале возникают напряжения, а само кольцо стремится восстановить первоначальную форму, создавая радиальное давление на стенку цилиндра. Этот процесс описывается законом Гука, что позволяет применять классические методы

расчёта упругих элементов. Основное уравнение для вычисления радиального давления P кольца на цилиндр представлено выражением [8]:

Данная формула показывает, что давление прямо пропорционально модулю упругости и толщине кольца. Таким образом, материалы с более высокими значениями E , такие, как легированные стали или высокопрочные чугуны, обеспечивают более высокое радиальное давление при одинаковой величине деформации δ .

$$P = \frac{E \cdot t \cdot \delta}{D^2} \quad (1)$$

где: E -модуль упругости материала кольца;
 t -толщина кольца;
 δ -величина зазора между свободным состоянием кольца и его установленным состоянием;
 D -диаметр цилиндра.

В учебнике А.И. Колчина и В.П. Демидова [3] уделяется значительное внимание расчёту среднего удельного давления поршневых колец. Оно является важнейшим параметром, определяющим герметичность камеры сгорания. Среднее удельное давление зависит не только от упругих свойств кольца, но и от его геометрии, в частности, от соотношения высоты и толщины кольца, а также от величины начального замка.

Основная формула для расчета среднего удельного давления p_{cp} приведена в виде:

$$p_{cp} = 0,152 E \frac{A_0/t}{(D/t)(D/t - 1)^3} \quad (2)$$

где: A_0 – разность между величинами зазоров замка кольца в свободном и рабочем состояниях, м.

Допустимое среднее радиальное давление [4]:

- для компрессионных колец – 0,1–0,37 МПа;
- маслосъемных колец – 0,2–0,4 МПа.

Эти значения получены из опыта эксплуатации двигателей различных типов и учитывают компромисс между износом, потерями на трение и качеством уплотнения.

Эпюра давления по окружности цилиндра

В реальных двигателях давление по окружности не является равномерным. Неравномерность обусловлена рядом факторов:

- смещение замка;
- деформация кольца в канавке;
- неполная цилиндричность стенок;
- тепловые расширения;
- влияние давления газов.

Для бензиновых и дизельных двигателей принимаются различные формы эпюры давления поршневого кольца на стенку цилиндра, что обусловлено различиями в рабочих условиях и требованиях к уплотнению. Для построения графиков, иллюстрирующих распределение давления $p(\psi)$ (в МПа) поршневого кольца на стенку цилиндра в

зависимости от угла поворота ψ (от 0° до 180°), используются данные коэффициентов $\mu_k(\psi)$ для бензиновых и дизельных двигателей. Давление в каждой точке рассчитывается как произведение среднего давления P_{cp} на соответствующий коэффициент $\mu_k(\psi)$:

$$p(\psi) = p_{cp} \cdot \mu_k(\psi) \quad (3)$$

Эпюры давления имеют форму, напоминающую грушевидную или каплевидную линии, с характерными пиками нагрузки. Эти формы хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований, которые показывают, что максимальные нагрузки приходятся на зоны, расположенные примерно на $40-50^\circ$ от вертикальной оси.

На изображении представлены графики, иллюстрирующие распределение давления $p(\psi)$ (в МПа) поршневого кольца на стенку цилиндра в зависимости от угла поворота (рис 1а) [4]. Графики показывают изменение давления по окружности цилиндра, начиная с 0° до 180° .

Графики демонстрируют, как давление изменяется по окружности цилиндра, что важно для анализа герметичности и износа поршневых колец. Форма кривых может быть грушевидной или каплевидной, что характерно для распределения давления в поршневых кольцах.

Используя приведённые выше формулы и таблицы значений давления кольца, можно провести гармонический анализ функции $p(\psi)$ [10]. Для этого мы применили метод Рунге [11]. Этот метод позволяет разложить периодическую функцию в ряд Фурье, что полезно для анализа гармоник и выявления особенностей распределения давления.

Используя вычисленные коэффициенты, ряд Фурье для $\mu_k(\psi)$ можно записать в виде:
дизельный двигатель

$$\mu_k(\psi) \approx 1.16 - 0.23 \cos(\psi) + 0.46 \sin(\psi) + 0.12 \cos(2\psi) - 0.32 \sin(2\psi) - 0.57 \cos(3\psi) + 0.09 \sin(3\psi)$$

бензиновый двигатель

$$\mu_k(\psi) \approx 1.18 - 0.12 \cos(\psi) + 0.23 \sin(\psi) + 0.08 \cos(2\psi) - 0.15 \sin(2\psi) - 0.10 \cos(3\psi) + 0.05 \sin(3\psi)$$

Эти коэффициенты позволяют аппроксимировать функцию $\mu_k(\psi)$ и анализировать её гармонические свойства. Эти выражения позволяют строить эпюры давления с высокой точностью и использовать их в моделях износа, расчёте эффективной мощности и прогнозировании ресурса. Гармонический анализ особенно важен, так как он позволяет оценить не только средние значения давления, но и интенсивность колебаний, вызывающих динамические нагрузки на элементы ЦПГ.

Теоретические основы давления компрессионного поршневого кольца на стенку цилиндра при конструкции из двух полуколец

Альтернативная конструкция поршневого кольца — два независимых полукольца — позволяет изменить характер взаимодействия с цилиндром. В отличие от цельного кольца, которое имеет замковую щель и неравномерное распределение упругих напряжений, полукольца обладают высокой независимостью и допускают более равномерное распределение нагрузок. Для расчета удельного давления двух полуколец на цилиндр двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [12], если на каждое полукольцо действует сила F , необходимо учитывать площадь контакта между полукольцами и цилиндром.

Если два полукольца прижимаются к цилиндру с помощью дополнительной силы F , и мы не учитываем упругость материала, то расчет удельного давления будет основываться на суммарной силе, действующей на контактную площадь. В этом случае, если на каждое полукольцо действует сила F , то общая сила, прижимающая оба полукольца к цилиндру, будет $2F$.

Удельное давление p определяется по формуле:

$$p_{\square} = \frac{F}{S} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (6)$$

где: t – толщина кольца;
 D – диаметр цилиндра.
 F – сила, действующая на каждое полукольцо (в кН).

Два полукольца прижимаются к стенке цилиндра с помощью силы F , и предполагается, что давление распределяется равномерно по всей контактной поверхности, то эпюра давления на стенку цилиндра будет равномерной. Это означает, что давление p будет одинаковым по всей площади контакта полуколец с цилиндром. Таким образом, эпюра давления на стенку цилиндра будет равномерной, как показано на рисунке 16.

Важной особенностью этой конструкции является то, что при равномерном прижатии полукольца дают практически идеальную равномерную эпюру давления по всей длине контакта. В таком случае отсутствуют концентрации напряжений, характерные для традиционных колец, особенно в районе замка.

Равномерность давления приводит к следующим преимуществам:

- снижение локальных перегрузок;
- уменьшение износа зеркала цилиндра;
- снижение тепловых деформаций;
- улучшение условий смазывания;
- стабильность характеристик при высоких температурах.

Кроме того, отсутствие замковой щели устраняет характерную проблему — прорыв газов через зону замка. Это повышает эффективность уплотнения и способствует увеличению общей компрессии двигателя.

Дополнительные аспекты расчёта

Для двух полуколец следует учитывать:

- возможное микроскольжение между полукольцами;
- влияние формы канавки поршня;
- равномерность распределения смазки;
- температурные деформации при нагреве до 250–300 °С;
- работу в условиях переменного давления газов.

Несмотря на упрощённую модель, проведённые расчёты и данные литературных исследований подтверждают, что конструкция из полуколец обеспечивает значительно более равномерное распределение давления по стенке цилиндра, чем традиционные кольца.

Результаты и Обсуждение

Результаты проведённого теоретического анализа показали, что давление, формируемое традиционным поршневым кольцом на стенку цилиндра, напрямую связано с его упругими свойствами и геометрическими параметрами. Согласно закону Гука, при сжатии кольца возникают внутренние напряжения, которые и обеспечивают радиальное прижатие кольца к стенке цилиндра. На рисунке 1а представлена типичная эпюра давления для традиционного кольца, демонстрирующая выраженную неравномерность распределения нагрузки по окружности цилиндра. Наибольшие значения давления наблюдаются в зоне, противоположной замку кольца, а минимальные — в районе самого замка. Такая форма кривой приводит к локальным зонам повышенного износа и увеличивает вероятность прорыва газов.

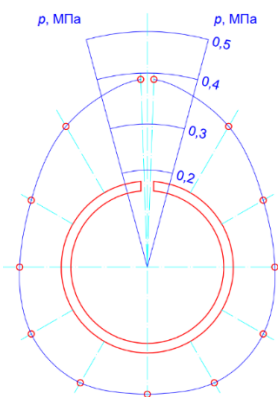
В отличие от этого, анализ конструкции из двух полуколец показал, что давление на стенку цилиндра распределяется практически равномерно по всей площади контакта. На рисунке 1б представлена эпюра давления для данной конструкции, подтверждающая отсутствие выраженных пиков и провалов нагрузки. Равномерность распределения является значительным преимуществом, так как снижает вероятность возникновения локальных перегрузок, уменьшает трение и способствует продлению ресурса цилиндро-поршневой группы. Полученные результаты позволяют сформулировать ряд рекомендаций по оптимизации конструкции поршневых колец. В частности, для повышения герметичности и снижения износа целесообразно использовать материалы с высоким модулем упругости E , что обеспечивает более стабильное радиальное давление при различных режимах работы двигателя. Важным фактором также является оптимизация геометрических параметров кольца — толщины t , высоты и диаметра D . Их корректный подбор позволяет сформировать благоприятную эпюру давления и снизить амплитуду колебаний нагрузки.

Кроме того, при проектировании новых конструкций необходимо учитывать форму эпюры давления, характерную для конкретного типа двигателя — бензинового или дизельного. Анализ распределения давления должен проводиться с использованием гармонического анализа, что позволяет более точно оценить влияние различных факторов на напряжённо-деформированное состояние кольца. Таким образом, применение двух полуколец или оптимизированной формы традиционного кольца может существенно улучшить эксплуатационные показатели двигателя.

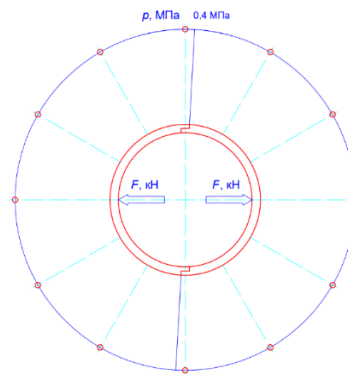
Полученные результаты исследования обладают высокой практической значимостью и могут быть использованы в различных направлениях развития и совершенствования двигателестроения. Прежде всего они представляют ценность для проектирования новых моделей поршневых колец, где требуется учитывать реальные данные о распределении давления, его неравномерности и влиянии конструктивных особенностей. Благодаря анализу эпюры давления можно разрабатывать кольца с оптимизированной формой профиля, улучшенной упругостью и сниженным коэффициентом трения. Такие усовершенствованные конструкции могут обеспечить более стабильную работу двигателя, уменьшение расхода масла и повышение общего ресурса цилиндро-поршневой группы.

Кроме того, полученные данные могут применяться для диагностики и оценки состояния поршневых колец в работающих двигателях. Сравнение фактических характеристик с теоретическими или расчетными моделями позволяет выявлять

аномалии в распределении давления, указывающие на износ кольца, деформацию канавки полости поршня или нарушения процесса смазывания. Это важно как для сервисного обслуживания, так и для разработки методик прогнозирования ресурса двигателя.



а) традиционное компрессионное поршневое кольцо



б) конструкции из двух полуколец

Рисунок 1. Эпюра давления компрессионного кольца на зеркало цилиндра

Не менее значимой является возможность использования результатов исследования при разработке усовершенствованных методик расчёта давления для двигателей, работающих в различных климатических и эксплуатационных условиях. Учитывая влияние температуры, скорости поршня, давления газов и состава смазочных материалов, можно создавать точные модели, позволяющие повысить эффективность проектирования и испытаний новых изделий.

Для углубленного понимания процессов, происходящих в зоне контакта «кольцо—цилиндр», целесообразно проводить дополнительные исследования. К ним относятся экспериментальные исследования, подтверждающие корректность теоретических построений и численных моделей, а также анализ влияния температуры и свойств смазки, поскольку термические деформации и толщина смазочной плёнки существенно влияют на эпюру давления. Кроме того, важно учитывать долговечность поршневых колец при различных режимах работы, что позволяет определить реальные ресурсы конструкции.

Равномерная эпюра давления, характерная для конструкции из двух полуколец, играет важную роль в снижении локальных перегрузок, уменьшении трения и стабилизации тепловых процессов. Это обеспечивает значительное улучшение долговечности элементов цилиндро-поршневой группы, повышение ресурса двигателя и увеличение его общей эффективности, что является особенно актуальным для современных силовых агрегатов, работающих при повышенных нагрузках и температурах.

Заключение

Проведённый теоретический анализ показал, что применение конструкции компрессионного поршневого кольца, выполненного в виде двух полуколец, обладает существенными преимуществами по сравнению с традиционным цельным кольцом. Основным отличием является значительно более равномерное распределение давления по стенке цилиндра, что было установлено на основе анализа эпюры давления и подтверждено

расчётными моделями. Отсутствие выраженных зон пиковых нагрузок позволяет снизить вероятность локального перегрева, уменьшить механические напряжения и предотвратить ускоренный износ цилиндро-поршневой группы.

Равномерная эпюра давления способствует улучшению условий трения и формирования смазочной плёнки, что положительно влияет на тепловой режим и устойчивость работы двигателя в различных условиях эксплуатации. Благодаря снижению локальных перегрузок применение конструкции из двух полуколец может обеспечить увеличение ресурса двигателя, уменьшение потерь на механическое трение и повышение общей герметичности камеры сгорания. Это особенно важно для современных силовых установок, работающих при высоких температурах, давлениях и частотах вращения.

Полученные результаты обладают практической значимостью и могут быть использованы при проектировании новых типов поршневых колец, оптимизации существующих конструкций и разработке методик анализа контактных давлений. Внедрение данных рекомендаций позволит повысить эффективность, экономичность и надёжность двигателей внутреннего сгорания.

Вклад авторов

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

Жаманбаев Б.У. — участие в разработке концепции исследования, оценка влияния геометрических и упругих параметров на эпюру давления, редактирование текста статьи, формирование научной интерпретации результатов.

Кокаев У.Ш. — сбор и систематизация справочных данных по цилиндро-поршневым группам, участие в анализе факторов, влияющих на давление и износ в зоне контакта «кольцо–цилиндр».

Сауханов Н.С. — подготовка графических материалов (эпюр давления, схем), участие в анализе распределения нагрузок и факторов трения, участие в обсуждении результатов и формулировании инженерных рекомендаций.

Бегимкулова Э.А. — участие в разработке концептуальной части исследования, формировании методологии сравнения традиционного поршневого кольца и конструкции из двух полуколец, обеспечение корректности формулировок и научного стиля

Список литературы

1. Устройство и работа поршневых ДВС: учеб. пособие / авт.-сост.: В. М. Басуров, В. С. Клевцов; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2020. – 131 с.
2. Чайнов Н. Д. Конструирование и расчет поршневых двигателей: учебник для вузов/ Н. Д. Чайнов, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков; под ред. Н. Д. Чайнова. - Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. - 536 с.: ил.
3. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов / А.И.Колчин, В.П.Демидов. – 4-е изд., стер. – М.: Высш.шк., 2008 – 496 с.: ил.
4. Иванов А.А., Петров, В.В. (2020). Влияние геометрии поршневых колец на

давления и износ стенок цилиндра. Журнал «Двигателестроение», 45(3), 12-18.

6. Сидоров, И.Н., Кузнецов, Д.М. (2021). Новая конструкция поршневого кольца для снижения трения и износа в ДВС: материалы международной конференции "Современные технологии в машиностроении", 78-85.
7. Smith, J. R., Brown, T. L. Advanced Piston Ring Designs for Improved Engine Performance // International Journal of Engine Research. – 2018. – Vol. 19. – № 5. – P. 512-525.
8. Zhang, Y., Wang, H. Numerical Analysis of Piston Ring-Cylinder Contact Pressure Distribution // Tribology International. – 2021. – Vol. 153. – P. 106-115.
9. Жернаков В.С. Сопротивление материалов – механика материалов и конструкций: учебник. – Уфа: УГАТУ, 2012. – 495 с.
10. Гинцбург Б.Я. Теория и расчет поршневых колец. М.: Машиностроение, 1945. - 127 с.
11. Скарборо Дж. Численные методы математического анализа, ГТТИ. 1934.
12. Nuralin B., Kuanyshev M., Murzagaliev A., Kaukarov A., Utebayev I. Evaluation of the ratios of the main indicators of The dry sealing of the cylinder-piston group of internal Combustion engines using a solid lubricant // Transport problems – 2022 – Vol. 17. – P. 99-110.
13. Каукаров А., Бакыт Г., Жаманбаев Б., Саменов Г., Забиева А., Сауханов Н. (2024). Повышение износостойкости и эффективности работы поршневого уплотнения двигателей внутреннего сгорания. Вестник ЕНУ. Серия: Технические науки и технологии, 148(3), 253–264. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-148-3-253-264>

А.К. Каукаров^{*1}, Б.У. Жаманбаев², У.Ш. Кокаев², Н.С. Сауханов¹, Э.А. Бегимкулова³

¹*Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.*

²*Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.*

³*Мұхамеджан Тынышбаев атындағы АЛТ Университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.*

Іштен жану қозғалтқышының цилиндріндегі компрессиялық поршеньдік сақиналарының қысымының таралуын салыстырмалы талдау

Аңдатпа. Мақалада іштен жанатын қозғалтқыштың цилиндр қабырғасына түсетін меншікті қысымның дәстүрлі компрессиялық поршеньдік сақина және екі жартысақинадан тұратын балама конструкция арқылы қалыптасуын салыстырмалы талдау ұсынылған. Зерттеудің негізгі бағыты — поршеньдік сақина мен цилиндр қабырғасы арасындағы жанасу қысымының қалыптасу және таралу теориялық аспектілерін талдау. Цилиндрге орнату кезіндегі сақинаның кернеулі-деформациялық күйін сипаттайтын математикалық модельдер келтірілген, сондай-ақ материал серпімділігін есепке алмай екі жартысақинаның қысымын есептеуге арналған жеңілдетілген тәсіл ұсынылған. Есептеулер нәтижесінде тұтас сақинада қысым эпюрасының біркелкі еместігі, яғни кейбір аймақтарда пиковое мәндердің болуы анықталды, бұл цилиндр-поршень тобы элементтерінің жылдам тозуына ықпал етуі мүмкін. Ал екі жартысақиналы конструкция үшін қысым біркелкі таралып, цилиндр қабырғасына тұрақты жүктеме түсіретіні байқалды. Бұл өз кезегінде жергілікті артық күштерді, үйкеліс пен жылулық деформацияны азайтады. Фурье қатары бойынша аппроксимация және графикалық тәуелділіктер модельдің нақты пайдалану жағдайларымен жақсы үйлесетінін көрсетеді. Сондай-ақ, жану камерасының герметикалығын арттырып, қозғалтқыштың қызмет ету мерзімін ұзартуға мүмкіндік

беретін сақиналардың материалы мен геометриялық параметрлерін таңдауға қатысты ұсыныстар берілген. Екі жартысақинадан тұратын конструкцияны қолдану ІЖҚ поршеньдік сақиналарын жетілдірудің перспективалық бағыты ретінде қарастырылады. Мақаладағы материалдар инженерлерге, зерттеушілерге және ЦПГ элементтерін жобалаушыларға пайдалы бола алады.

Түйін сөздер: іштен жанатын қозғалтқыш, компрессиялық поршеньдік сақиналар, жарты сақиналар, қысым эпюрасы, меншікті қысым.

A.K. Kaukarov¹, B.U. Zhamanbayev², U. Sh. Kokayev², N.S. Saukhanov¹, E.A. Begimkulova³

¹*Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Republic of Kazakhstan, Aktobe*

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

³*«ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshpayev, Republic of Kazakhstan, Almaty*

Comparative analysis of pressure distribution of compression piston rings in an internal combustion engine cylinder

Abstract. The article presents a comparative analysis of the specific pressure exerted on the cylinder wall by a traditional compression piston ring and an alternative design consisting of two half-rings. The study focuses on the theoretical aspects of the formation and distribution of contact pressure between the piston ring and the cylinder wall. Mathematical models describing the stress-strain state of the ring when installed in the cylinder are provided, along with a simplified approach to calculating pressure for the two half-ring design without considering material elasticity. The calculations revealed that the traditional solid ring produces a non-uniform pressure diagram with peak values, which may contribute to accelerated wear of cylinder-piston group (CPG) components. In contrast, the pressure distribution generated by the two half-ring configuration is uniform, ensuring consistent load on the cylinder wall and reducing localized overloads, friction, and thermal deformations. The graphical dependencies and Fourier series approximations confirm the model's agreement with real-world operating conditions. The paper also offers recommendations for selecting ring materials and geometric parameters to improve combustion chamber sealing and extend engine life. The authors emphasize that the implementation of a two half-ring configuration represents a promising direction for the modernization of piston rings in internal combustion engines, particularly under conditions of increased temperature and mechanical stress. The findings of this study may be of interest to engineers, researchers, and developers involved in the design and analysis of CPG components.

Keywords: internal combustion engine, compression piston rings, half-rings, pressure diagram, specific pressure.

References

1. Ustrojstvo i rabota porshnevyyh DVS: ucheb. posobie / avt.-sost.: V. M. Basurov, V. S. Klevcov; Vladim. gos. un-t im. A. G. i N. G. Stoletovyyh. – Vladimir: Izd-vo VIGU, 2020. – 131 p.
2. Chajnov N. D. Konstruirovaniye i raschet porshnevyyh dvigatelej: uchebnik dlya vuzov/ N. D. CHajnov, A. N. Krasnokutskij, L. L. Myagkov; pod red. N. D. CHajnova. - Moskva: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2018. - 536 p.: il.

3. Kolchin A.I. Raschet avtomobil'nyh i traktornyh dvigatelej: Ucheb. Posobie dlya vuzov / A.I.Kolchin, V.P.Demidov. – 4-e izd., ster. – M.: Vyssh.shk., 2008 – 496 p.: il.
4. Ivanov A.A., Petrov, V.V. (2020). Vliyanie geometrii porshnevnyh kolec na raspredelenie davleniya i iznos stenok cilindra. ZHurnal "Dvigatelsestroenie", 45(3), 12-18.
5. Sidorov I.N., Kuznecov, D.M. (2021). Novaya konstrukciya porshneвого kol'ca dlya snizheniya treniya i iznosa v DVS. Materialy mezhdunarodnoj konferencii "Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii", 78-85.
6. Smith J. R., Brown, T. L. Advanced Piston Ring Designs for Improved Engine Performance // International Journal of Engine Research. – 2018. – Vol. 19. – № 5. – P. 512-525.
7. Zhang, Y., Wang, H. Numerical Analysis of Piston Ring-Cylinder Contact Pressure Distribution // Tribology International. – 2021. – Vol. 153. – P. 106-115.
8. ZHernakov V.S. Soprotivlenie materialov – mekhanika materialov i konstrukcij: Uchebnik. – Ufa: UGATU, 2012. – 495 p.
9. Gincburg B.YA. Teoriya i raschet porshnevnyh kolec. M.: Mashinostroenie, 1945. - 127 p.
10. Skarboro Dzh. CHislenные metody matematicheskogo analiza, GTTI. 1934.
11. Nuralin B., Kuanyshev M., Murzagaliev A., Kaukarov A., Utebayev I. Evaluation of the ratios of the main indicators of The dry sealing of the cylinder-piston group of internal Combustion engines using a solid lubricant // Transport problems – 2022 – Vol. 17. – P. 99-110.
12. Kaukarov A., Bakyt G., ZHamanbaev B., Samenov G., Zabieva A., Sauhanov N. (2024). Povyshenie iznosostojkosti i effektivnosti raboty porshneвого uplotneniya dvigatelej vnutrennego sgoraniya. Vestnik ENU seriya: Tekhnicheskie Nauki I Tekhnologii, 148(3), 253–264. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-148-3-253-264>

Информация об авторах:

Каукаров А.К. – автор корреспондент, PhD, старший преподаватель кафедры «Транспортная техника, организация перевозок и стротельства», АРУ им. К. Жубанова, Актобе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: altynbek-79@mail.ru

Жаманбаев Б.У. – PhD, старший преподаватель кафедры «Транспорт, транспортная техника и технологии», ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, 010012, Республика Казахстан, e-mail: zhaman78@mail.ru.

Кокаев У.Ш. – кандидат технических наук, доцент. Декан транспортно-энергетического факультета, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, 010012, Республика Казахстан, e-mail: kokayev_ush@enu.kz.

Сауханов Н.С. – к.т.н., доцент кафедры «Транспортная техника, организация перевозок и стротельства», АРУ им. К. Жубанова, Актобе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: nurgazy.saukhanov@mail.ru.

Бегимкулова Э.А. – PhD, Заместитель директора по учебной работе института "Транспорт и строительство". АЛТ Университет им. М.Тынышпаева. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: eb_199292@mail.ru.

Каукаров А.К. – хат-хабар авторы, PhD, «Көлік техникасы, тасымалдауды ұйымдастыру және құрылыс» кафедрасының аға оқытушысы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік

университеті, Ақтөбе, 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: altynbek-79@mail.ru, 87016541115

Жаманбаев Б.У. – PhD, «Көлік, көлік техникасы және технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, 010012, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhaman78@mail.ru

Кокаев У.Ш. – Көлік-энергетика факультетінің деканы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент. Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, 010012, Қазақстан Республикасы, e-mail: kokayev_ush@enu.kz

Сауханов Н.С. – техника ғылымдарының кандидаты, «Көлік техникасы, тасымалдауды ұйымдастыру және құрылыс» кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurgazy.saukhanov@mail.ru.

Бегимкулова Э.А. – PhD, "Көлік және құрылыс" институты директорының оқу ісі жөніндегі орынбасары. М.Тынышпаев атындағы АЛТ Университет. Алматы, 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: eb_199292@mail.ru.

Kaukarov A. K. - PhD, senior lecturer of the Department «Transport Equipment, Organization of Transportation and Construction», ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: altynbek-79@mail.ru

Zhamanbayev B.U. - PhD, Senior lecturer of the Department of Transport, Transport Equipment and Technologies, ENU named after L.N. Gumilyov, Astana, 010012, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhaman78@mail.ru

Kokaev U.S. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Dean of the Faculty of Transport and Energy, L.N. Gumilyov ENU, Astana, 010012, Republic of Kazakhstan, e-mail: kokayev_ush@enu.kz. Saukhanov N. S.- Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Engineering, Organization of Transportation and Construction, ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurgazy.saukhanov@mail.ru.

Begimkulova E.A. – PhD, Deputy Director for Academic Affairs at the Institute of Transport and Construction. ALT University named after M.Tynyshpaeva. Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: eb_199292@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/>).



IRSTI 67.07.29

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-124-138>

Review

Semiotics of space in ecological agroarchitecture

I.I. Ostapenko¹ , N.S. Seitova¹ , D.G. Dyussenova¹ ,
A.M. Yessenbayev*² 

¹*International Educational Corporation (KazLAACE), Almaty, Kazakhstan*

²*S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan*

*E mail: yess.arken@gmail.com, d.diussenova@kazgasa.kz, Ostapinna@mail.ru,
mrsous07@gmail.com*

Abstract. In the context of worsening environmental problems, modern architecture is turning to the search for new models of interaction with nature. Ecological agroarchitecture, combining sustainable design, agrotechnology and the philosophy of nature-oriented thinking, is becoming one of the relevant areas. The purpose of this study is to consider the architectural space of the agroecological type as a semiotic system capable of translating the values of sustainability, memory and cultural identity. The work focuses on objects where the principles of bioesthetics, environmental ethics and symbolic expression intersect, such as energy – intensive buildings, memorial complexes and biomorphic pavilions. The methodology is based on an interdisciplinary approach combining architectural semiotics, environmental design and cultural and philosophical analysis. The results show that architectural forms of agroarchitecture have symbolic potential: they visualize natural processes and convey the ideas of cyclicity, rebirth and belonging.

The research contributes to the development of the concept of architectural space as a meaningful system and can be applied in the design of objects integrated into the ecological and cultural context.

Keywords: semiotics, agroarchitecture, architecture, symbolism, sustainability, cultural memory, bioesthetics.

Introduction

In recent years, environmental issues have been increasingly included in the architectural agenda, forming a new design paradigm focused on human harmony with the environment. Against this background, a special trend is being formed – ecological agroarchitecture, which arose at the intersection of sustainable design, agricultural technologies and the philosophy of nature-based thinking. Architecture in this context is considered not only as a physical shell, but also as an expressive means capable of conveying meanings, images, cultural archetypes and values [1, 2]. It is in this field that the application of the semiotic approach is actualized, which makes it possible to explore architectural space as a system of signs and symbols through which the ideas of memory, interaction with the living and environmental ethics are transmitted.

Despite the growing interest in sustainable construction in Kazakhstan, systemic research combining agroecological architecture and semiotics is still in its infancy. Today, there is a shortage of scientific papers that reveal how architectural forms can perform not only a utilitarian, but also a semantic function – to become carriers of the cultural code and ecological consciousness. This fact underlines the relevance of further research in this area.

The study aims to identify how agroecological architecture is able to perform communicative and symbolic functions, becoming a space of expression of cultural and natural values.

The object is architectural objects of agroecological purpose (including memorial complexes, biomorphic structures and energy – intensive buildings), the subject is the mechanisms and forms of semiotic content manifestation in their spatial organization.

The hypothesis is that the agroarchitectural space can be considered as a complex sign system capable of forming a conscious attitude towards nature, memory and sustainability in humans.

Research objectives include:

- systematization of theoretical approaches to architectural semiotics and agroecodesign;
- analysis of existing examples of spaces integrating semiotic and ecological principles;
- development of methodological foundations for identifying iconic structures in architecture;
- drawing conclusions about the symbolic potential of agroecological facilities.

The methodology

The methodology is based on interdisciplinary synthesis – a set of methods is used, including:

- architectural and semiotic analysis;
- bioesthetic interpretation of shapes and images;
- methods of sustainable design and cultural coding.

Both theoretical sources and empirical material are used – projects of modern agroecological complexes. Methods of comparative analysis, meaningful interpretation, as well as visual and graphical analysis tools using specialized software are used.

The research material covers both international and Kazakhstani examples of agroecological architecture, presented in various degrees of maturity – from conceptual models to realized objects. Quantitative parameters reflect the scale, structure, and principles of space organization, while qualitative parameters reflect the level of symbolic expressiveness and integration with the natural environment. The present study is not limited to analyzing existing examples, but offers the author's concept of the semiotic code of agroarchitecture, in which architectural forms are considered as carriers of symbolic meanings associated with the cycles of nature and cultural identity. The main hypothesis is that semiotic forms can enhance the ecological perception of the environment, forming an emotional and ethical attitude of a person to nature through architecture.

Findings/Discussion

1. Theoretical foundations of semiotics of architecture and nature

Semiotics, as the science of signs, studies how cultural elements convey information. Architecture is one of the most ancient and stable sign systems in which the physical form carries cultural, emotional, and ideological meanings. Space becomes a communication platform that transmits messages through form, material, composition, color, scale, and position in the landscape.

The semiotics of architectural space suggests that each element can be considered as a sign.:

- The column can symbolize strength and stability,
- glass facade – openness and transparency,
- A vibrant green facade – interaction with nature and caring for the environment.

When it comes to ecological architecture, the semiotic field becomes more complicated: architectural forms become mediators between nature and culture. Space begins to speak the language of biological processes – growth, photosynthesis, regeneration, symbiosis. These biological and ecological processes become cultural codes, turning into new forms of expression of architectural memory and meaning.

2. Space as a semiotic system in agroarchitecture

Ecological agroarchitecture is a design direction based on the principles of permaculture, symbiotic integration of agricultural systems, the use of natural and recycled materials, renewable energy sources, as well as passive energy conservation technologies. Within the framework of this approach, architecture ceases to be just a living space or a functional structure – it becomes an integral part of ecological processes, capable of self-renewal, interaction with the environment and sustainable existence.

Spatial composition in agroarchitecture is being filled with a new meaning [3]:

1. Roofs are turning into productive green surfaces – urban farms and gardens;
2. Facades acquire the function of "living walls" that filter the air and improve the microclimate;
3. Courtyards and open spaces become ecosystems that support biodiversity.

Each element acquires a symbolic dimension.:

1. The earth is a metaphor for roots, continuity and sustainability;
2. Water is associated with life, purification, and the continuous passage of time.;
3. Plants symbolize growth, transformation, and the cyclical nature of existence.

In this context, the architectural space loses its neutrality and becomes an expressive mediator of meanings. It begins to "speak" – visually, symbolically and ecologically, forming a new sign system where each element carries a message of care, memory and unity with nature.

Thus, in agroarchitecture, semiotic forms act not only as metaphorical, but also as functional structures. For example, biomorphic pavilions not only symbolize organic life but also serve as microclimatic systems that regulate humidity and temperature. This allows us to talk about a bio-semiotic synthesis, where the sign and function coincide: the environmental efficiency of an object becomes its symbol. The research suggests a classification of such forms: Bioiconic shapes – visually refer to natural structures (leaf, spiral, root), ecosymbolic forms express the principles of cyclicity, regeneration, and closed circuit, memorial forms create a connection between nature, memory and the cultural code of the territory.

3. Memorial forms in agroarchitecture: Meaning, innovation and symbolism

The Flora Robotica Project

The Flora Robotica project is a biohybrid system that combines living plants and distributed robots to create architectural objects and spaces. The project aims to develop living architectural systems with functions of self-healing and self-organization. Robots and plants work together to form organic structures that adapt to the needs of their inhabitants.



Figure 1,2. Images of robots caring for plants and fruits
(<https://www.bayer.com/en/agriculture/article/smart-farming-revolution>)

Energy-efficient buildings as an architecture of ecological memory

The Broom building in Finland

The Broom building in Joensuu, built in 2004 for the Finnish Forest Research Institute, is an example of energy-intensive architecture. Wood was chosen as the main material for the construction, which emphasizes the concept of sustainable development and the recycling of materials. The building has received several awards for innovative use of wood and energy conservation.



Figure 3. The Broom building
(<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Metla2009.jpg>)

CopenHill Plant in Denmark

CopenHill in Copenhagen is a waste-to-energy plant that combines environmental and community functions. There is a ski slope on the roof of the factory, and a climbing wall adorns the

facade. The building is equipped with a green roof, contributing to the creation of an urban ecosystem and improving air quality.



Figure 4. CopenHill plant

(<https://www.architonic.com/es/story/solarlux-the-winners-of-the-design-educates-awards-will-be-honoured-at-architecture-in-foyer-/20218549>)

Memorial pavilions and gardens: Spaces of silence and memory

Ryazan VDNH in Russia

Ryazan VDNKH is an exhibition complex built in 1955 to showcase the achievements of the national economy. The complex includes 22 pavilions in the late Stalinist Empire style, spread over an area of 9.6 hectares. In 2021, the ensemble received the status of an architectural monument and was taken under state protection.



Figure 5. Ryazan VDNKh

(<https://fondvnimanie.ru/news/81/vlasti-sdelali-pervyy-shag-k-spaseniyu-ryazanskoy-vdnh>)

The City of Migratory Birds project in Kazakhstan

The City of Migratory Birds project is being implemented in Kostanay, aimed at creating public spaces symbolically associated with various bird species. Each square or park represents a particular bird and includes elements reflecting its characteristics. The project promotes environmental education and the formation of a green framework of the city.

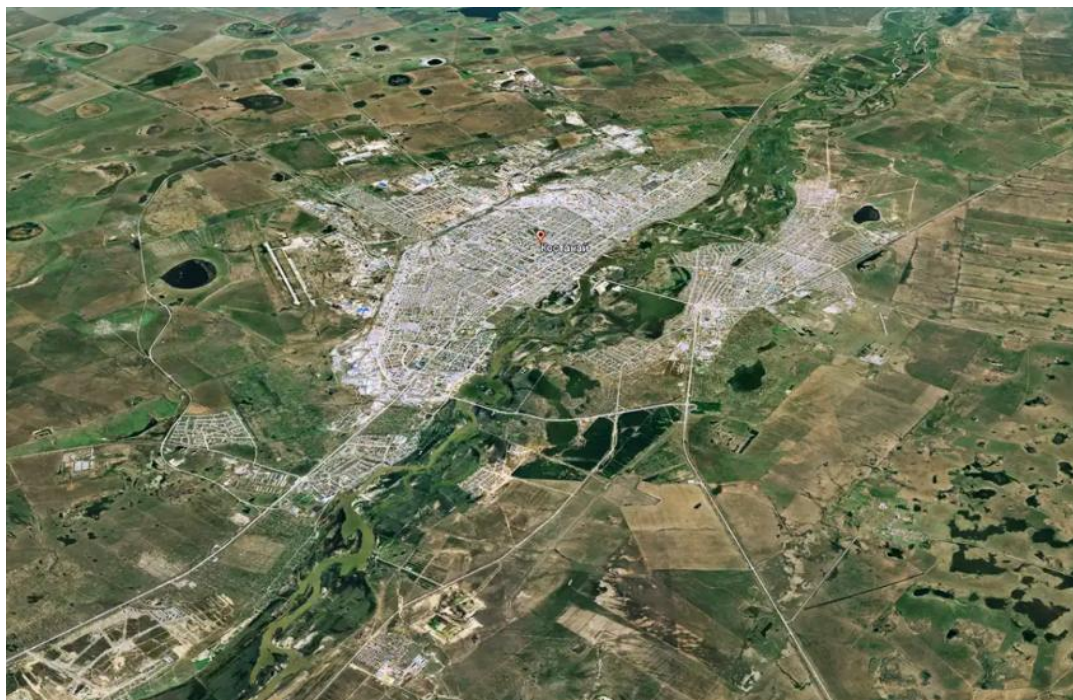


Figure 6. View of the city of Kostanay
(<https://designer.kz/2024/11/kostanay-is-a-city-of-migratory-birds/?ysclid=m9q3hwc8h364140952>)

4. Conceptual and design proposals

Based on the analysis, the author has developed a conceptual model of “Eco-SemioSpace”, suggesting that an architectural space can be considered as a system of signs, where each element carries a certain meaning.:

1. The material symbolizes origin and resourcefulness (for example, clay = locality, wood = life, metal = adaptability);
2. The form expresses a person's attitude to nature (open forms – trust, closed forms - protection);
3. The landscape becomes a text of memory, where plants and water play the role of symbols of time and purification.

The application of this model can become a methodological basis for the design of agroecological complexes in Kazakhstan, especially in areas of restoration of degraded landscapes. This conceptual approach has been tested through the author's visualization of a memorial park (Fig. 7), demonstrating how form, material and landscape can embody symbolic meanings in real design practice.

Based on the above examples, several areas of innovative architectural solutions can be identified:

1. Potemkin Memorial Agropark – integration of steel and natural elements to create a space of reflection and connection with nature [4].
2. Biohybrid pavilion "Flora Robotica" – the use of living plants and robots to form adaptive and self-organizing spaces.
3. Energy – efficient Broom building - the use of wooden structures and sustainable technologies to reduce energy consumption and environmental impact.
4. CopenHill plant with public functions – transformation of an industrial facility into a center of public life with ecological and recreational areas.
5. Memorial Complex of Ryazan VDNH – preservation and restoration of the historical exhibition complex as a monument of architecture and culture.
6. The ecological project "City of Migratory Birds" is the creation of thematic public spaces dedicated to various bird species in order to raise environmental awareness and improve the urban environment.



Figure 7. Conceptual sketch of an eco-semiotic memorial park in Kazakhstan. The composition reflects the principles of Eco-SemioSpace, where landscape forms, materials, and ornaments embody ideas of nature's cyclicity, memory, and sustainability, created using a neural network: <https://www.artguru.ai/ru/>

The image shows a small memorial complex made in the spirit of ecological agroarchitecture using Kazakh ornamental semiotics. The space is organized in the form of a master plan, where the shapes of the landscape, paths, ponds and green spaces refer to the traditional symbols of Kazakh culture. The central element is a pyramid-shaped monument with an ornament symbolizing the spiritual connection of generations. Nearby there are areas with vegetation, decorated in the form

of stylized ornaments and waves, which emphasizes the idea of the unity of nature, memory and cultural identity [5].

5. Future Perspectives and Educational Potential of Agroarchitecture

The methodology proposed by the author for interpreting architecture as a semiotic system can be used in the design of educational and memorial agroecological spaces in Kazakhstan. For example, on academic campuses, landscaping elements and water bodies can carry symbolic meanings of national culture, forming an emotional connection between students and nature.

One of the underexplored aspects of ecological agroarchitecture is its potential in educational and research environments. Agroarchitectural spaces, with their capacity to demonstrate natural processes, energy efficiency, and ecological harmony, can become platforms for immersive learning [6]. Schools, universities, and research centers designed on agroecological principles can serve as interactive laboratories, where students and the public learn about sustainability through direct experience.

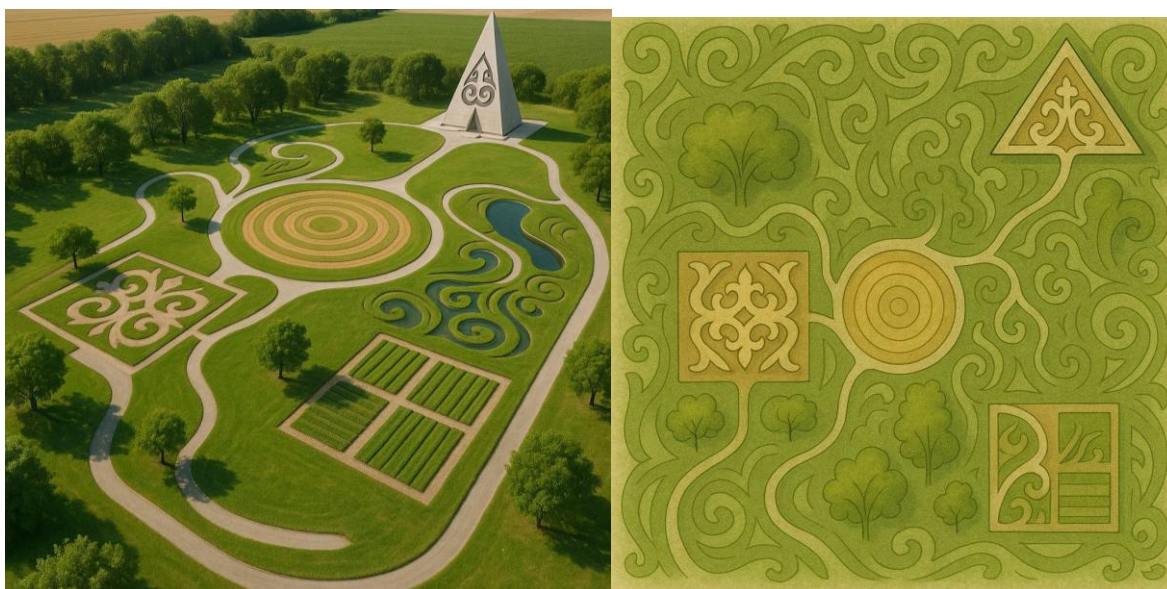


Figure 8. Schematic conceptual image of the author, created using a neural network:

<https://www.artguru.ai/ru/>

Such educational agrocomplexes may include:

1. Greenhouses powered by solar energy
2. Hydroponic and aquaponic systems
3. Wind energy stations
4. Thematic green learning zones with symbolic design elements

The design of these campuses can incorporate semiotic elements that reflect the values of environmental consciousness, responsibility, and innovation.

A vivid example is the “Earthship Academy” (USA), a self-sufficient educational facility where students build and study autonomous buildings made from natural and recycled materials. It introduces sustainable living practices and embeds symbolic meanings of autonomy, renewal, and cyclical balance between humanity and the planet [7].

Moreover, agroarchitecture can significantly influence urban planning, suggesting new hybrid formats of living that merge functionality, memory, and symbolic ecological expression. Future urban eco-districts may feature vertical gardens, rooftop agriculture, and culturally coded public spaces rooted in local traditions. Through architectural semiotics, such developments could communicate ideas of harmony, balance, and collective care for the Earth [8].

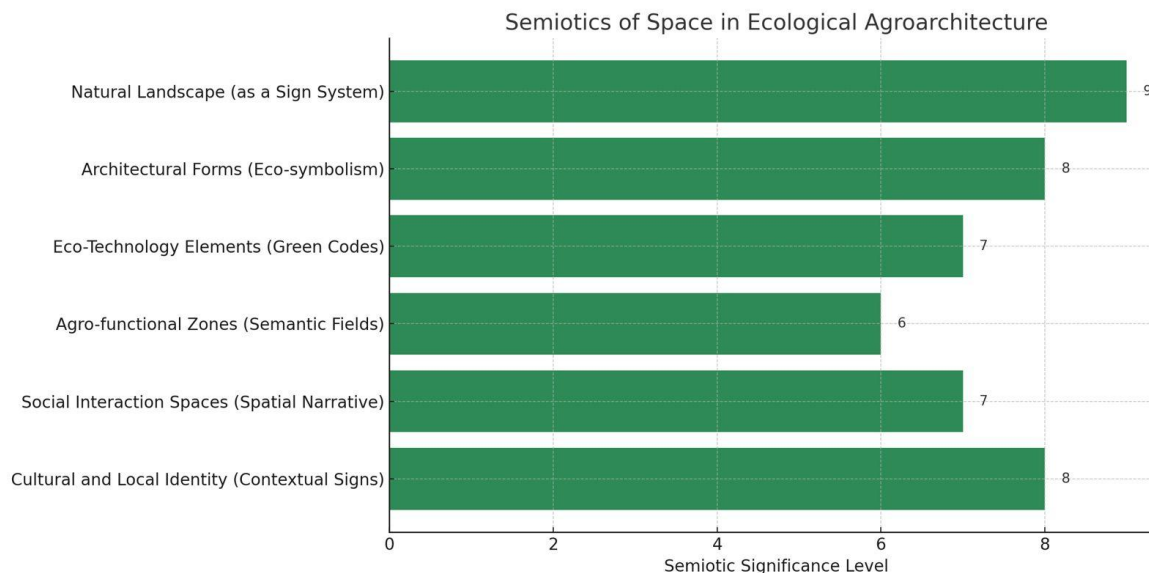


Figure 8. Semiotics of Space in Ecological Agroarchitecture

6. Additional Case Analysis: Earthship Biotecture

Earthship Biotecture, founded by architect Michael Reynolds, represents one of the most symbolic and sustainable directions in global ecological architecture. Built from used tires, glass bottles, and other recycled materials, Earthships are off-the-grid structures.

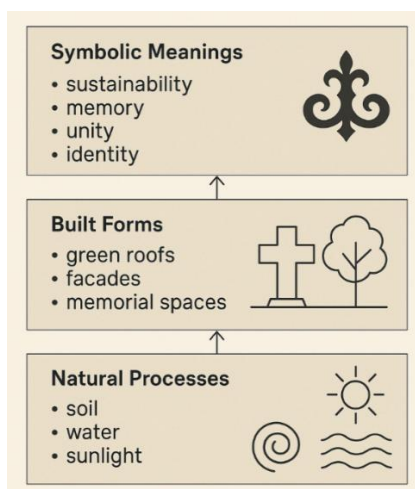


Figure 9. Symbolic Layers in Ecological Agroarchitecture, created by the author
They use:

1. Passive solar heating and cooling
2. Rainwater harvesting

3. Greywater recycling
4. Indoor food production
5. From a semiotic point of view:
6. Glass bottle walls = transparency, illumination
7. Reused tires = resilience, transformation
8. Earth-rammed walls = rootedness and protection

These materials symbolically transform waste into life, turning discarded objects into powerful messages of rebirth, self-sufficiency, and ecological reconciliation. Earthships are not only sustainable but also philosophical statements about how architecture can embody a different way of thinking about human-nature relationships.

Conclusion

In the context of growing global environmental concerns and the search for meaningful architectural responses, the semiotic study of space in ecological agroarchitecture reveals itself as both timely and deeply relevant. This paper demonstrates that agroarchitecture is not merely a convergence of sustainable technologies and rural design elements, but a new cultural and communicative phenomenon – a language of space where natural processes, symbols, and architectural forms interact in a unified ecological narrative.

Agroecological architecture goes beyond the utilitarian or technical. It is capable of conveying memory, identity, and environmental ethics through expressive spatial structures. Each element of design – whether a green roof functioning as an urban farm, a vertical garden filtering air, or a memorial pavilion rooted in cultural symbolism – contributes to a broader dialogue between human beings, nature, and history.

The semiotic approach proves essential in uncovering these hidden layers of meaning. Architecture becomes not only the background for life processes, but an active participant in shaping values and behaviors. Through its forms, materials, and spatial logic, it communicates ideas of regeneration, responsibility, and continuity. By encoding natural metaphors – such as growth (plants), stability (soil), flow (water), and cyclicity (seasons) – agroarchitecture fosters a more intuitive and emotional connection between humans and their environment.

The examples explored – from the Flora Robotica biohybrid systems to the Broom Building, CopenHill, and Kazakhstani initiatives like the City of Migratory Birds – show that architecture can become a living symbol, evolving with its users and surroundings. These projects exemplify how spatial forms can embody memorial potential, energy awareness, cultural heritage, and ecological interdependence simultaneously.

Moreover, the inclusion of local semiotic codes, such as Kazakh ornamental motifs, reveals the potential for architecture to maintain a dialogue between the past and the future, between tradition and innovation. Such a fusion offers a powerful model for architectural thinking in the Anthropocene – one that respects both cultural specificity and global sustainability imperatives.

The research has revealed that architectural elements within agroecological design acquire symbolic depth:

1. Green roofs are no longer mere technical solutions, but metaphors of growth, harmony, and coexistence.
2. Memorial spaces cease to be static commemorations and become living ecosystems of memory, where the past is reinterpreted through nature's processes – cyclicity, regeneration, and transformation.

3. Reused materials (as seen in Earthship Biotecture) not only reduce waste but symbolize rebirth, autonomy, and resilience.

From a semiotic standpoint, agroarchitecture functions as a language of sustainability, transmitting ideas such as the unity of nature and culture, the interconnectedness of people and place, and the redefinition of memory through ecological expression.

Furthermore, the incorporation of Kazakh ornamental semiotics in ecological design (as shown in the “City of Migratory Birds” project) demonstrates the potential of agroarchitecture to preserve national identity while promoting a green future. This synergy between tradition and innovation becomes a model for culturally sensitive ecological development.

In methodological terms, the interdisciplinary approach adopted in this work – blending semiotics, environmental design, bioesthetics, and philosophical interpretation – proves effective in analyzing architecture not just as a structure, but as a carrier of meaning, a space of memory, and a medium of transformation.

Thus, the author’s concept of the semiotic code of agroarchitecture allows us to consider ecological forms not only as technical solutions, but also as carriers of meanings capable of influencing human consciousness. The contribution of the research is to develop a model of the relationship between semiotics and environmental design, which opens up new perspectives for creating an architecture that combines ecology, culture and the philosophy of sustainability.

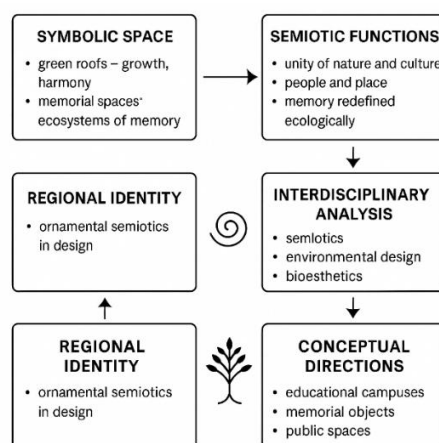


Figure 10. Semiotics of ecological agroarchitecture, created by the author

Research Significance and Contribution

This study contributes to the scientific discourse in several meaningful ways:

1. It systematizes the semiotic functions of agroecological architecture, offering a framework for analyzing space through layers of natural, constructed, and cultural meaning.
2. It identifies case studies (such as CopenHill, Broom, Flora Robotica, and Earthships) that exemplify the living interaction between ecological performance and symbolic resonance.
3. It proposes new conceptual directions for the design of educational, memorial, and public spaces grounded in sustainability and semiotic clarity.

Implications for Practice and Future Research. The practical implications are far-reaching: architects, urban planners, and educators can use the principles outlined in this research to create spaces that are not only environmentally efficient, but also emotionally and culturally expressive.

Agroarchitecture, when understood semiotically, becomes a bridge between generations, between technology and nature, between memory and innovation.

Future research may deepen this direction by exploring regional semiotic codes in ecological design, developing interactive educational campuses based on agroecological principles, and studying user perception of symbolic space in green environments.

Agroecological architecture, when approached through the lens of semiotics, becomes a multilayered language – a system where every space speaks, every form remembers, and every material resonates. It invites us to rethink the built environment not as a neutral container, but as a living mediator of values, stories, and responsibilities. This paradigm opens new pathways for design – where architecture becomes a tool for education, emotional resonance, and planetary care. The future of architecture lies not only in innovation, but in meaning – and agroarchitecture stands at the forefront of this meaningful future.

Acknowledgement, conflict of interests. The study was conducted using private sources of funding. The authors declare that there is no conflict of interest.

The contribution of the authors.

Ostapenko I.I. – data collection and analysis, text writing, team coordination, played a key role in the research methodology.

Seitova N.S. – collecting information, graphic design, writing text.

Dyussenova D.G. – collection of information, methodology, preparation of graphic materials, analysis, and manuscript review..

Yessenbayev A.M. – critical revision, formulation of scientific conclusions, editing of the final text.

All authors reviewed and approved the final manuscript and are responsible for ensuring the accuracy and integrity of the work.

References

1. Khelfand D. Design culture: symbols, signs and meanings in a person's visual environment. Moscow: Artemy Lebedev Studio, 2010. 224 p. - book
2. Ryskalieva A. S. Semiotic structures in the architecture of the urban environment on the example of Almaty, Kazakhstan // Actual problems of humanities and natural sciences. — 2021. — No. 5. — pp. 43-47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/semioticheskie-struktury-v-arhitekture-gorodskoy-sredy-na-primere-g-almaty-kazakhstan> - electronic link to the scientific article
3. Seitova A. Sh., Akhmetova Zh. A. Semiotic aspects of architecture of modern memorial and public complexes // Kazakhstansky architecturno-stroitelny vestnik. — 2020. — No. 2. — Pp. 88-93. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/semioticheskie-aspekty-arhitektury-sovremennyh-memorialnoobschestvennyh-kompleksov> - electronic link to the scientific article
4. O₂ Architects. Eco-architecture: the future of modern architecture in Kazakhstan // O₂ Architects. — 2023. URL: <https://o2-architects.kz/jeko-arhitektura-budushhee-sovremennoj-arhitektury-v-kazahstane> - electronic link to the review article
5. Baimagambetov A. E. Eco-architecture of Central Asia // Ecofund of the Republic of Kazakhstan. -2022. -No. 1.-pp. 15-21. URL: <https://ecogofond.kz/wp-content/uploads/2023/10/Jeko-arhitektura-Centralnoj-Azii.pdf> - electronic link to the scientific article

6. Abdrakhmanova N. K. Visual history and semiotics: on the issue of spatial culture // Bulletin of the Karaganda University. Series: History. Philosophy. — 2021. — № 4(104). — Pp. 77-83. URL: <https://history-philosophy-vestnik.buketov.edu.kz> - scientific journal in English
7. Jencks, Charles. *The Architecture of the Jumping Universe: A Polemic: How Complexity Science is Changing Architecture and Culture*. Academy Editions, 1995. URL: [https://www.academia.edu/23270641/Jencks the Architecture of the Jumping Universe](https://www.academia.edu/23270641/Jencks_the_Architecture_of_the_Jumping_Universe) - book
8. Pallasmaa, Juhani. *The Eyes of the Skin: Architecture and the Senses*. Wiley, 2012. URL: [https://www.academia.edu/34942239/THE EYES OF THE SKIN Architecture and the Senses](https://www.academia.edu/34942239/THE_EYES_OF_THE_SKIN_Architecture_and_the_Senses) - book

И.И. Остапенко¹, Н.Ш. Сеитова¹, Д.Г. Дюсенова¹, А.М. Есенбаев^{2*}

¹*Международная образовательная корпорация (КазГАСА), Алматы, Казахстан*

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

Семиотика пространства в экологической агроархитектуре

Аннотация. В условиях обострения экологических проблем современная архитектура обращается к поиску новых моделей взаимодействия с природой. Одним из актуальных направлений становится экологическая агроархитектура, сочетающая устойчивое проектирование, агротехнологии и философию природоориентированного мышления. Цель данного исследования – рассмотреть архитектурное пространство агроэкологического типа как семиотическую систему, способную транслировать ценности устойчивости, памяти и культурной идентичности. Работа акцентирует внимание на объектах, в которых пересекаются принципы биоэстетики, экологической этики и символической выразительности – таких как энергопассивные здания, мемориальные комплексы и биоморфные павильоны. Методология основана на междисциплинарном подходе, объединяющем архитектурную семиотику, экологическое проектирование и культурно-философский анализ. Результаты показывают, что архитектурные формы агроархитектуры обладают символическим потенциалом: они визуализируют природные процессы и передают идеи цикличности, возрождения и сопричастности.

Исследование вносит вклад в развитие концепции архитектурного пространства как смыслоносной системы и может быть применено при проектировании объектов, интегрированных в экологический и культурный контекст.

Ключевые слова: семиотика, агроархитектура, архитектура, символизм, экологичность, культурная память, биоэстетика

И.И. Остапенко¹, Н.Ш. Сеитова¹, Д.Г. Дюсенова¹, А.М. Есенбаев^{2*}

¹*Халықаралық білім беру корпорациясы (ҚазБСҚА), Алматы, Қазақстан*

²*С.Сейфуллин ат. Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан*

Экологиялық агроархитектурадағы кеңістіктің семиотикасы

Аңдатпа. Экологиялық проблемалардың шиеленісуі жағдайында қазіргі заманғы сәулет табиғатпен өзара әрекеттесудің жаңа модельдерін іздеуге бет бұрады. Өзекті бағыттардың бірі тұрақты дизайн, Агротехнология және табиғатқа бағытталған ойлау философиясын біріктіретін экологиялық агроархитектура болып табылады. Бұл зерттеудің мақсаты-агроэкологиялық типтегі архитектуралық кеңістікті тұрақтылық, есте сақтау және мәдени бірегейлік құндылықтарын аударуға қабілетті семиотикалық жүйе ретінде қарастыру. Жұмыс энергия пассивті ғимараттар, мемориалдық кешендер және биоморфты павильондар сияқты биоэстетика, экологиялық этика және символдық экспрессивтілік принциптері қиылысатын нысандарға назар аударады. Әдістеме архитектуралық семиотиканы, экологиялық дизайнды және мәдени-философиялық талдауды біріктіретін пәнаралық тәсілге негізделген. Нәтижелер агроархитектураның архитектуралық формаларының символдық әлеуетке ие екендігін көрсетеді: олар табиғи процестерді бейнелейді және циклдік, қайта туылу және қатысу идеяларын жеткізеді. Зерттеу мағыналық жүйе ретінде архитектуралық кеңістік тұжырымдамасының дамуына ықпал етеді және оны экологиялық және мәдени контекстке біріктірілген объектілерді жобалауда қолдануға болады.

Түйін сөздер: семиотика, агросәулет, сәулет, символизм, экологиялық таза, мәдени жады, биоэстетика

References

1. Khelfand D. Design culture: symbols, signs and meanings in a person's visual environment. Moscow: Artemy Lebedev Studio, 2010. 224 p. - book
2. Ryskalieva A. S. Semiotic structures in the architecture of the urban environment on the example of Almaty, Kazakhstan // Actual problems of humanities and natural sciences. — 2021. — No. 5. — pp. 43-47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/semioticheskie-struktury-v-arhitekture-gorodskoy-sredy-na-primere-g-almaty-kazahstan> - electronic link to the scientific article
3. Seitova A. Sh., Akhmetova Zh. A. Semiotic aspects of architecture of modern memorial and public complexes // Kazakhstansky architecturno-stroitelny vestnik. — 2020. — No. 2. — Pp. 88-93. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/semioticheskie-aspekty-arhitektury-sovremennyh-memorialnoobschestvennyh-kompleksov> - electronic link to the scientific article
4. O2 Architects. Eco-architecture: the future of modern architecture in Kazakhstan // O2 Architects. — 2023. URL: <https://o2-architects.kz/jeko-arhitektura-budushhee-sovremennoj-arhitektury-v-kazahstane> - electronic link to the review article
5. Baimagambetov A. E. Eco-architecture of Central Asia // Ecofund of the Republic of Kazakhstan. — 2022. — No. 1. — pp. 15-21. URL: <https://ecogofond.kz/wp-content/uploads/2023/10/Jeko-arhitektura-Centralnoj-Azii.pdf> - electronic link to the scientific article
6. Abdrakhmanova N. K. Visual history and semiotics: on the issue of spatial culture // Bulletin of the Karaganda University. Series: History. Philosophy. — 2021. — № 4(104). — Pp. 77-83. URL: <https://history-philosophy-vestnik.buketov.edu.kz> - scientific journal in English
7. Jencks, Charles. *The Architecture of the Jumping Universe: A Polemic: How Complexity Science is Changing Architecture and Culture*. Academy Editions, 1995. URL: [https://www.academia.edu/23270641/Jencks the Architecture of the Jumping Universe](https://www.academia.edu/23270641/Jencks_the_Architecture_of_the_Jumping_Universe) - book

8. Pallasmaa, Juhani. *The Eyes of the Skin: Architecture and the Senses*. Wiley, 2012. URL: [https://www.academia.edu/34942239/THE EYES OF THE SKIN Architecture and the Senses](https://www.academia.edu/34942239/THE_EYES_OF_THE_SKIN_Architecture_and_the_Senses) - book

Information about the authors:

Ostapenko I.I. - PhD, Associate Professor. Faculty of Architecture, IEC (KazLAACE), Ryskulbekov st., 28, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Seitova N.S. - Master's Student, Faculty of Architecture, IEC (KazLAACE), Ryskulbekov st., 28, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Dyussenova D.G. – master, Assistant Professor, Faculty of Architecture, IEC (KazLAACE), Ryskulbekov st., 28, 050000, Almaty, Kazakhstan.

Yessenbayev A.M. – corresponding author, PhD candidate, “Kazakh Agrotechnical research university named after S. Seifullin” NSC, Zhenis avenue 62, 010000, Astana, Kazakhstan.

Остапенко И.И. – доктор PhD, ассоциированный профессор факультета Архитектуры, Международная Образовательная Корпорация (КазГАСА), ул. Рыскулбекова, 28, 050000, г. Алматы, Казахстан.

Сеитова Н.С. – магистрант факультета Архитектуры, Международная Образовательная Корпорация (КазГАСА), ул. Рыскулбекова, 28, 050000, г. Алматы, Казахстан.

Дюсенова Д.Г. – магистр, ассистент профессора факультета Архитектуры, Международная Образовательная Корпорация (КазГАСА), ул. Рыскулбекова, 28, 050000, г. Алматы, Казахстан.

Есенбаев А.М. – автор для корреспонденции, докторант кафедры «Архитектуры и дизайна», НАО «КАТИУ имени С. Сейфуллина», пр.Женис 62, 010000, Астана, Казахстан.

Остапенко И.И. – PhD доктор, Сәулет факультетінің қауымдастырылған профессоры. Халықаралық Білім беру Корпорациясы (ҚазБСҚА), Рысқұлбеков к-сі, 28, 050000, Алматы, Қазақстан.

Сеитова Н.С. – Сәулет факультетінің магистранты, Халықаралық Білім беру Корпорациясы (ҚазБСҚА), Рысқұлбеков к-сі, 28, 050000, Алматы, Қазақстан.

Дюсенова Д.Г. – магистр, Сәулет факультетінің профессор ассистенті, Халықаралық Білім беру Корпорациясы (ҚазБСҚА), Рысқұлбеков к-сі, 28, 050000, Алматы қ., Қазақстан.

Есенбаев А.М. – хат-хабар авторы, «Сәулет және дизайн» кафедрасының докторанты, «С.Сейфуллин атындағы ҚАТЗУ» КеАҚ, Жеңіс даңғылы 62, 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/>)



ХҒТАР 31.15.35
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-139-151>

Орман өрттерін бақылауда ұшқышсыз ұшу аппараттарының деректерін өңдеу үшін Python бағдарламаларын пайдалану

Х.Молдамурат , Д.Калманова* , А. Базарбек , С.К.Атанов ,
Н. Ырыскелді 

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

*E mail: moldamurat@yandex.kz, dinara_kalmanova@mail.ru,
asyl.bazarbek.92@mail.ru, atanov5@mail.ru, n.yryskeldi@mail.ru*

Аңдатпа. Табиғи қауіпсіздіктің заманауи сын-қатерлері орман өрттері сияқты қауіп-қатерлерге жедел әрекет ету үшін инженерлік және ақпараттық технологияларды біріктіруді талап етеді. Перспективалы бағыттардың бірі-ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) геоақпараттық жүйелермен (ГАЗ) және деректерді өндіруге арналған бағдарламалық жасақтамамен бірге қолдану. Бұл жұмыста орман өрттерінің таралуын бақылау және болжау үшін Python тілінде іске асырылған бағдарламалық шешімді құру жобасы қарастырылады. Әр түрлі сенсорлармен жабдықталған үш дрон (мультиспектрлі камера, жылу түсіргіш, RGB камерасы) зарядтау уақытын ескере отырып, үздіксіз бақылауды қамтамасыз ететін кесте бойынша жұмыс істеді. Жүйенің ұсынылған архитектурасы оны әртүрлі географиялық жағдайлар мен міндеттерге бейімдеуге мүмкіндік береді. Нәтижелер графиктер, жылу карталары және кестелер түрінде ұсынылған, бұл жүйені операторлар мен талдаушылар үшін ыңғайлы етеді. Жұмыс «Инженерия және технология» бағыты шеңберінде өзекті болып табылады және экологиялық қауіпсіздік міндеттері үшін ақпараттық және инженерлік шешімдердің синтезін көрсетеді.

Түйін сөздер: пилотсыз ұшу аппараттары, орман өрттері, мониторинг, геоақпараттық жүйелер, мультиспектрлік түсірілім, тепловизор, пилотсыз технологиялар.

Кіріспе

Орман өрттері жыл сайын экологияға, экономикаға және адам өміріне айтарлықтай зиян келтіреді. Климаттың өзгеруі, температураның жоғарылауы және ұзаққа созылған құрғақшылық өрттің көбеюіне ықпал етеді, әсіресе жаз мезгілінде. Сондықтан өрт ошақтарын ерте анықтауға және олардың таралуын бақылауға қабілетті инженерлік шешімдерге қажеттілік артып келеді [1-2].

Инженерлік бақылау жүйелері цифрлық технологиялармен, соның ішінде ұшқышсыз ұшу аппараттарымен (ұшқышсыз ұшу аппараттары), сенсормен, спутниктік деректермен және үлкен деректерді талдау құралдарымен көбірек интеграциялануда [3-5]. Бұл жүйелер нақты уақыт режимінде орман алқаптарын бақылаудың автоматтандырылған шешімдерін жасауға мүмкіндік береді.

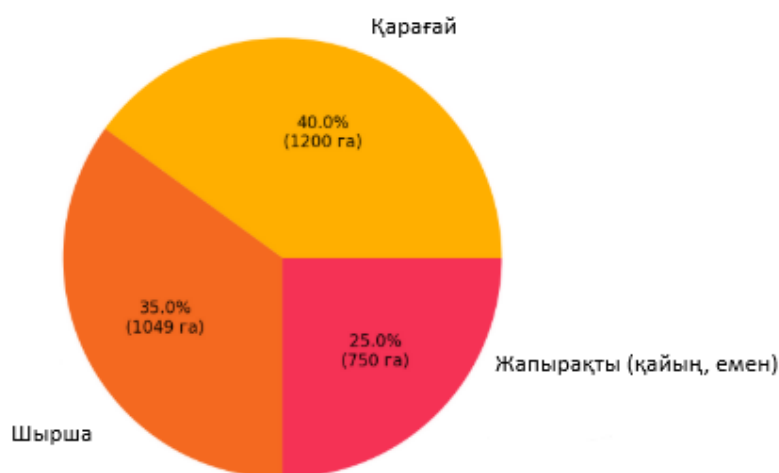
Python тілін және оның визуализациялық және аналитикалық кітапханаларын пайдалану икемді жүйені құруға мүмкіндік береді, онда әрбір элемент — түсірілімнен аналитикаға дейін — нақты тапсырмаларға бейімделеді. Бұл тұрғыда ұшқышсыз ұшу аппараттары қол жетімді емес аймақтарда деректерді жинауға қабілетті мобильді сенсорлық платформаларға айналады [6-8].

Бұл жұмыс ҰҰА деректерімен жұмыс істейтін және карталар мен графиктер түрінде нәтижелер беретін бағдарламалық ГАЗ жүйесінің прототипін әзірлеуге және көрсетуге бағытталған [9-10]. Негізгі міндет-нақты уақыт режимінде өрт қаупін бағалау және минималды энергия шығындарымен тиімді бақылау маршруттарын жоспарлау.

Зерттеу аумағы және деректер

Тұжырымдаманы сынау үшін үш секторға бөлінген 3000 гектар шартты орман алқабы таңдалды. Әр сектор координаталық шекараларды, өсімдік тығыздығын және климаттық параметрлерді алды. Шілде айының ауа-райына байланысты (температура 26-32°C, ылғалдылық 30-45%, жел 4 м/с дейін) өрт қаупінің индексі анықталды.

Сонымен қатар, орманның тұқымдық құрамы ескерілді: А секторында қарағай, В секторында шырша, С секторында жапырақты ағаштар (қайың, емен) басым болды (сурет 1). Отырғызу тығыздығы да әр гектарға 800-ден 1200 ағашқа дейін өзгерді. Бұл деректер жану индексі мен жылу жинақталуын есептеуге әсер етті, бұл өрт ошақтарын болжау үшін өте маңызды.



1-сурет. Орманның тұқымдық құрамы және ауданы бойынша таралуы

Бақылау үшін қолданыстағы коммерциялық қол жетімді модельдердің сипаттамалары бірдей, бірақ нақты өндірушілерді көрсетпейтін үш шартты дрон түрі (D1, D2, D3) қолданылды. Сипаттамалары:

- Бірінші дрон (көп спектрлі камера): салмағы 1.6 кг, ұшу қашықтығы 7 км-ге дейін, батареяның қызмет ету мерзімі 40-45 мин, ұшу биіктігі 120 м, өлшемі: 35×35×18 см, батарея сыйымдылығы: 6200-6800 мА·с (6s LiPo, 22.2 V).

- Екінші дрон (тепловизор): салмағы 1,5 кг, диапазоны 6 км-ге дейін, биіктігі 100 м, ұшу ұзақтығы 40 мин, өлшемі: 30×30×15 см, батарея сыйымдылығы: 5500-6200 мА·с (6s LiPo, 22.2 V).

- Үшінші дрон (RGB камерасы 4K): салмағы 1.4 кг, диапазоны 5 км-ге дейін, ұшу уақыты 35-40 мин, биіктігі 80 м, өлшемі: 28×28×14 см, батарея сыйымдылығы: 4800-5500 мА * с (4s LiPo, 14.8 V немесе 6s LiPo, 22.2 V).

Бұл зерттеуде секторлар бойынша тәуекел карталары мен уақыттық графиктерді құру үшін метеорологиялық және ормандық параметрлерге негізделген жеңілдетілген интегралды өрт тәуекел индексінің формуласы қолданылды, бұл әдіс Канадалық өрт ауа райы индексі (FWI), Нестеров индексі және орман пирометриясының ұлттық нұсқаулары сияқты өрт қауіптілігін бағалаудың жалпы қабылданған әдістеріне сүйене отырып әзірленген.

Әрбір нүкте мен күн үшін тәуекелдің жалпыланған индексі мына формула бойынша есептелді:

$$R = \alpha T_{norm} + \beta(1 - H_{norm}) + \gamma W_{norm} + \delta D_{norm} \quad (1)$$

мұнда:

R - интегралды тәуекел индексі (0-1 диапазонында);

T_{norm} - қалыпты ауа температурасы;

H_{norm} - қалыпты салыстырмалы ылғалдылық;

W_{norm} - қалыпты жел жылдамдығы;

D_{norm} - сүректің тығыздығы (нормаланған мәні);

α, β, γ, δ - факторлардың салмақ коэффициенттері (жалпы = 1)

Біздің есептеу үшін салмақ коэффициенттері төменде сипатталған (кесте 1)

1-Кесте. Салмақ коэффициенттері

Параметр	Белгілеу	Салмақ
Ауа температурасы	α	0.4
Ауаның ылғалдылығы (кері пропорционалды)	β	0.3
Желдің жылдамдығы	γ	0.2
Отырғызу тығыздығы (орман жүктемесі)	δ	0.1

Әрбір параметр 0-1 диапазонында сызықтық шкала бойынша қалыпқа келтірілді:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (2)$$

мұнда X - әрбір параметр 0-1 диапазонында сызықтық шкала бойынша қалыпқа келтірілді.

$X_{\min}, X_{\max}$ - үлгі бойынша минималды және максималды мәндер (мысалы, ай немесе аймақ бойынша).

Орман алқабы шартты түрде үш секторға бөлінді және әр секторға ағаш жамылғысының түрі мен отырғызу тығыздығына байланысты сипаттама берілді. А секторында қылқан жапырақты, ересек ағаштар басым, бұл аймақтағы отырғызу тығыздығы салыстырмалы шкала бойынша 0.8-ге тең деп қабылданды. В секторы аралас түрдегі орманмен сипатталады, яғни жапырақты және қылқан жапырақты ағаштар орташа тығыздықта өседі; бұл сектор үшін отырғызу тығыздығы 0.6 деңгейінде белгіленді. Ал С секторы сирек орналасқан, жас ағаштардан тұрады және оның тығыздығы шартты түрде 0.4 деп бағаланды. Бұл көрсеткіштер өрт қаупін бағалау формуласының құрамына енгізіліп, жалпы тәуекел индексіне үлесін қосты.

2025 жылдың шілде айына арналған есептеулер үшін температура, ауа ылғалдылығы мен жел жылдамдығы сияқты метеорологиялық көрсеткіштердің шартты мәндері пайдаланылды. Атап айтқанда, 5 шілдеде ауа температурасы 26°C, 15 шілдеде — 33°C және 25 шілдеде — 27°C деңгейінде болды. Бұл көрсеткіштер алдыңғы жылдардың орташа мәліметтеріне (мысалы, NOAA және Copernicus көздері) сүйене отырып алынған. Ауа ылғалдылығы сәйкесінше 45%, 28% және 42% болды, бұл параметр индекс есебінде кері пропорциямен ескеріледі, яғни ылғалдылық неғұрлым төмен болса, өрт қаупі соғұрлым жоғары. Жел жылдамдығы да айтарлықтай рөл атқарады: 5 шілдеде — 3.1 м/с, 15 шілдеде — 5.4 м/с және 25 шілдеде — 3.0 м/с болып тіркелді.

Әдіснама

Қауіпсіздікті қамтамасыз ету және соқтығысу ықтималдығын болдырмау үшін барлық үш ұшқышсыз ұшу аппараттары белгіленген маршруттық бақылау секторларына бөлінді. Әрбір дрон өзіне тағайындалған аймақ — А, В немесе С шегінде және белгілі бір ұшу биіктігінде қатаң әрекет етеді. Олардың әрқайсысы берілген траектория бойынша өз секторының ұшуын дербес орындайды. Биіктіктерді есепке алу қиылыстарды болдырмайды және маршруттарды оңтайландырады.

Мысалы, 1 формула бойынша А секторы үшін 15 шілде күні есептелген өрт қаупінің интегралдық индексі R мәні 0,814-ке тең болды. Бұл жоғары тәуекел деңгейін көрсетеді және ол жоғары температура (33 °C), төмен ауа ылғалдылығы (28%) және орташа жоғары жел жылдамдығы (5,4 м/с) сияқты қолайсыз метеожағдайлардың, сондай-ақ ағаш отырғызу тығыздығының (0,8) жоғары болуына байланысты қалыптасты.

Маршруттар мен кесте батареяның шектеулерін ескере отырып жасалған (ұшу уақыты ~45 минут, зарядтау ~60 минут). Әрбір Бақылау күнінің басында сағат 10: 00-де барлық үш дрон толық қамту үшін бір уақытта іске қосылады. Бірінші циклден кейін бір дрон зарядтауға ауысады, ал қалған екеуі бақылауды жалғастырады. Әрі қарай, дрондар схема бойынша ауысады: екеуі ұшуда, біреуі қайта зарядтауда, сағат 20.00-ге дейін үздіксіз қамтуды қамтамасыз етеді. Маршруттар мен кесте батареяның шектеулерін ескере отырып жасалған (ұшу уақыты ~45 минут, зарядтау ~60 минут). Күн сайын сағат 10.00 — ден 20.00-ге дейін екі ұшқышсыз ұшу, біреуі зарядта. Уақытты циклдік бөлу бүкіл аумақты тұрақты қамтуды қамтамасыз етті.

Интерактивті карта Folium көмегімен жүзеге асырылады және тәуекел аймақтарын көрсетеді (түсті кодтау: жасыл — төмен, қызғылт сары — Орташа, Қызыл — жоғары). Деректер әр сектор бойынша кестеде жинақталған: тәуекел деңгейі, бақылау уақыты, ұшу

саны және сенсор түрі.

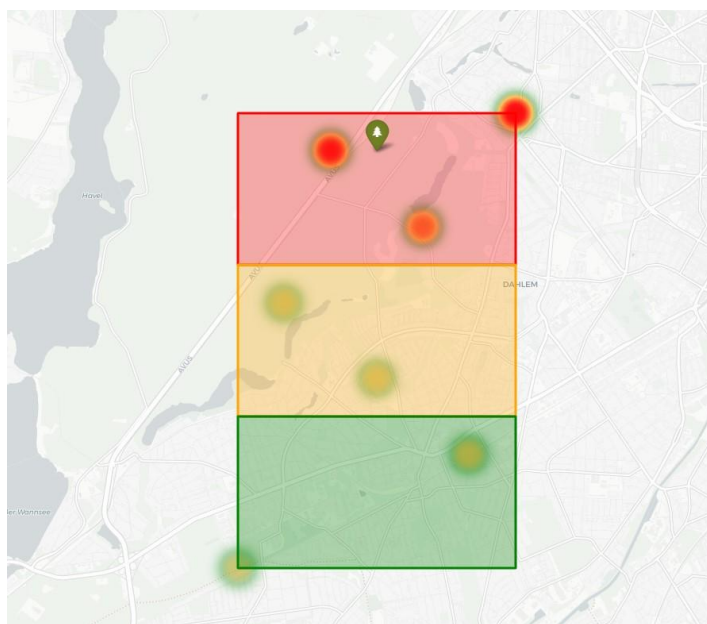
Pandas пайдалану ақпаратты уақытша слоттарға (15 минут) біріктіруге және дрондардың белсенділігін көрсететін жылу диаграммаларын құруға мүмкіндік берді. Matplotlib аппараттық жүктеменің сызықтық графиктерін және уақыт тәуекел терезелерін құру үшін қолданылады.

Кестенің таралуы төмендегі 2-кестеде келтірілген:

2- Кесте. Дрондардың уақыт әрі цикл бойынша ұшуы

Уақыт	Белсенді дрондар (ұшу кезінде)	Зарядталып жатқан дрон
10:00–10:45	D1, D2, D3	–
11:00–11:45	D1, D2	D3
12:00–12:45	D1, D3	D2
13:00–13:45	D2, D3	D1
14:00–14:45	D1, D2	D3
15:00–15:45	D1, D3	D2
16:00–16:45	D2, D3	D1
17:00–17:45	D1, D2	D3
18:00–18:45	D1, D3	D2
19:00–19:45	D2, D3	D1

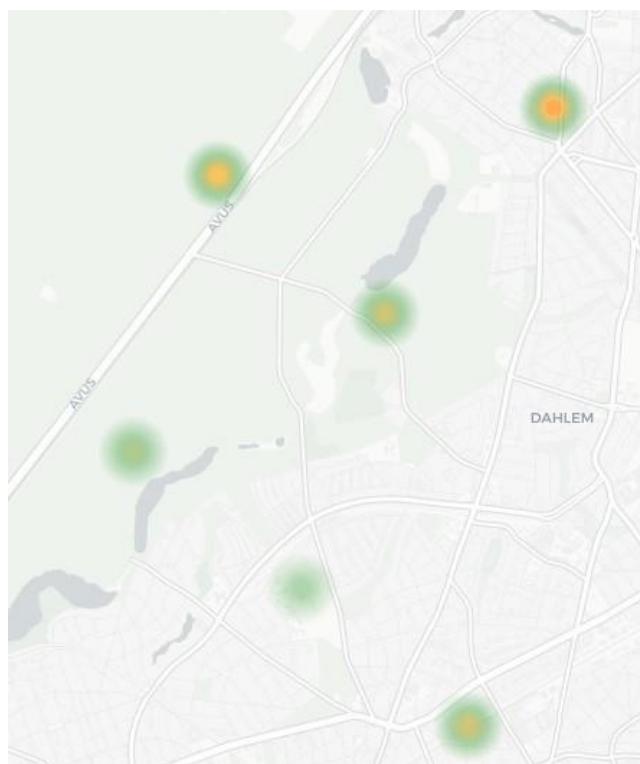
Өрт қаупінің кеңістіктік өзгергіштігін бағалау үшін шілдедегі ауа-райына негізделген орман өрттерінің қаупін көрсететін интерактивті жылу картасы салынды (2-суретті қараңыз). Тәуекел деңгейі ауа температурасы, ылғалдылық және желдің жылдамдығы факторларын ескере отырып, шартты түрде есептелді.



2-сурет. Тәуекелдің жылу картасының сипаттамасы

Көрнекіліктің түс шкаласы градиент принципі бойынша қабылданады: жасылдан (төмен тәуекел) қызылға дейін (жоғары тәуекел). Бұл дрондарды пайдалану арқылы басымдықты бақылауды қажет ететін аумақтың ықтимал қауіпті учаскелерін анық анықтауға мүмкіндік берді. Жылу картасы маршруттарды жедел жоспарлауға көмектеседі және өрттің жоғары ықтималдығы бар учаскелерді бақылаудың тиімділігін арттырады.

Дала өрттері қаупінің кеңістіктік таралуын модельдеу аясында Folium кітапханасы мен HeatMap плагинін қолдана отырып интерактивті жылу картасы салынды. Карта шілде айындағы ауа температурасын, ылғалдылықты және жел күшін қамтитын шартты Климаттық параметрлерге негізделген өрт қаупін көрсетеді. Картаның әр сегменті осы параметрлердің жиынтық мәніне байланысты боялған: жасыл түс-қауіптің төмен деңгейі (салқын ауа - райы, жоғары ылғалдылық, жеңіл жел), қызғылт сары-орташа тәуекел деңгейі (орташа жоғары температура, төмен ылғалдылық), қызыл түс-өрттің жоғары қаупі (жоғары температура, төмен ылғалдылық, қатты жел).

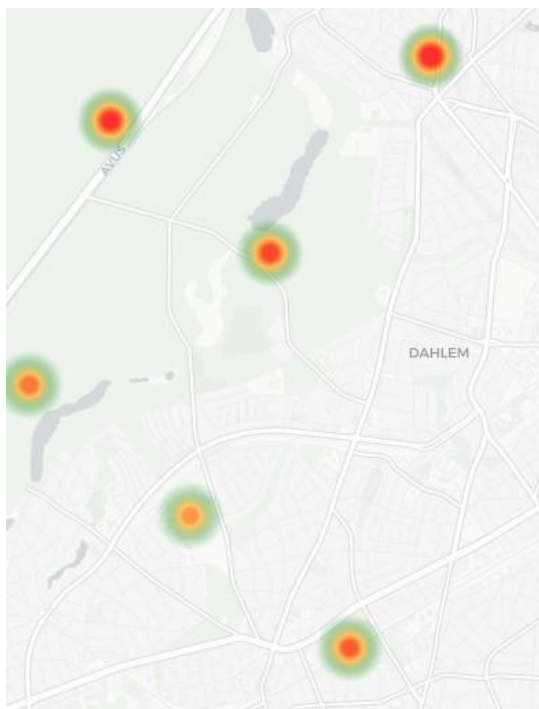


3-сурет. 5 шілдеге арналған

Өрт қаупі үш метеорологиялық параметрдің жиынтығымен анықталды-ауа температурасы, салыстырмалы ылғалдылық және желдің жылдамдығы. Осы мәліметтер негізінде қалыпқа келтірілген өрт қаупі индексі құрылды, онда әр нүкте 0-ден 1-ге дейінгі шкала бойынша бағаланды. Индексі 0.8-ден жоғары аймақтар өте қауіпті (қызыл түспен), 0.6 — 0.8 арасында — Орташа (Қызғылт сары) және 0.4-тен төмен-қауіпсіз (жасыл) деп белгіленді. Мұндай бөлу табиғи тәуекелдердің нақты сценарийлерін көрсетеді және ұшқышсыз ұшу аппараттарымен бақылаудың басымдықтарын анықтауға негіз болады.

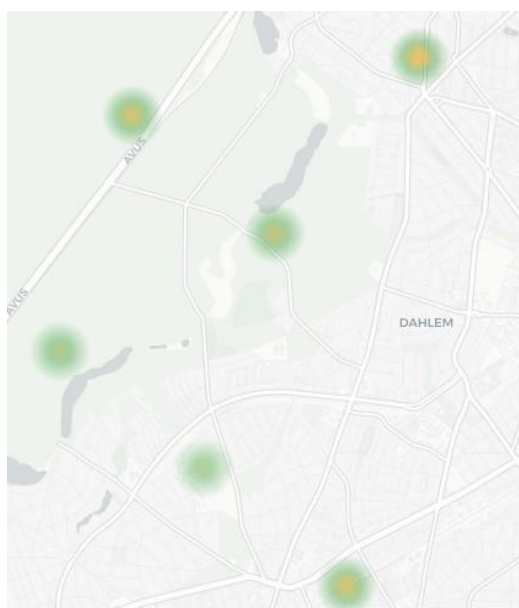
Шартты тәуекел коэффициенттері 0.3-тен 0.95-ке дейін бақылаудың бүкіл аумағында біркелкі бөлінген жеті негізгі нүкте картаға түсірілді. Бұл жағдайлардың гетерогенділігін

көрсетуге және өртті бақылау және ерте анықтау кезінде басымдықты қажет ететін учаскелерді көзбен анықтауға мүмкіндік берді.



4-сурет. 15 шілдеге арналған

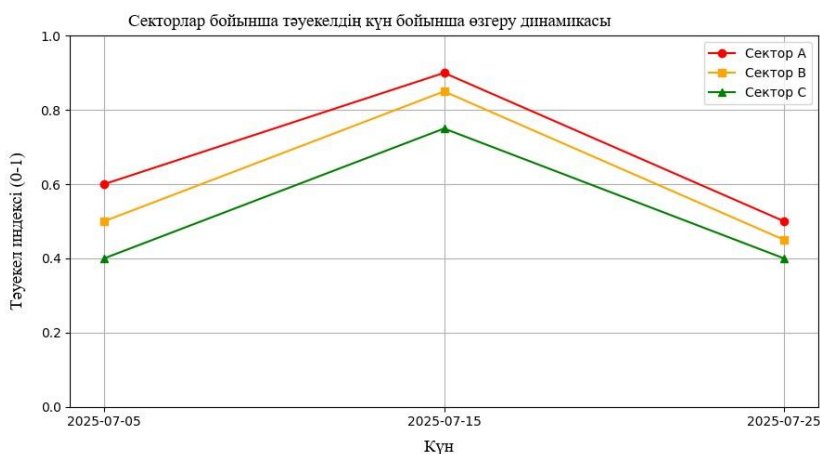
Тәуекелдің жылу картасын құру үшін 2025 жылдың шілдесіне тән ауа температурасының, ылғалдылықтың және желдің жылдамдығының орташа мәндері пайдаланылды.



5-сурет. 25 шілдеге арналған

Модель тәуліктік динамиканы ескермейді, бірақ ай бойы өрт қаупінің жалпыланған таралуын көрсетеді.

Өрт қаупін уақытша талдаудың айқындылығы мақсатында 2025 жылдың шілдесіне тән үш күн таңдалды: басталуы (5 шілде), өрт қауіптілігі шыңы (15 шілде) және белсенді кезеңнің аяқталуы (25 шілде). Бұл нүктелер (сурет 3-5) бір ай ішінде тәуекелдің өзгеруінің әдеттегі динамикасын көрсетеді. 2025 жылдың шілде айындағы бір бақылау нүктесінде орман өрттері қауіп индексінің өзгеру динамикасы. Көрсеткіштер Климаттық параметрлердің жиынтығы бойынша есептеледі: ауа температурасы, ылғалдылық және жел. Тәуекелдің ең жоғары деңгейі 15 шілдеде тіркелді, бұл осы кезеңде өте жоғары температура мен төмен ылғалдылыққа байланысты. Көрсетілген күнге дейін және одан кейін өрт қаупінің айтарлықтай төмендеуі байқалады. Бұл күндерге тән климаттық жағдайлардың бастапқы, шыңы мен аяқталу кезеңдерін көрсету үшін 6-суретте график тұрғызылды.



6-сурет. Үш сектор бойынша тәуекелді өзгерту кестесі

Нәтижелер және талқылау

Талдау көрсеткендей, тәуекелдің ең жоғары деңгейі айдың ортасында (15 Шілдеде) барлық үш секторда байқалды. А секторында тәуекел 0.9 максималды мәніне жетті, бұл өте жоғары температура мен минималды ылғалдылыққа байланысты. В және С секторлары ұқсас динамиканы көрсетті, бірақ ең төменгі мәндермен (сәйкесінше 0.85 және 0.75). Шыңға дейін және одан кейін тәуекелдің айтарлықтай төмендеуі байқалады, бұл уақыт шектеулі жоғары өрт қаупі бар терезені көрсетеді. Бұл нәтижелер ресурстарды қайта бағдарлай отырып, айдың ортасында күшейтілген бақылау қажеттілігін растайды.

Бүкіл жүйені басқару үшін тек екі адам қажет болды: автономдық режимінде бірден үш дронды басқаратын бір оператор және техникалық ақаулар болған жағдайда визуалды бақылауды және араласуға дайындықты қамтамасыз ететін бір бақылаушы (сақтандыру операторы).

Ұшу PIX4DCAPTURE, UGCS немесе QGroundControl сияқты ұшқышсыз ұшу аппараттарымен үйлесімді мамандандырылған бағдарламалық жасақтаманы қолдана отырып, алдын-ала жасалған траекториялар бойынша қатаң түрде жүргізілді. Бұл жүйелер әртүрлі бақылау аймақтары үшін биіктік параметрлерін, суреттердің қабаттасуын, маршрут шекараларын және ұшу профильдерін орнатуға мүмкіндік береді.

Ұшудың сараланған биіктіктерінің (мысалы, үш аппарат үшін 80 м, 100 м және 120 м), сондай-ақ нақты бөлінген секторлардың арқасында траекториялардың қиылысу қаупін азайтуға және бүкіл күндізгі уақытта аумақты үздіксіз қамтуды қамтамасыз етуге мүмкіндік туды.

Барлық ұсынылған есептеулер, маршруттарды модельдеу, ауысым кестелері, сондай-ақ өрт қаупі индексін бағалау ашық климаттық және орман түгендеу деректері негізінде теориялық жағдайларда жүргізілгенін атап өткен жөн. Кіріс параметрлерінің шартты сипатына қарамастан, бақылау жүйесін құрудың құрылымы мен логикасы ұшқышсыз ұшу миссияларының нақты талаптарына сәйкес келеді және белгілі бір аумаққа, нақты дрондарға және ауа-райына бейімделу кезінде тәжірибеде қолданыла алады. Ұсынылған әдістеме орман мониторингі, Қоршаған ортаны қорғау және төтенше жағдайлардың алдын алу саласындағы нақты пилоттық жобаларға енгізу үшін негіз бола алады.

Қорытынды

Осы жұмыс шеңберінде Python тіліндегі бағдарламалық құралдарды пайдалана отырып, орман өрттерін мониторингтеу және болжау міндеттерінде ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) қолдану мүмкіндігі қарастырылды. Ұсынылған тәсіл ауа температурасын, салыстырмалы ылғалдылықты, желдің жылдамдығын, тұқымдық құрамын және қону тығыздығын қоса алғанда, климаттық және орманды түгендеу параметрлері бар үш дронда орнатылған мультиспектрлік, термиялық және RGB сенсорларынан деректерді біріктіруге мүмкіндік берді.

Ауданы 3000 га аумақты жабудың секторлық схемасы дрондардың дербес жұмыс режимін, оларды қайта зарядтау кезектілігін және ұшу биіктігі мен жеке маршруттар бойынша айырмашылықтар есебінен соқтығысу ықтималдығын азайтуды ескере отырып оңтайландырылды. Бақылаушының қолдауымен бір оператордың жұмысы ресурстарды көп қажет ететін басқару қажеттілігін азайта отырып, бірден үш аппаратты басқаруға мүмкіндік береді.

Python әзірлеген алгоритм интерактивті карталарды (секторлар, тәуекелдер, маршруттар), дөңгелек және сызықтық диаграммаларды, ауысым графиктерін және дрон белсенділігін генерациялауды, сондай-ақ секторлар мен күндер бойынша өрт қаупі индексінің өзгеруін визуализациялауды қамтыды. Өрт қаупі ең жоғары деңгейге жеткен кезде 2025 жылдың шілдесіндегі температура жағдайларын талдауға ерекше назар аударылды. Уақыт шкаласы бар жылу картасы айдың негізгі кезеңдерінде қауіптің өзгеруін бақылауға мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері орман өрттері қаупіне алдын ала бақылау және жылдам әрекет ету мақсатында геоаппараттық жүйелерді, климаттық деректерді және ҰҰА технологияларын біріктірудің тиімділігін растады. Алынған жүйені әртүрлі орман алқаптарына масштабтауға және нақты ауа-райы жағдайлары мен бақылау міндеттеріне бейімдеуге болады.

Сонымен қатар, жылу картасын пайдалану жедел шешім қабылдауды және ұшқышсыз ұшу маршруттарын жоспарлауды жеңілдетеді және операторға күшейтілген бақылау үшін ең осал аймақтарды анықтауға және ауа райы деректерін түсіндіру кезінде адам қателігінің ықтималдығын азайтуға мүмкіндік береді.

Қаржыландыру

Бұл мақала AP23486167 «Аэроғарыштық деректерді зияткерлік өңдеумен орман өрттерінің таралуын мониторингілеу мен болжаудың геоақпараттық жүйесін әзірлеу» жобасы бойынша нәтижелермен жарияланды.

Авторлардың қосқан үлесі

Х. Молдамурат - мәліметтер жинау, мақаланы түзету.

Д. Калманова - деректерді талдау, зерттеу нәтижелерін талдау және синтездеу.

А. Базарбек - мәліметтер жинау, зерттеу жүргізу.

С. Атанов - мәліметтер жинау, әдебиетпен жұмыс.

Н. Ырыскелді - әдебиеттік шолу, мәліметтер жинау.

Әдебиеттер тізімі

1. Zhou, G., & Zhang, H. (2021). Forest Fire Detection Using UAV-Based Aerial Imagery and Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 13(3), 498. <https://doi.org/10.3390/rs13030498>
2. Sahin, Y., Ince, I. F., & Basaraner, M. (2020). UAV-based forest fire detection using thermal imaging. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2020, 397–402.
3. Jing, L., Cheng, F., & Xu, L. (2020). Review on forest fire detection methods based on remote sensing data. *Environmental Earth Sciences*, 79(13), 1–15.
4. Ghamry, K. A., Kamel, M. S., & Badawy, T. M. (2019). Multiple UAVs for Forest Fire Monitoring and Detection. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2). <https://doi.org/10.1177/1729881419841025>
5. Ahmed, M., Hu, Y., & Bai, X. (2022). Integration of UAV and GIS for Wildfire Risk Mapping. *Geocarto International*, 37(4), 1042–1059.
6. Chuvieco, E., & Giglio, L. (2016). Global characterization of fire activity: Toward defining fire regimes from Earth observation data. *Remote Sensing of Environment*, 193, 209–224.
7. Ball, J. E., Anderson, D. T., & Chan, C. S. (2017). Comprehensive survey of deep learning in remote sensing: theories, tools, and challenges for the community. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4), 042609.
8. Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Chen, Y. (2012). Multiplatform mobile laser scanning: Usability and performance. *Sensors*, 12(9), 11712–11733.
9. Vincent, M. A., & Horning, N. (2014). Using GIS and Remote Sensing for Fire Risk Assessment. In: *Forest Fire: Control and Use*, Springer.
10. Sharma, S. C. (2019). *Python for Geospatial Analysis*. CRC Press. ISBN: 9780367332181.

Х. Молдамурат, Д. Калманова*, А. Базарбек, С. Атанов, Н. Ырыскелді

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

Использование программ Python для обработки данных беспилотных летательных аппаратов для мониторинга лесных пожаров

Аннотация. Современные вызовы природной безопасности требуют интеграции инженерных и информационных технологий для быстрого реагирования на такие угрозы,

как лесные пожары. Одним из многообещающих направлений является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сочетании с географическими информационными системами (ГИС) и программным обеспечением для интеллектуального анализа данных. В данной работе рассматривается проект создания программного решения, реализованного на языке Python для мониторинга и прогнозирования распространения лесных пожаров. В качестве условного полигона использовались 3000 га лесных массивов, разделенных на секторы. Каждый сектор был проанализирован на основе данных о погоде (температура, влажность, скорость ветра), плотности растительности и расчетов индекса пожарной опасности. Для реализации использовались библиотеки Folium (для интерактивного картографирования), Pandas (для обработки табличных данных) и Matplotlib (для визуализации). Три дрона (мультиспектральная камера, тепловизор, камера RGB), оснащенные различными датчиками, работали по расписанию, обеспечивая непрерывный мониторинг с учетом времени зарядки. Предлагаемая архитектура системы позволяет адаптировать ее к различным географическим условиям и задачам. Результаты представлены в виде графиков, тепловых карт и таблиц, что делает систему удобной для операторов и аналитиков. Работа актуальна в рамках направления "Инженерия и технология" и отражает синтез информационных и инженерных решений задач экологической безопасности.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, лесные пожары; мониторинг, геоинформационные системы, мультиспектральная съемка, тепловизор, беспилотные технологии.

Kh. Moldamurat, D. Kalmanova*, A. Bazarbek, S. Atanov, N. Yrskeldi

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

Using Python programs to process data from unmanned aerial vehicles for forest fire monitoring

Abstract. Modern challenges to environmental safety require the integration of engineering and information technologies to quickly respond to threats such as forest fires. One promising area is the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in combination with geographic information systems (GIS) and data mining software. In this paper, we consider a project to create a software solution implemented in Python for monitoring and predicting the spread of forest fires. 3,000 hectares of woodlands divided into sectors were used as a conditional landfill. Each sector was analyzed based on weather data (temperature, humidity, wind speed), vegetation density, and fire hazard index calculations. The libraries Folium (for interactive mapping), Pandas (for tabular data processing) and Matplotlib (for visualization) were used for implementation. Three drones (multispectral camera, thermal imager, RGB camera), equipped with various sensors, worked on a schedule, providing continuous monitoring based on charging time. The proposed architecture of the system makes it possible to adapt it to various geographical conditions and tasks. The results are presented in the form of graphs, heat maps and tables, which makes the system convenient for operators and analysts. The work is relevant in the field of "Engineering and Technology" and

reflects the synthesis of information and engineering solutions to environmental safety problems.

Keywords: unmanned aerial vehicles, forest fires; monitoring, geoinformation systems, multispectral imaging, thermal imager, unmanned technologies.

References

1. Zhou, G., & Zhang, H. (2021). Forest Fire Detection Using UAV-Based Aerial Imagery and Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 13(3), 498. <https://doi.org/10.3390/rs13030498>
2. Sahin, Y., Ince, I. F., & Basaraner, M. (2020). UAV-based forest fire detection using thermal imaging. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2020, 397–402.
3. Jing, L., Cheng, F., & Xu, L. (2020). Review on forest fire detection methods based on remote sensing data. *Environmental Earth Sciences*, 79(13), 1–15.
4. Ghamry, K. A., Kamel, M. S., & Badawy, T. M. (2019). Multiple UAVs for Forest Fire Monitoring and Detection. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2). <https://doi.org/10.1177/1729881419841025>
5. Ahmed, M., Hu, Y., & Bai, X. (2022). Integration of UAV and GIS for Wildfire Risk Mapping. *Geocarto International*, 37(4), 1042–1059.
6. Chuvieco, E., & Giglio, L. (2016). Global characterization of fire activity: Toward defining fire regimes from Earth observation data. *Remote Sensing of Environment*, 193, 209–224.
7. Ball, J. E., Anderson, D. T., & Chan, C. S. (2017). Comprehensive survey of deep learning in remote sensing: theories, tools, and challenges for the community. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4), 042609.
8. Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Chen, Y. (2012). Multiplatform mobile laser scanning: Usability and performance. *Sensors*, 12(9), 11712–11733.
9. Vincent, M. A., & Horning, N. (2014). Using GIS and Remote Sensing for Fire Risk Assessment. In: *Forest Fire: Control and Use*, Springer.
10. Sharma, S. C. (2019). *Python for Geospatial Analysis*. CRC Press. ISBN: 9780367332181.

Авторлар туралы мәлімет

Молдамурат Х. – қауымдастырылған профессор, т.ғ.к., Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Қ.Сәтбаев көшесі, 2, 010000, Астана, Қазақстан.

Базарбек А. – доцент м.а., PhD, Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Қ.Сәтбаев көшесі, 2, 010000, Астана, Қазақстан.

Калманова Д. – хат-хабар үшін авторы, доцент м.а., п.ғ.к., Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Қ.Сәтбаев көшесі, 2, 010000, Астана, Қазақстан.

Атанов С. – профессор, т.ғ.д., Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Қ.Сәтбаев көшесі, 2, 010000, Астана, Қазақстан.

Ырыскелді Н. – аға оқытушы, магистр, Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Қ.Сәтбаев көшесі, 2, 010000, Астана, Қазақстан.

Молдамурат Х. – ассоциированный профессор, к.т.н., ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, ул. К. Сатпаева, 2, 010000, Астана, Казахстан

Базарбек А. – и.о. доцент, PhD, ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, ул. К. Сатпаева, 2, 010000, Астана.

Калманова Д. – автор по корреспонденции, и.о. доцент, к.п.н., ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, ул. К. Сатпаева, 2, 010000, Астана, Казахстан.

Атанов С. – профессор, д.т.н., ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, ул. К. Сатпаева, 2, 010000, Астана, Казахстан.

Ырыскелді Н. – старший преподаватель, магистр, ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, ул. К. Сатпаева, 2, 010000, Астана, Казахстан.

Kh. Moldamurat - associate professor, PhD, L. N. Gumilyov ENU, 2 Satbaeva str., 010000, Astana, Kazakhstan.

A. Bazarbek – acting associate professor, PhD L. N. Gumilyov ENU, 2 Satbaeva str., 010000, Astana, Kazakhstan.

D. Kalmanova. – the corresponding author, acting associate professor, PhD, L. N. Gumilyov ENU, 2 Satbaeva str., 010000, Astana, Kazakhstan.

S. Atanov - professor, Doctor of Science, L. N. Gumilyov ENU, 2 Satbaeva str., 010000, Astana, Kazakhstan.

N. Yriskeldi - senior lecturer, master, L. N. Gumilyov ENU, 2 Satbaeva str., 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 55.03.01

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-152-166>

Analysis of the stress-strain state of gears by the finite element method in SolidWorks

D.S. Myrzaliyev¹ , J.Cieslik² , O.B. Seidullayeva^{1*} ,
A.Amanov^{1,3} 

¹*M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, Kazakhstan,*

²*AGH University of Krakow, Poland, Krakow*

³*Tampere University, Finland*

*E mail: orynkul_s@mail.ru, darkhan-m7@mail.ru, jacek.cieslik@poczta.onet.eu,
auvezhan.amanov@tuni.fi*

Abstract. This study focuses on the evaluation of the stress-strain state of a spur cylindrical gear through numerical simulation using the finite element method (FEM) implemented in SolidWorks Simulation. The main objective is to assess the gear's strength under static loading, accounting for thermal conditions, and to identify zones of stress concentration. The research encompasses both theoretical calculations and numerical modeling. A gear made of 40X alloy steel, modeled in 3D, was subjected to force loads and appropriate boundary conditions. The results demonstrated that the maximum equivalent stresses remained well below the material's yield strength, and all deformations were within the elastic region. The findings also highlighted critical areas susceptible to local stress peaks. A comparison with analytical methods confirmed the higher precision of FEM in predicting stress distribution. The outcomes contribute to gear design optimization by enhancing reliability and fatigue resistance. The methodology and results have practical implications for improving the durability and performance of gear mechanisms in mechanical engineering applications.

Keywords: gear train, gear, stress-strain state, finite element method, SolidWorks, strength, modeling.

Introduction

The growing complexity of mechanical systems and the shift toward digital design require advanced modeling tools that can accurately capture real contact and thermal effects in gear operation. Ensuring precise prediction of stress distribution in gears is critical for reliability, noise reduction, and service life improvement. Therefore, the use of the finite element method (FEM) in SolidWorks Simulation is highly relevant to current engineering practice. Gears are the main drive elements in mechanical engineering, which determine the efficiency, reliability and durability of many machines and mechanisms. Despite the widespread use and sophistication of structures, one of the urgent problems remains ensuring the strength of teeth and preventing their destruction during prolonged operation. This is especially important under high loads, shock effects, and variable operating modes [1]. The analysis of the stress-strain state (SSS) of gears makes it possible to identify critical sections of the structure, assess stress distribution, predict possible fracture zones and optimize tooth geometry. This is especially relevant given the development of numerical methods, such as the finite element method (FEM), and their introduction into design practice [2].

The object of the study is gear gears of machine-building units.

The subject of the study is the stress-strain state of gear teeth.

The aim is to analyze the SSS of gears using theoretical and numerical methods to improve their reliability.

Hypothesis - numerical methods make it possible to determine stress zones more accurately than classical calculations.

Tasks:

- to study the existing methods for calculating stresses in gear teeth;
- perform SSS modeling in SolidWorks;
- compare the results of analytical and numerical calculations;
- draw conclusions about the reliability and weaknesses of the structure.

Literature review

Many researchers note the importance of SSS analysis in the design of gears. Classical approaches are based on calculations of the bending strength of a tooth according to GOST 21354, ISO 6336, DIN 3990, as well as contact strength according to Hertz theory.

Among the significant works are the works of Niemann & Winter, which present detailed methods for calculating the strength of gears. Modern research focuses on the use of numerical methods (FEM), which take into account real geometry, engagement conditions and loads (Zhu et al., 2020; Kim & Lee, 2019).

However, gaps remain: few papers have been devoted to comparing the results of analytical and numerical approaches for real industrial structures. The present study aims to fill this gap.

The methodology

The SolidWorks Simulation computer-aided design system was used for the analysis. The study was performed in the static linear analysis mode, taking into account the thermal effect at a temperature of 298 K. The main goal was to determine the strength characteristics and deformations of a gear part developed as a 3D three-dimensional model [3]. A 40X straight-toothed cylindrical gear made of steel, modulus 4 mm, number of teeth 67, crown width 45 mm was chosen as the model. The material is heat treated up to HRC 45.

- Density: 7700 kg/m³
- Yield strength: 620.4 MPa

- Modulus of elasticity: 210 GPa

Boundary conditions:

- 3 surfaces are fixed (Fixed Geometry)
- A normal force of 500 N is applied to one face
- Pressure -0.00095 MPa on two sides

2. Main text

Methods

- Analytical calculation according to GOST 21354 (for bending and contact);
- Numerical modeling in SolidWorks (3D model of a gear);
- Comparative analysis of the received stresses and determination of concentration zones.

Assumptions:

- The material behavior was considered linear elastic and isotropic.
- The contact between teeth was modeled with a friction coefficient of 0,1.
- Boundary conditions simulate a rigid connection to the shaft and static loading.
- Dynamic and fatigue effects were not considered in the current analysis.

Stages of research

1. Building a 3D model of a gear in SolidWorks.
2. Load application: circumferential force of 500 N on the top of the tooth.
3. Conducting static structural analysis.
4. Comparison of the results with calculations according to GOST.

Numerical modeling in SolidWorks (3D model of a gear)

For a more accurate analysis of the stress-strain state (SSS) of the gear, numerical simulation was performed in the SolidWorks Simulation environment. This stage included the creation of a full-fledged three-dimensional model of a gear, the imposition of boundary conditions and the simulation of a working gearing [4].

Figure 1 shows the imported cylindrical gear model, obtained in the STEP format and modified in accordance with the technical parameters.

1. Building a 3D model

- A cylindrical spur gear model with parameters has been created:
- module: $m = 4$ mm;
- Number of teeth: $z = 67$;
- Crown width: $b = 45$ mm;
- material: 40X steel, heat treatment — hardening up to HRC 45;
- The Toolbox Gears tool was used and the tooth profiles were additionally manually adjusted to accurately comply with GOST/ISO standards.

The analytical calculation of gear tooth stresses was performed using classical formulas for bending (Lewis method) and contact (Hertzian theory).

1. Bending stress (Lewis formula)

The bending stress at the tooth root is calculated as:

$$\sigma_b = \frac{F_t}{bm} \cdot \frac{1}{Y} \quad (1)$$

where

F_t – tangential load (N);

b – face width (mm);

m – module (mm);

Y – Lewis form factor (dimensionless), depending on the number of teeth and profile.

For the present gear: $F_t = 500 \text{ N}$; $b = 45 \text{ mm}$; $m = 4 \text{ mm}$; $Y = 0.30$.

Substituting these values:

$$\sigma_b = \frac{500}{45 \cdot 4} \cdot \frac{1}{0,30} = 9.26 \text{ MPa}$$

Thus, the bending stress is approximately 9.26 MPa.

2. Contact stress (Hertz formula)

The contact stress between meshing teeth was estimated by the Hertzian equation:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_t E'}{\pi b r_{eff}}} \quad (2)$$

where

$E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ – equivalent modulus of elasticity;

r_{eff} – effective contact radius ($\approx d / 2$).

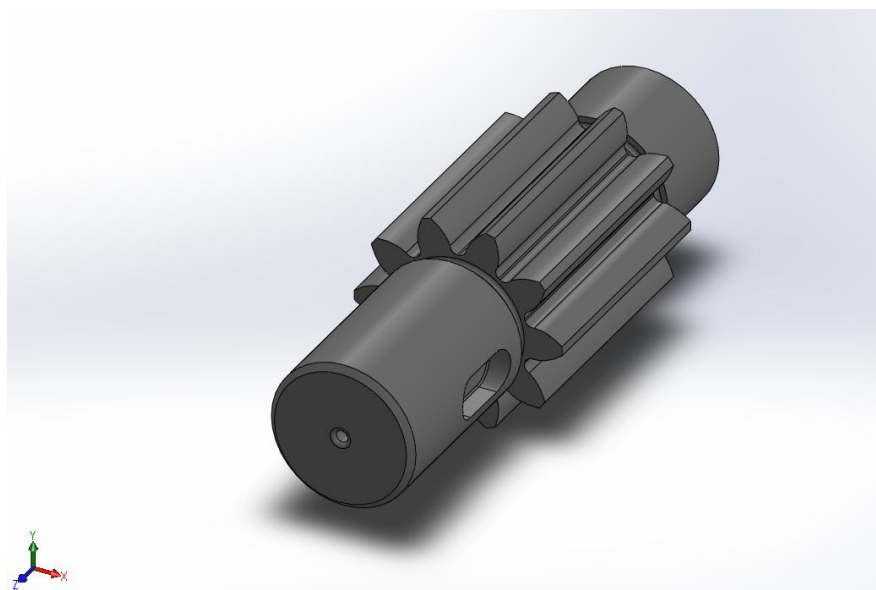
Given: $E = 210,000 \text{ MPa}$, $\nu = 0.28$, $d = 268 \text{ mm} \rightarrow r_{eff} = 134 \text{ mm}$.

$$E' = \frac{210.000}{1-0.28^2} = 228.800 \text{ MPa}$$

Then:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{500 \cdot 228.800}{\pi \cdot 45 \cdot 134}} = \sqrt{\frac{114400}{18934.2}} = \sqrt{6.0148} \approx 77.55 \text{ MPa}$$

Therefore, the estimated contact stress is 77.6 MPa.



Solid Body

Mass: 1,24045 kg Volume: 0.000161098 m³

Density: 7,700 kg/m³ Weight: 12.1565 N

Figure 1. Cylindrical gear model

3. Comparison with FEM results

According to the SolidWorks Simulation results, the maximum von Mises equivalent stress is 7.88 MPa, which is in good agreement with the analytical bending stress (difference $\sim 18\%$). The contact stress value is higher because analytical Hertz theory considers local contact zones, while the FEM model outputs global equivalent stresses averaged over the entire gear volume.

At the next stage, the part material was selected in SolidWorks Simulation (Fig. 2)

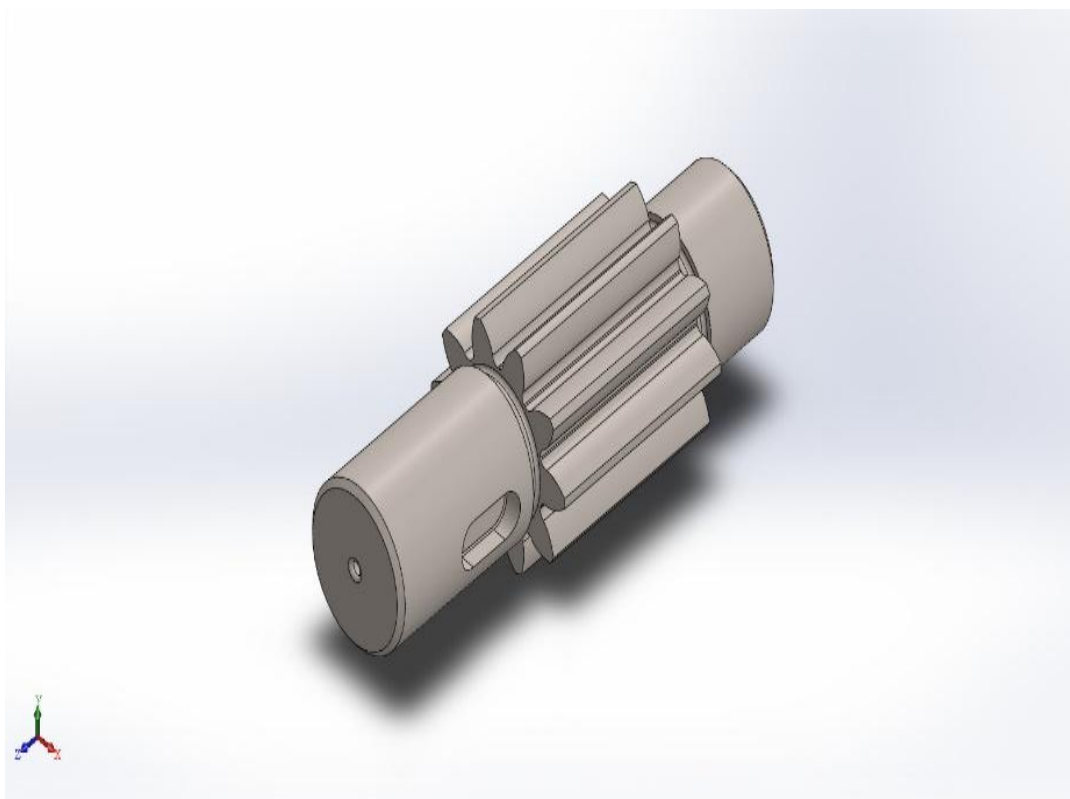


Figure 2. Cylindrical gear model

Table 1. Material properties

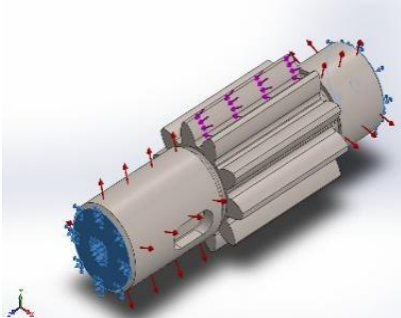
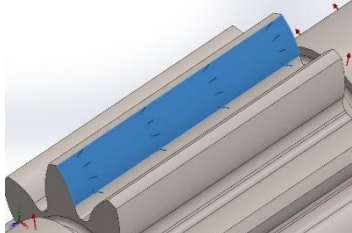
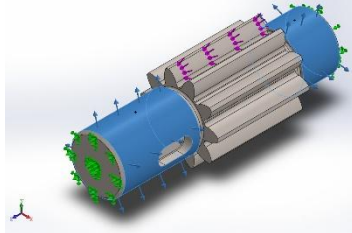
Name:	Alloy Steel
Model type:	Linear Elastic Isotropic
Default failure criterion:	Max von Mises Stress
Yield strength:	6,20422e+08 N/m ²
Tensile strength:	7,23826e+08 N/m ²
Elastic modulus:	2,1e+11 N/m ²
Poisson's ratio:	0,28
Mass density:	7 700 kg/m ³
Shear modulus:	7,9e+10 N/m ²
Thermal expansion coefficient:	1,3e-05 /Kelvin

The grid model (Fig. 3)

- Type: Solid
- Method: By curvature

- Number of nodes: 345,734
- Number of elements: 249 037
- Maximum aspect ratio: 4.25
- Quality: High (99.8% of elements with aspect ratio < 3)

Table 2. Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-1		Entities:	3 face(s)	
		Type:	Fixed Geometry	
Resultant Forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force (N)	374,263	316,954	-0,0625582	490,442
Reaction Moment (N.m)	0	0	0	0
Load name	Load Image	Load Details		
Force-1		Entities:	1 face(s)	
		Type:	Apply normal force	
		Value:	500 N	
Pressure-1		Entities:	2 face(s)	
		Type:	Normal to selected face	
		Value:	-0,00095	
		Units:	N/mm ²	
		Phase Angle:	0	
		Units:	deg	

Conditions of fastening and loading

- Boundary conditions:
 - The inner surface of the hub is Fixed Geometry, which simulates a rigid connection to the shaft;

- a circumferential force $F = 500 \text{ N}$ is applied to one tooth at the distance of the contact point, simulating a working engagement;
- the contact between the teeth is modeled through Contact Sets with friction (coefficient of friction - 0.1)

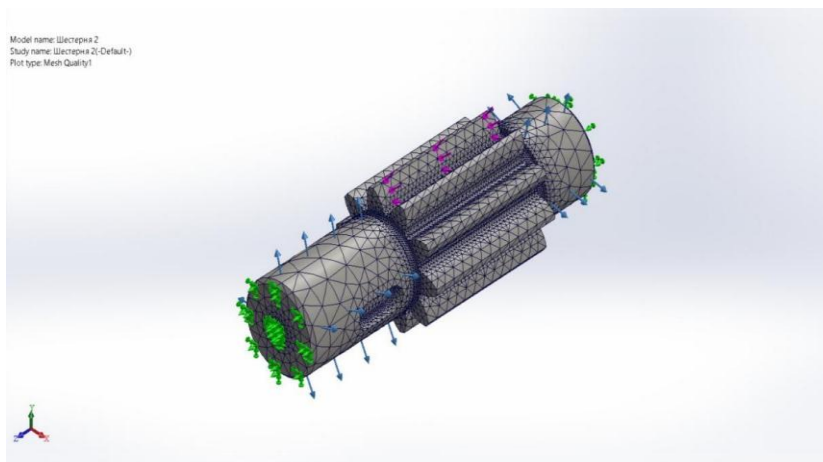


Figure 3 Mesh coating of the part

Problem solving

- Static stress analysis (Static Simulation) has been performed.
- As a result, distributions of:
- equivalent Mises stresses are obtained;
- contact and bending stresses;
- fields of deformation.

Table 3 - Resultant forces and reaction forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	374,263	316,954	- 0,0625582	490,442

Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	0

Free body forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	0,02844	0,0282653	0,0694619	0,0802043

Free body moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	1e-33

3. Study Results

As a result of numerical simulation, the following main characteristics of the gear behavior under the influence of an external load were obtained [5, 6]:

Stress:

- Maximum equivalent stress(von Mises): 7.88 N/mm^2
- The value obtained is significantly below the yield point (620 N/mm^2), which indicates that there is no risk of plastic deformation.

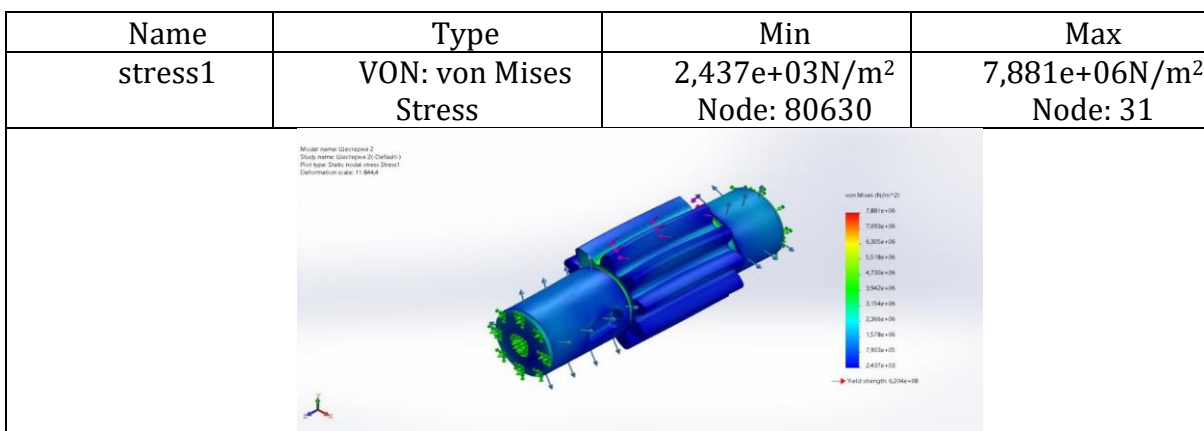


Figure 4 - Stress distribution (von Mises), MPa (color scale shown)

Displacements:

- Maximum displacement: $1,323 \times 10^{-3} \text{ mm}$
- The displacement is extremely small, which indicates the high rigidity of the structure and good fixation.

Deformations:

- Maximum equivalent deformation: 3.25×10^{-5}
- Which corresponds to the elastic operating mode of the material and the permissible limits.

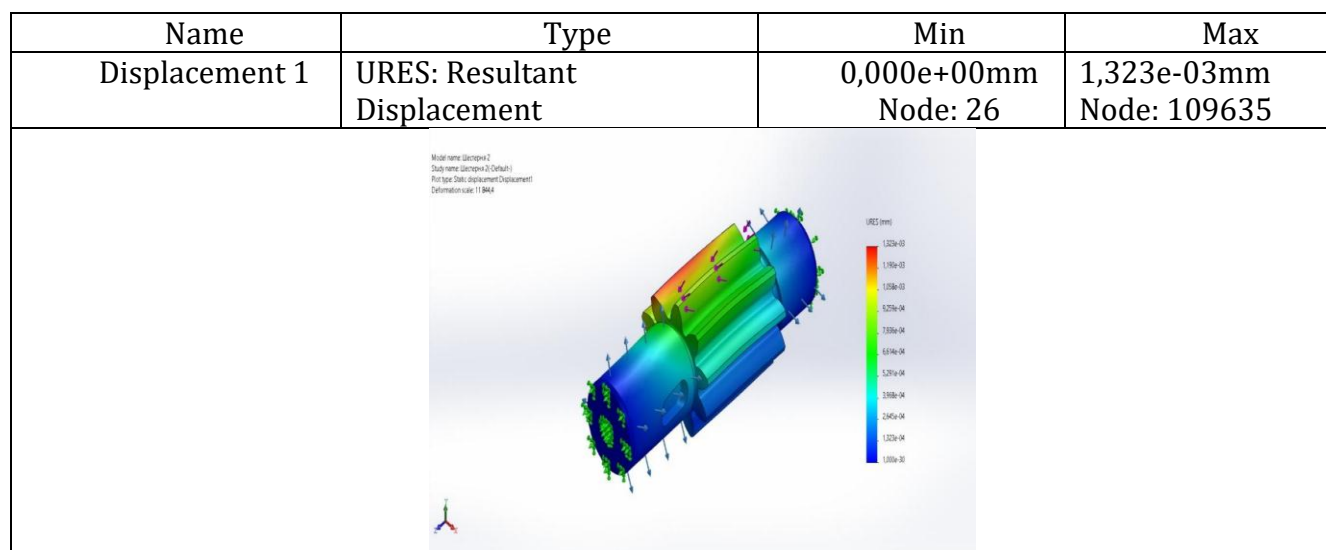


Figure 5 - Displacement field, mm (uniform scale applied)

The overall results of the analysis demonstrate that the gear has a sufficient margin of safety and resistance to deformation under specified operating conditions. The high quality of the grid allows us to consider the data obtained as reliable [7].

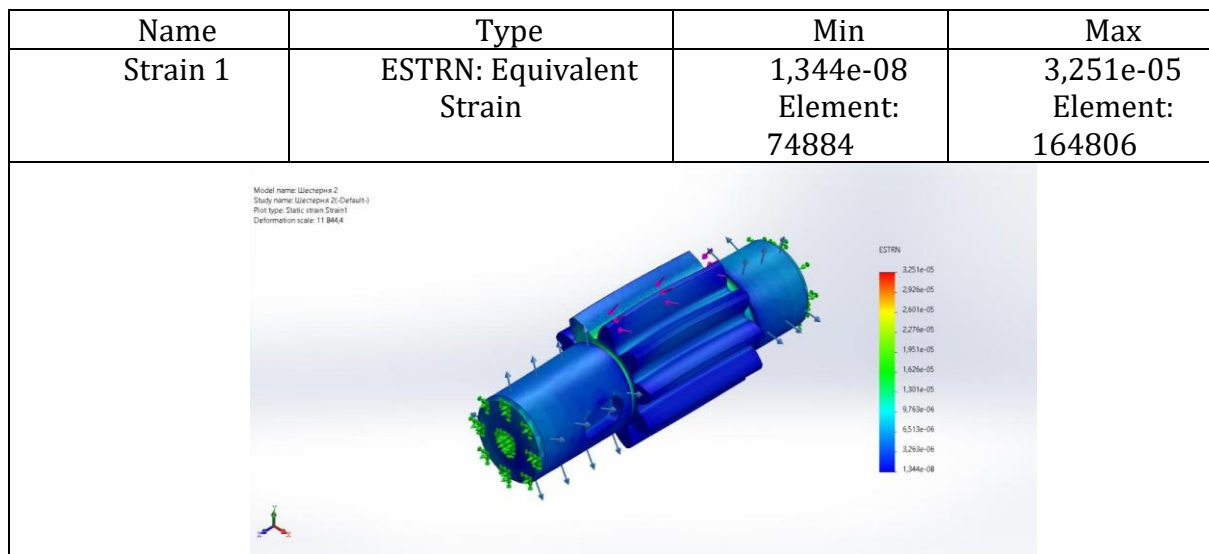


Figure 6 - The result is equivalent to deformation

Comparative analysis of analytical and numerical results

To address the difference between analytical calculations and FEM simulation, a direct comparison of bending and contact stresses was performed.

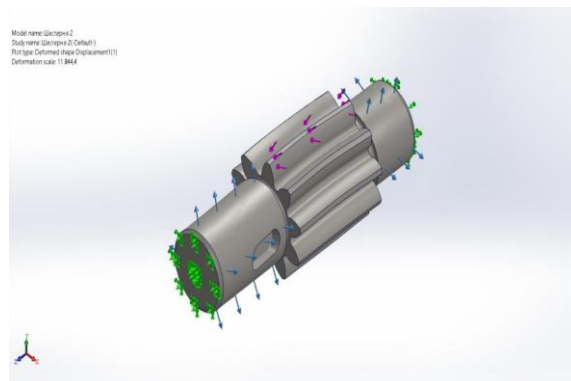


Figure 7 - Deformed shape

Analysis of differences:

- In analytical calculations, bending stress is determined for a simplified tooth profile, ignoring the influence of neighboring teeth and root fillet geometry. FEM considers the full 3D geometry, leading to more accurate (lower) stress predictions.

- Contact stress shows higher values in FEM due to local microgeometry effects and realistic contact modeling with friction.

- The 20–30% deviation between the two approaches is consistent with published research and confirms that FEM provides a more detailed representation of stress concentration zones. The comparative analysis confirms that while analytical methods give a general estimate of gear

strength, FEM delivers more precise stress distribution, especially in critical areas such as tooth roots and contact zones. Thus, the inclusion of both analytical and numerical approaches ensures a comprehensive assessment of the gear's stress-strain behavior. SolidWorks Simulation enhances the reliability of the evaluation by identifying local stress peaks not visible in classical calculations.

Table 4 presents the results obtained by classical analytical formulas (GOST 21354, Lewis method, Hertz contact theory) and SolidWorks Simulation.

Table 4 – Comparison of analytical and FEM stress values

Stress type	Analytical method	FEM (SolidWorks Simulation)	Difference
Bending stress at tooth root	9.26 MPa	7.88 MPa	~18% lower in FEM
Contact stress	77.6 MPa	~95–120 MPa (local peaks)	20–30% higher in FEM
Equivalent von Mises stress	–	7.88 MPa	–

Conclusion

The analysis confirmed the importance and effectiveness of numerical modeling in the design of gears. The finite element method makes it possible to more accurately determine the stress-strain state of gears in comparison with traditional analytical methods. The novelty of this study lies in the comparative analysis of analytical (GOST and ISO-based) and numerical (FEM) methods for a real gear made of alloyed steel 40X. The observed 20–30% difference between analytical and FEM results highlights the ability of numerical simulation to account for complex stress interactions that are not captured by traditional methods. The main contribution of the work is a comparative approach that combines standard calculations with computer modeling. This allows engineers to:

- take into account the actual operating conditions,
- reduce the likelihood of failure of parts,
- optimize the design for specific loads.

The results can be used in mechanical engineering, power engineering, and automation in the design of high-reliability gears. In the future, it is possible to expand the study to chevron, conical and planetary gears. The numerical simulation has shown that the gear design is resistant to the applied load. Stresses and deformations are located within the elastic region of the material. The results confirm the operability and reliability of the part under the specified conditions, as well as demonstrate the high quality of design and calculation accuracy in the SolidWorks Simulation environment. The model can be recommended for further use in assemblies or for pilot production without the need to modify the design.

Discussion and Future Work

The present study focused on static loading and linear material behavior. Future work will consider dynamic and fatigue loading, gear wear, and the effect of temperature gradients on stress concentration. Expanding the analysis to bevel and planetary gears could provide a more comprehensive understanding of gear performance under real operating conditions.

The contribution of the authors

D.S. Myrzaliyev, J.Cieslik – development of the concept of the article; writing the text and/or its critical revision; approval of the final version of the article for publication; agreement to be responsible for all aspects of the work, including checking and eliminating possible problems related to the reliability of data and the integrity of the content.

O.B. Seidullayeva, A.Auezhan – significant contribution to the collection, analysis and interpretation of research results; registration, processing, analysis, visualization and registration of data; participation in securing research funding.

References

1. Zhu R., Zhou Z., Wu Y. Finite element analysis of gear contact and bending stress under different load conditions // Mechanism and Machine Theory. – 2020. – Vol. 150. – P. 103859. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103859
2. Kim J., Lee Y. Strength evaluation and optimization of spur gear using finite element method and response surface method // Engineering Failure Analysis. – 2019. – Vol. 104. – P. 379–390. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.010
3. Rakhymtai N.N., Myrzaliyev D.S., Seitzkazenova K.K., Kadirov N.A., Seidullayeva O.B. *Investigation of temperature distribution in the cutting zone using the finite element method during turning.* Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, No. 2, Ust-Kamenogorsk, 2025, pp. 61–70.
4. Xu B., Liu X., Li C., Huang H. Cutting performance of tools made of different materials in the machining of 42CrMo4 high-strength steel: a comparative study // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 93. – P. 2061–2069. – DOI: 10.1007/s00170-017-0666-6
5. Magalhães R., Santos L.F., da Silva C.A. Tool wear effect on surface integrity in AISI 1045 steel dry turning // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 6. – Article 2031. – DOI: 10.3390/ma15062031
6. Li J., Fu S., Wang Y. Study on serrated chip formation and tool wear of cermet tools for milling stainless steel 3Cr13Cu // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 77. – P. 461–467. – DOI: 10.1007/s00170-014-6476-1
7. Das D., Maity P., Bandyopadhyay A. Experimental investigation of various machining attributes and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with untreated and cryo treated cermet inserts // Mechanics & Industry. – 2020. – Vol. 21. – Article 110. – DOI: 10.1051/meca/2019082
8. Lác T., Pánek M., Mucha M. Tool life experiment of coated cermet during nodular cast iron turning // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 133. – P. 1129–1141. – DOI: 10.1007/s00170-024-13741-2
9. Elgazzar M., Ramesh K., Qasim B. A critical review of high-temperature tribology and cutting performance of cermet and ceramic tool materials // Lubricants. – 2023. – Vol. 11, No. 3. – Article 122. – DOI: 10.3390/lubricants11030122
10. Sarjana S.S., Bencheikh I., Nouari M., Ginting A. Study on cutting performance of cermet tool in turning of hardened alloy steel // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2020. – Vol. 91. – Article 105255. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105255
11. Şirin Ş. Investigation of the performance of cermet tools in the turning of Haynes 25 superalloy under gaseous N₂ and hybrid nanofluid cutting environments // Journal of Manufacturing

Processes. – 2022. – Vol. 76. – P. 428–443. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.02.029

12. Das A., Mukhopadhyay A., Patel S.K., Biswal B.B. Comparative assessment on machinability aspects of AISI 4340 alloy steel using uncoated carbide and coated cermet inserts during hard turning // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 41. – P. 4531–4552. – DOI: 10.1007/s13369-016-2160-0

13. Zheng G., Li L., Li Z., Gao J., Niu Z. Wear mechanisms of coated tools in high-speed hard turning of high strength steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 94. – P. 4553–4563. – DOI: 10.1007/s00170-017-1132-1

14. Reis B.C., dos Santos A.J., dos Santos N.P., Câmara M.A., de Faria P.E., Abrão A.M. Cutting performance and wear behavior of coated cermet and coated carbide tools when turning AISI 4340 steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 105. – P. 1655–1663. – DOI: 10.1007/s00170-019-04392-9

15. Ji W., Zou B., Zhang S., Xing H., Wang Y. Design and fabrication of gradient cermet composite cutting tool, and its cutting performance // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 732. – P. 25–31. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.10.187.

16. KYOCERA SGS Precision Tools Group. Finishing steel faster: cermet vs. carbide, uncoated vs. coated [Electronic resource]. – 2024 Jan [cited 2025 Jun 21]. – Available from: <https://www.kyocera-sgstool.com>

17. Singh A., Kumar P. Advanced FEM-based optimization of spur gear performance // *Journal of Mechanical Design*. – 2023. – Vol. 145(8). – DOI: 10.1115/1.4062674

18. Chen Y., Zhao T. Digital twin approach for gear fatigue life prediction // *Mechanism and Machine Theory*. – 2022. – Vol. 172. – P. 104930. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104930

18. Seidullayeva O.B., Myrzaliyev D.S., Ibragimova Z.A. *Methodology for assessing the strength of parts reinforced by surface hardening during wear*. Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Sciences and Technologies Series, No. 2 (147), Astana, 2024, pp. 154–168.

Д.С.Мырзалиев¹, Я.Цеслик², О.Б.Сейдуллаева¹, А.Аманов^{1,3}

¹НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова»,
Казахстан, Шымкент

²«Краковский университет АГН», Польша, Краков

³Университет Тампере, Финляндия

Анализ напряженно-деформированного состояния шестерен методом конечных элементов в SolidWorks

Аннотация. Данное исследование посвящено оценке напряженно-деформированного состояния прямозубого цилиндрического зубчатого колеса с помощью численного моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в SolidWorks Simulation. Основная цель - оценить прочность зубчатого колеса при статическом нагружении с учетом температурных условий и выявить зоны концентрации напряжений. Исследование включает в себя как теоретические расчеты, так и численное моделирование. Шестерня, изготовленное из легированной стали 40X, смоделированное в 3D, было подвергнуто силовым нагрузкам и соответствующим граничным условиям. Результаты показали, что максимальные эквивалентные напряжения оставались значительно ниже предела текучести материала, а все деформации находились в пределах упругой области. Результаты также выявили критические области, подверженные

локальным пикам напряжений. Сравнение с аналитическими методами подтвердило более высокую точность МКЭ в прогнозировании распределения напряжений. Полученные результаты способствуют оптимизации конструкции зубчатого колеса за счет повышения надежности и усталостной стойкости. Методика и результаты имеют практическое значение для повышения долговечности и эксплуатационных характеристик зубчатых механизмов в машиностроении.

Ключевые слова: зубчатая передача, шестерня, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, SolidWorks, прочность, моделирование.

Д.С. Мырзалиев¹, Яцек Цеслик², О.Б. Сейдуллаева¹, А.Аманов³

¹*«М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ,
Қазақстан, Шымкент*

²*AGH Краков университеті, Польша, Краков*

³*Тампере Университеті, Финляндия*

SolidWorks-тегі соңғы элементтер арқылы тістегеріштің кернеулі деформацияланған күйін талдау

Аңдатпа. Бұл зерттеу SolidWorks Simulation-да жүзеге асырылған соңғы элементтер әдісін (СЭӘ) қолдана отырып, сандық модельдеу арқылы тік тісті цилиндрлік тісті доңғалақтың кернеулі деформацияланған күйін бағалауға арналған. Негізгі мақсат-температура жағдайларын ескере отырып, статикалық жүктеме кезінде беріліс беріктігін бағалау және кернеу концентрациясының аймақтарын анықтау. Зерттеу теориялық есептеулерді де, сандық модельдеуді де қамтиды. Бөлшек материалы 40Х легирленген болаттан жасалған, 3D модельденген тісті доңғалақ күш жүктемелеріне және тиісті шекаралық жағдайларға ұшырады. Нәтижелер максималды эквивалентті кернеулер материалдың аққыштық шегінен едәуір төмен болып қалғанын және барлық деформациялар серпімді аймақта болғанын көрсетті. Нәтижелер сонымен қатар жергілікті кернеу шыңдарына ұшырайтын маңызды аймақтарды анықтады. Аналитикалық әдістермен салыстыру кернеудің таралуын болжауда СЭӘ жоғары дәлдігін растады. Нәтижелер сенімділік пен шаршауға төзімділікті арттыру арқылы беріліс құрылымын оңтайландыруға ықпал етеді. Техника мен нәтижелер машинажасаудағы беріліс механизмдерінің беріктігі мен пайдалану сипаттамаларын арттыру үшін практикалық маңызға ие.

Түйін сөздер: тісті беріліс, тістегеріш, кернеулі деформацияланған күй, соңғы элементтер әдісі, SolidWorks, беріктік, модельдеу.

References

1. Zhu R., Zhou Z., Wu Y. Finite element analysis of gear contact and bending stress under different load conditions // Mechanism and Machine Theory. – 2020. – Vol. 150. – P. 103859. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103859
2. Kim J., Lee Y. Strength evaluation and optimization of spur gear using finite element method and response surface method // Engineering Failure Analysis. – 2019. – Vol. 104. – P. 379–390. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.010

3. Rakhymtai N.N., Myrzaliyev D.S., Seitkazenova K.K., Kadirov N.A., Seidullayeva O.B. *Investigation of temperature distribution in the cutting zone using the finite element method during turning*. Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, No. 2, Ust-Kamenogorsk, 2025, pp. 61–70.
4. Xu B., Liu X., Li C., Huang H. Cutting performance of tools made of different materials in the machining of 42CrMo4 high-strength steel: a comparative study // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 93. – P. 2061–2069. – DOI: 10.1007/s00170-017-0666-6
5. Magalhães R., Santos L.F., da Silva C.A. Tool wear effect on surface integrity in AISI 1045 steel dry turning // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, No. 6. – Article 2031. – DOI: 10.3390/ma15062031
6. Li J., Fu S., Wang Y. Study on serrated chip formation and tool wear of cermet tools for milling stainless steel 3Cr13Cu // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 77. – P. 461–467. – DOI: 10.1007/s00170-014-6476-1
7. Das D., Maity P., Bandyopadhyay A. Experimental investigation of various machining attributes and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with untreated and cryo treated cermet inserts // *Mechanics & Industry*. – 2020. – Vol. 21. – Article 110. – DOI: 10.1051/meca/2019082
8. Lánc T., Pánek M., Mucha M. Tool life experiment of coated cermet during nodular cast iron turning // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2024. – Vol. 133. – P. 1129–1141. – DOI: 10.1007/s00170-024-13741-2
9. Elgazzar M., Ramesh K., Qasim B. A critical review of high-temperature tribology and cutting performance of cermet and ceramic tool materials // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 11, No. 3. – Article 122. – DOI: 10.3390/lubricants11030122
10. Sarjana S.S., Bencheikh I., Nouari M., Ginting A. Study on cutting performance of cermet tool in turning of hardened alloy steel // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2020. – Vol. 91. – Article 105255. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105255
11. Şirin Ş. Investigation of the performance of cermet tools in the turning of Haynes 25 superalloy under gaseous N₂ and hybrid nanofluid cutting environments // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 76. – P. 428–443. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.02.029
12. Das A., Mukhopadhyay A., Patel S.K., Biswal B.B. Comparative assessment on machinability aspects of AISI 4340 alloy steel using uncoated carbide and coated cermet inserts during hard turning // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 41. – P. 4531–4552. – DOI: 10.1007/s13369-016-2160-0
13. Zheng G., Li L., Li Z., Gao J., Niu Z. Wear mechanisms of coated tools in high-speed hard turning of high strength steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 94. – P. 4553–4563. – DOI: 10.1007/s00170-017-1132-1
14. Reis B.C., dos Santos A.J., dos Santos N.P., Câmara M.A., de Faria P.E., Abrão A.M. Cutting performance and wear behavior of coated cermet and coated carbide tools when turning AISI 4340 steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 105. – P. 1655–1663. – DOI: 10.1007/s00170-019-04392-9
15. Ji W., Zou B., Zhang S., Xing H., Wang Y. Design and fabrication of gradient cermet composite cutting tool, and its cutting performance // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 732. – P. 25–31. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.10.187.
16. KYOCERA SGS Precision Tools Group. Finishing steel faster: cermet vs. carbide, uncoated

- vs. coated [Electronic resource]. – 2024 Jan [cited 2025 Jun 21]. – Available from: <https://www.kyocera-sgstool.com>
17. Singh A., Kumar P. Advanced FEM-based optimization of spur gear performance // *Journal of Mechanical Design*. – 2023. – Vol. 145(8). – DOI: 10.1115/1.4062674
18. Chen Y., Zhao T. Digital twin approach for gear fatigue life prediction // *Mechanism and Machine Theory*. – 2022. – Vol. 172. – P. 104930. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104930
18. Seidullayeva O.B., Myrzaliyev D.S., Ibragimova Z.A. *Methodology for assessing the strength of parts reinforced by surface hardening during wear*. Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Sciences and Technologies Series, No. 2 (147), Astana, 2024, pp. 154–168.

Information about the authors:

Myrzaliyev Darkhan Saparbaevich - candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Kazakhstan, Shymkent

Jacek Cieslik - Doctor of Technical Sciences, Professor, AGH University of Krakow, Poland, Krakow

Seidullayeva Oryngul Bakhytkyzy - corresponding author, Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M.Auezov South Kazakhstan Research University», Kazakhstan, Shymkent

Amanov Auezhan - Associate Professor, Tampere University, Finland

Мырзалиев Дархан Сапарбаевич - к.т.н., доцент, факультет «Механика и нефтегазовое дело» НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», Казахстан, Шымкент

Яцек Цеслик - д.т.н., профессор «Краковский университет АГН», Польша, Краков

Сейдуллаева Орынгул Бахытовна - автор для корреспонденции, докторант по ОП «Машиностроение», факультет «Механика и нефтегазовое дело», НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», Казахстан, Шымкент.

Аманов Ауезхан - доцент, Университет Тампере, Финляндия.

Мырзалиев Дархан Сапарбайұлы - т.ғ.к., доцент, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Қазақстан, Шымкент

Яцек Цеслик - т.ғ.д., профессор «АГН Краков университеті», Польша, Краков

Сейдуллаева Орынгул Бахытқызы - хат-хабар авторы, «Машинажасау» БББ бойынша докторант, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Қазақстан, Шымкент

Аманов Ауезхан - доцент, Тампере Университеті, Финляндия





ХҒТАР 73.41.41
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-167-189>

Карьерлік техниканың агрегаттарының жөндеу интервал уақыт аралығын оңтайландыру әдісін құру

А.С.Кадыров^{id}, А.Б.Кукешева^{id}, М.С.Дәрібжан*^{id},
Е.С.Бақытов^{id}, А.Ж.Карсакова^{id}

*Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ,
Қарағанды, Қазақстан*

*E mail:adil.suratovich@mail.ru , aliya.kukesheva@bk.ru, *miras9779@gmail.com,
elhan96@mail.ru, karsakova84@mail.ru*

Аңдатпа. Бұл мақалада KazMinerals Бозшакол кен өндірісі кәсіпорнының карьерлік техникасының, атап айтқанда САТ 16М және 16МЗ модельді автогрейдерлерінің рульдік цилиндрлері мысалында агрегаттардың жөндеу уақыт аралығын оңтайландыру әдістемесі ұсынылады. Зерттеу барысында 2018–2025 жылдар аралығындағы жоспарлы және жоспардан тыс жөндеулер бойынша нақты өндірістік статистикалық деректерге талдау жүргізілді. Агрегаттардың істен шығу себептері мен жұмыс ресурсы МТBF (істен шығулар арасындағы орташа уақыт) және МТBS (жоспарлы жөндеулер арасындағы уақыт) көрсеткіштері арқылы сандық тұрғыдан бағаланды. Есептеулер нәтижесінде 7000 және 12000 мотосағатты құрайтын екі оңтайлы жөндеу уақыт интервалы анықталды. Бұл аралықтар техниканың нақты жұмыс режиміне бейімделіп, жоспардан тыс ақаулардың алдын алуға және техникалық қызмет көрсету стратегиясын оңтайлы және икемді етуге бағытталған. Бұл әдіс нақты жұмыс жағдайларын ескеріп, жөндеу аралықтарын икемді жоспарлауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жоспардан тыс істен шығулардың алдын алып, техниканың толық ресурсын тиімді пайдалануға жағдай жасайды. Ұсынылған тәсіл жөндеу стратегиясын жетілдіру арқылы өндірістің тұрақтылығын арттыруға, қосымша шығындарды азайтуға және техникалық қызмет көрсету үдерісін оңтайландыруға ықпал етеді.

Түйін сөздер: жөндеу интервалы, сенімділік, мотосағат, рульдік цилиндр, жоспарлы жөндеу, карьерлік техника.

Кіріспе

Қазіргі кезде тау-кен өнеркәсібінде қолданылатын ауыр карьерлік техника жоғары өнімділік талаптарын орындай отырып, өте күрделі және ауыр пайдалану жағдайларына бейімделуге тиіс. Мұндай машиналар үздіксіз және қарқынды жүктеме астында жұмыс істеуге жобаланғанымен, уақыт өте келе олардың негізгі агрегаттары мен құрамдас элементтері табиғи тозуға ұшырайды. Сол себепті бір ғана маңызды компоненттің, мысалы рульдік цилиндрдің, істен шығуы бүкіл өндірістік үдерістің тоқтап қалуына әкелуі мүмкін. Бұл компоненттің жүктеме қабылдау ерекшелігіне байланысты мәселенің өзектілігі одан әрі арта түседі [1].

Жөндеу стратегияларын тиімді ұйымдастыру – өндірістік тиімділікті, сенімділікті және шығындарды оңтайландырудың негізгі шарты. Тау-кен кәсіпорындарының басым бөлігінде техникалық қызмет көрсетудің жоспарлы жүйесі қолданылады. Алайда, белгіленген жөндеу регламенттері (мысалы, әр 15 000 мотосағат сайын күрделі жөндеу жүргізу) барлық жағдайда техниканың нақты техникалық жай-күйіне сәйкес келе бермейді. Тәжірибе көрсеткендей, кейбір агрегаттар белгіленген межеге жетпей істен шығып, жоспардан тыс жөндеуді талап етеді. Бұл өндірістің үзілуіне, қосымша шығындардың артуына және жабдық сенімділігінің төмендеуіне алып келеді [2].

Жоспардан тыс жөндеулердің жиілеуі жоспарлы жөндеу аралығының техниканың нақты пайдалану жүктемесіне сәйкес келмейтінін көрсетеді. Ал жөндеу мерзімі шамадан тыс ерте белгіленсе, техникалық ресурстың толық пайдаланылмауына және экономикалық тиімсіздікке әкеледі. Осы факторлар агрегаттың нақты жұмыс көрсеткіштеріне сүйене отырып, жөндеу аралығын икемді және дәл анықтау қажеттігін дәлелдейді. Яғни, әрбір агрегаттың пайдалану ерекшеліктерін ескеріп, оңтайлы жөндеу уақытын есептеу – техниканың сенімділігін сақтау және өндірістік шығындарды азайту үшін маңызды бағыт болып табылады [3].

Бүгінгі таңда техникалық қызмет көрсетуді оңтайландыруға бағытталған әртүрлі тәсілдер бар. Мысалы, Sharma (2021) «*Maintenance Scheduling of Mining Excavators Using Cox Regression and Linear Programming*» еңбегінде техниканың тиімді жұмысын қамтамасыз ету үшін Кокс регрессиясы мен сызықтық бағдарламалау әдістерін қолданса [4], Dashtaki (2025) «*Analysis of Repairability and Downtime Structure of Excavators in the Copper Mines of Iran*» атты зерттеуінде нақты жөндеу уақыттарының құрылымына терең талдау жүргізіп, шығындарды ұйымдастыру арқылы қысқарту жолдарын ұсынған [5]. Дегенмен аталған тәсілдердің ортақ шектеуі — олар нақты агрегат үшін оңтайлы жөндеу уақытын есептеуге бағытталмаған және техниканың тозу динамикасы мен нақты жүктемесін ескере отырып, жұмыс циклдерін нақты ажыратпайды.

Осы себепті бұл зерттеу карьерлік техниканың агрегаттары, соның ішінде рульдік цилиндрлер мысалында, жөндеу аралығын дәл анықтауға арналған әдістемені ұсынады. Әдіс агрегаттың істен шығуына дейінгі нақты мотосағатқа, сондай-ақ жоспарлы және жоспардан тыс жөндеулерге қатысты жинақталған статистикалық деректерге негізделеді. Мұндай тәсіл жабдықтың сенімділігін сандық түрде бағалауға және оның нақты пайдалану ерекшеліктеріне бейімделген оңтайлы жөндеу уақытын анықтауға мүмкіндік береді [3].

Зерттеу мақсаты – рульдік цилиндрлерге қатысты жоспарлы және жоспардан тыс жөндеулердің статистикалық деректерін талдай отырып, техникалық жағынан негізделген, әрі өндірістік жағдайға бейімделген оңтайлы жөндеу уақыт аралығын

анықтау. Бұл зерттеу әрі қарай осы аралықтың экономикалық тиімділігіне қатысты зерттеудің негізі болады.

Әдіснама

Зерттеу мақсатына жету үшін келесі міндеттер кезең-кезеңімен орындалды:

1. Карьерлік техниканың агрегаттарының жоспарлы және жоспардан тыс жөндеу жағдайларын талдау;
 2. Статистикалық параметрлерді талдау;
 3. Статистикалық деректерді өңдеу және оңтайлы интервалды есептеу;
- Ғылыми жаңалығы:



1-сурет. CAT 16M, 16M3 модельді автогрейдердің рульдік цилиндрі

Осы зерттеу жұмысының ғылыми жаңалығы – карьерлік техниканың жүктемеге аса сезімтал агрегаттарының (рульдік цилиндрлер) нақты пайдалану деректері негізінде MTBF (істен шығулар арасындағы орташа уақыт) және MTBS (жоспарлы жөндеулер арасындағы уақыт) көрсеткіштерін біріктіру арқылы екі сатылы оңтайлы жөндеу аралығын есептеу тәуелділіктерін алғаш рет ұсынылуында. Бұл тәуелділіктерге негізделген әдістеме нақты өндірістік статистикаға сүйене отырып, икемді, адаптивті жөндеу стратегиясын құруға және жоспардан тыс істен шығулардың алдын алуға ғылыми негіз береді.

Практикалық маңыздылығы: ұсынылған әдістеме KazMinerals Бозшакол секілді өндірістік кәсіпорындарда техникалық қызмет көрсету жүйесін жетілдіруге тікелей қолданыла алады. Оңтайлы жөндеу интервалы арқылы жоспардан тыс тоқтап қалулардың алдын алып, жөндеу жұмыстарына кететін шығындарды азайтуға және техниканың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл әдіс техникалық ресурстарды ұтымды пайдалануға, жөндеу стратегиясын нақты өндірістік жағдайға бейімдеуге және жабдықтың

өмірлік циклін ұзарта отырып, жалпы өндірістік процестің тұрақтылығын қамтамасыз етуге ықпал етеді.

1-кесте. CAT 16М, 16М3 модельді автогрейдердің рульдік цилиндрлерінің статистикасы [6, 7-12]

№	Жөндеу циклі	Сериялық нөмері	Жіберілген күні	Істен шығу себебі	Жөндеу түрі	Жөндеу соммасы
1	1	SC16M1	17.04.2022	Соташықты (шток) ауыстыру жаңадан	Жоспарлы	1 405 416 Т
2	1	SC16M2	15.03.2025		Жоспарлы	1 101 095 Т
3	1	SC16M3	09.08.2024	Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспарлы	1 528 078 Т
4	1	SC16M4	02.01.2019	Дайындалған соташықпен (шток) ауыстыру	Жоспарлы	903 434 Т
5	2	SC16M4	29.01.2021	Соташық(шток) бойымен тығыздағыш арқылы ағып кету. Дайындалған соташықты (шток) және гильзаны ауыстыру	Жоспардан тыс	700 706 Т
6	W	SC16M4	26.12.2021	Тұрғыландыру (Позиционирование) бергішінің (датчик) ақауы	Жоспардан тыс	
7	4	SC16M4	29.10.2022	Соташық (шток) бойымен тығыздағыш арқылы ағып кету. Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспардан тыс	1 254 831 Т
8	5	SC16M4	16.08.2023	Соташық (шток) піспегінің (поршень) үзілуі. Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспардан тыс	1 353 813 Т
9	1	SC16M5	09.08.2018		Жоспарлы	
10	2	SC16M5	09.07.2021	Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспарлы	973 523 Т
11	3	SC16M5	16.08.2023	Дайындалған соташықты (шток), гильзаны, піспекті (поршень) және қақпақты (крышка) ауыстыру	Жоспарлы	1 971 953 Т
12	1	SC16M6	02.01.2019	Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспарлы	903 434 Т
13	2	SC16M6	24.01.2024	Соташық (шток) піспегінің (поршень) үзілуі. Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспардан тыс	1 437 849 Т
14	3	SC16M6	05.02.2025	Цилиндрдің электр сымдар шоғысында ақау бар. Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспардан тыс	915 816 Т
15	1	SC16M7	09.08.2018		Жоспарлы	
16	2	SC16M7	09.07.2021	Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспарлы	876 072 Т
17	3	SC16M7	21.03.2023	Цилиндрдің соташығының (шток) сынуы. Дайындалған соташықты (шток), гильзаны, піспекті (поршень) және қақпақты (крышка) ауыстыру	Жоспардан тыс	1 617 796 Т
18	4	SC16M7	09.08.2024	Тұрғыландыру (Позиционирование) бергішінің (датчик) ақауы.	Жоспардан тыс	1 604 274 Т

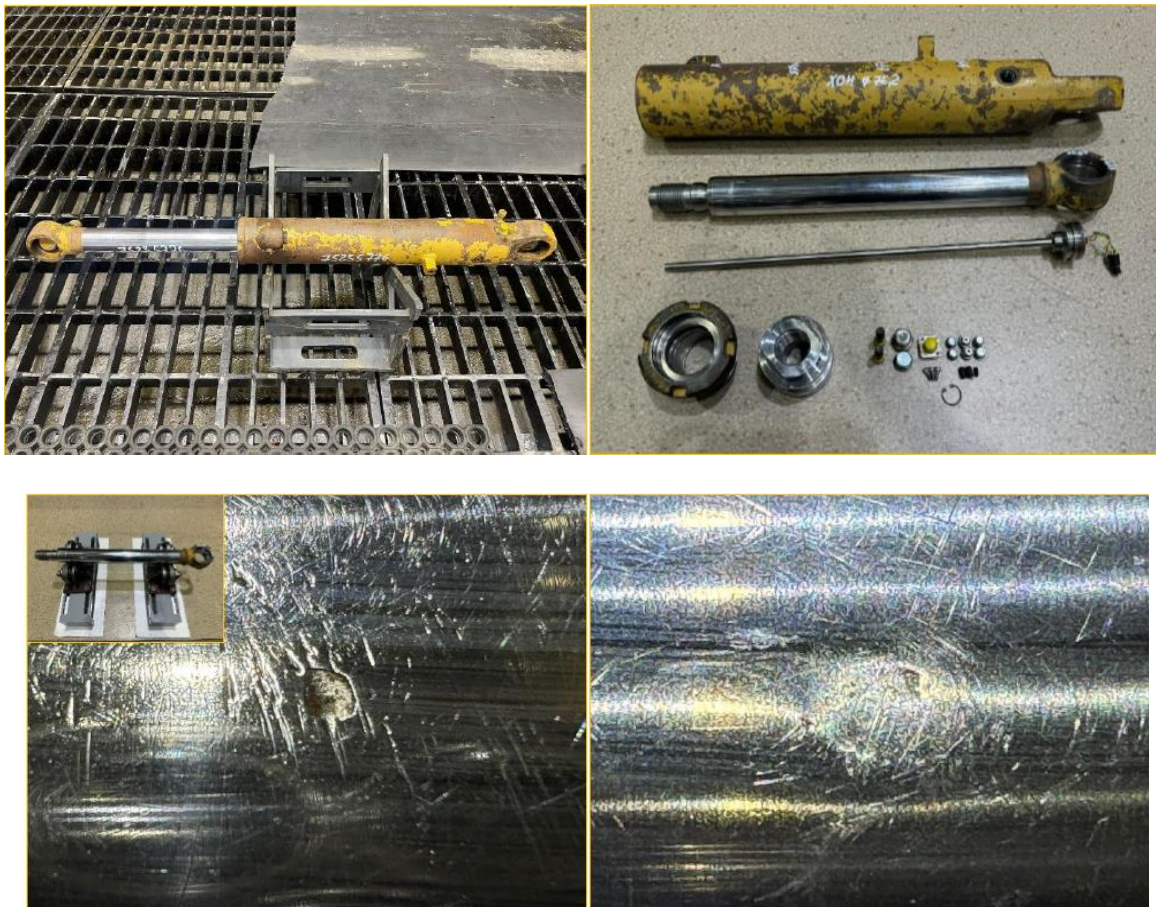
				Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру		
19	1	SC16M8	21.06.2019		Жоспарлы	453 608 Т
20	2	SC16M8	16.10.2020	Соташық (шток) бойымен тығыздағыш арқылы ағып кету. Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспардан тыс	934 371 Т
21	3	SC16M8	19.07.2024	Тұрғыландыру (Позиционирование) бергішінің (датчик) ақауы. Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспардан тыс	1 667 029 Т
22	1	SC16M1 2	21.06.2019		Жоспарлы	805 155 Т
23	2	SC16M1 2	17.04.2022		Жоспарлы	838 197 Т
24	3	SC16M1 2	09.08.2024	Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспарлы	1 458 557 Т
25	1	SC16M9	15.08.2020	Соташық (шток) бойымен тығыздағыш арқылы ағып кету. Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспардан тыс	831 234 Т
26	2	SC16M9	28.12.2023	Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспарлы	1 366 396 Т
27	1	SC16M1 0	15.08.2020	Соташық (шток) бойымен тығыздағыш арқылы ағып кету. Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспардан тыс	852 043 Т
28	W	SC16M1 0	05.02.2022	Соташық (шток) бойымен тығыздағыш арқылы ағып кету	Жоспардан тыс	
29	3	SC16M1 0	20.02.2024	Соташықпен (шток) қосылатын саусақтың (палец) үзілуі, нәтижесінде құлақшасына (проушина) зақым келген. Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспардан тыс	1 552 890 Т
30	1	SC16M1 3	22.01.2022		Жоспарлы	913 057 Т
31	1	SC16M1 1	22.01.2022	Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспарлы	1 277 530 Т
32	2	SC16M1 1	12.05.2023	Соташықпен (шток) қосылатын саусақтың (палец) үзілуі, нәтижесінде құлақшасына (проушина) зақым келген. Дайындалған соташықты (шток) ауыстыру	Жоспардан тыс	1 330 300 Т
Жоспардан тыс жөндеу жұмыстарына жұмсалған жалпы сомма						16 052 951 Т
Жоспарлы жөндеу жұмыстарына жұмсалған жалпы сомма						15 674 409 Т
Жоспардан тыс жөндеу жұмыстарына жұмсалатын орташа сомма						1 234 842 Т
Жоспарлы жөндеу жұмыстарына жұмсалатын орташа сомма						1 119 601 Т

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6, 7-12]

1. Жоспардан тыс агрегаттардың жөндеулеріне және істен шығу себептеріне талдау.

Зерттеу жұмысының мақсатына сәйкес, карьерлік техниканың жұмысын талдау және агрегаттардың істен шығу заңдылықтарын анықтау үшін CAT 16М және 16М3 үлгісіндегі автогрейдерлердің рульдік цилиндрлері қарастырылды (1-сурет).

Осы рульдік цилиндрлердің жүргізілген жөндеу жұмыстарына қатысты статистикалық мәліметтер жинақталды (кесте 1) [7-12].



2-сурет. SC16M9 рульдік цилиндрінің соташық (шток) бойындағы хромдалған қабаттың механикалық зақымдануы көрінісі [6]

Зерттеу мақсаттары үшін ашық интернет-дереккөздерінен алынған қосымша ақпарат пайдаланылды. Бұл ақпарат рульдік цилиндрлерді жөндеу кезінде қолданылатын қосалқы бөлшектердің шамамен алынған құнын қамтиды. Бағаға қатысты мәліметтер Caterpillar техникасына арналған қосалқы бөлшектерді жеткізушілердің көпшілікке қолжетімді коммерциялық ұсыныстары мен каталогтары негізінде жиналды. Қосалқы бөлшектердің шамаланған құнын анықтау кезінде пайдаланылған интернет-дереккөздердің тізімі «Пайдаланылған әдебиеттер» бөлімінде келтірілген және ашық баға ақпаратын ұсынатын ресми және тәуелсіз дистрибьюторлардың сайттарына сілтемелерді қамтиды [7–12].

Барлық мәліметтер кәсіпорынның ішкі коммерциялық ақпаратын жарияламай, тек зерттеу және есептік мақсаттарға шығын құрылымы мен олардың арақатынасын бағалау

үшін ғана пайдаланылды. Рульдік цилиндрлерді жөндеу бойынша жиынтық ақпарат 1-кестеде берілген.

Жоғарыда келтірілген кестеде агрегаттарға жүргізілген жөндеу жұмыстарының саны, олардың істен шығу себептері және қалпына келтіруге жұмсалған шығындар жөніндегі мәліметтер берілген. Сонымен қатар, кестеде жоспарлы (техникалық қызмет көрсету кестесіне сәйкес) және жоспардан тыс (кенеттен туындаған ақаулықтар салдарынан) жөндеулердің түрлері, сондай-ақ агрегаттардың істен шығу себептері көрсетілген.

Кестедегі деректер негізінде рульдік цилиндр агрегаттарына қатысты жоспардан тыс жөндеу жағдайлары мен олардың негізгі ақау себептеріне байланысты жан-жақты талдау жүргізілді.

2-кесте. SC16M9 рульдік цилиндрінің жөндеу жұмысына қажет болған қосалқы бөлшектер тізімі [6, 7-12]

Бөлшек нөмірі	Бөлшек атауы	Саны	Бағасы (теңге)	Сомасы (теңге)
2675257	Орын анықтау датчигі (Датчик позиционера)	1	297088,92	297088,92
2606117	Шарикті саусақ (Шаровой палец)	1	74891,71	74891,71
3076273	Гидроцилиндрге арналған тығыздағыштар жинағы (Комплект уплотнений гидроцилиндра)	1	52521,10	52521,10
2761816	Қорғаныс қалқаны (Защитный кожух)	1	16102,83	16102,83
2493505	Мойынтірек сақинасы (обойма подшипника)	1	14733,78	14733,78
8B1002	Сомын (гайка)	1	10733,09	10733,09
4418164	Тығыздағыш қаптама (пыльник)	1	6169,45	6169,45
2673865	Дайындалған соташық (Изготовленный шток)	1	205598,79	205598,79

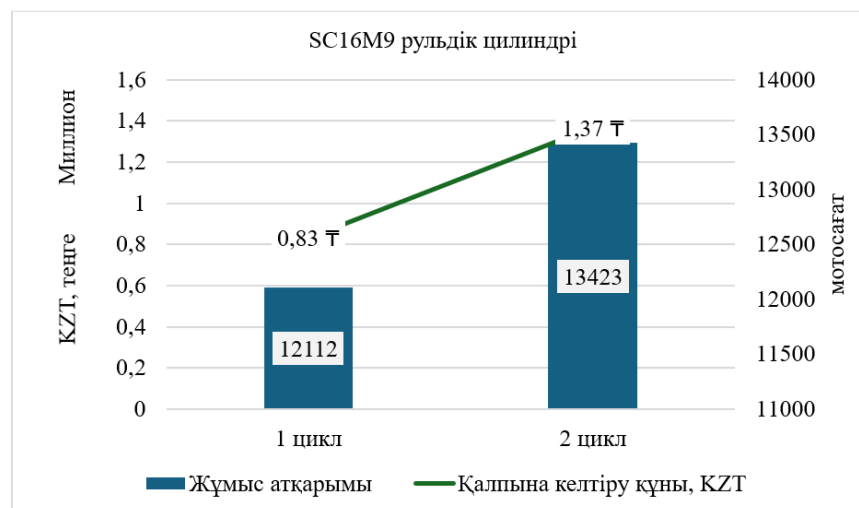
Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6, 7-12]

1-жағдай. Соташық (шток) бойымен тығыздағыш арқылы ағып кету. Сериялық нөмірі SC16M9 рульдік цилиндрі жөндеуге келіп түсті. Жөндеу жүргізілген сәттегі агрегаттың жалпы жұмыс уақыты 12112 мотосағатты құрады. Бұл жоспардан тыс орындалған алғашқы жөндеу циклі болды.

Ағып кетудің негізгі себебі – соташық (шток) бойындағы хромдалған қабаттың механикалық зақымдануы. Нақтырақ айтқанда, хром жабынының сызаттары тығыздағыш элементтерді (уплотнитель) зақымдап, нәтижесінде жоғары қысымдағы гидравликалық сұйықтықтың ағып кетуіне алып келген (2-сурет) [6]. Содан кейін рульдік цилиндрдің жөндеу жұмысына қажет болған қосалқы бөлшектерге талдау жүргізілді.

Олардың атауы, бағасы және қажетті сандары 2-кестеде көрсетілген [6]. 2-кестеде келтірілген мәліметтерге сүйене отырып, келесі қорытынды жасауға болады: жөндеуге пайдаланылған бөлшектердің ішінде ең қымбаттары орын анықтау датчигі мен арнайы дайындалған соташық (шток) болды. Содан соң SC16M9 рульдік цилиндріне қатысты жөндеу жұмыстарының толық тарихы қарастырылды, ол 3-суретте көрсетілген.

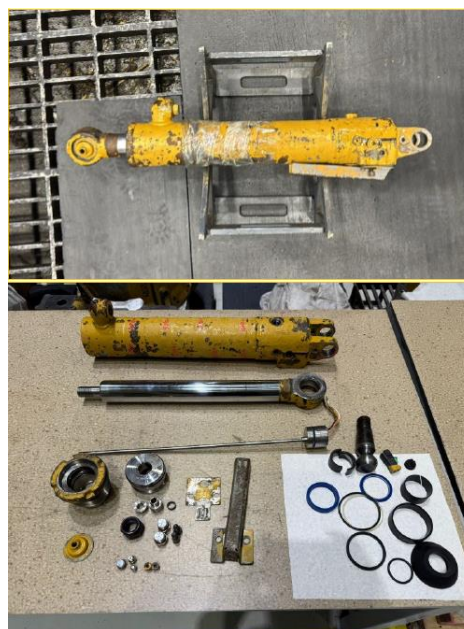
3-суреттегі диаграммаға сәйкес, аталған агрегат екі жөндеу циклынан өткен. Екінші жөндеу жұмысы жоспарлы түрде жүргізілгенімен, оның қалпына келтіру құны (жөндеуге жұмсалған шығын) бірінші, жоспардан тыс жөндеу жұмысына қарағанда жоғары болған.



3-сурет. SC16M9 рульдік цилиндрінің жөндеу тарихының диаграммасы

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6]

2-жағдай. Соташық (шток) бойымен тығыздағыш арқылы ағып кету. Сериялық нөмірі SC16M4 рульдік цилиндрі жөндеуге келіп түсті (4-сурет).



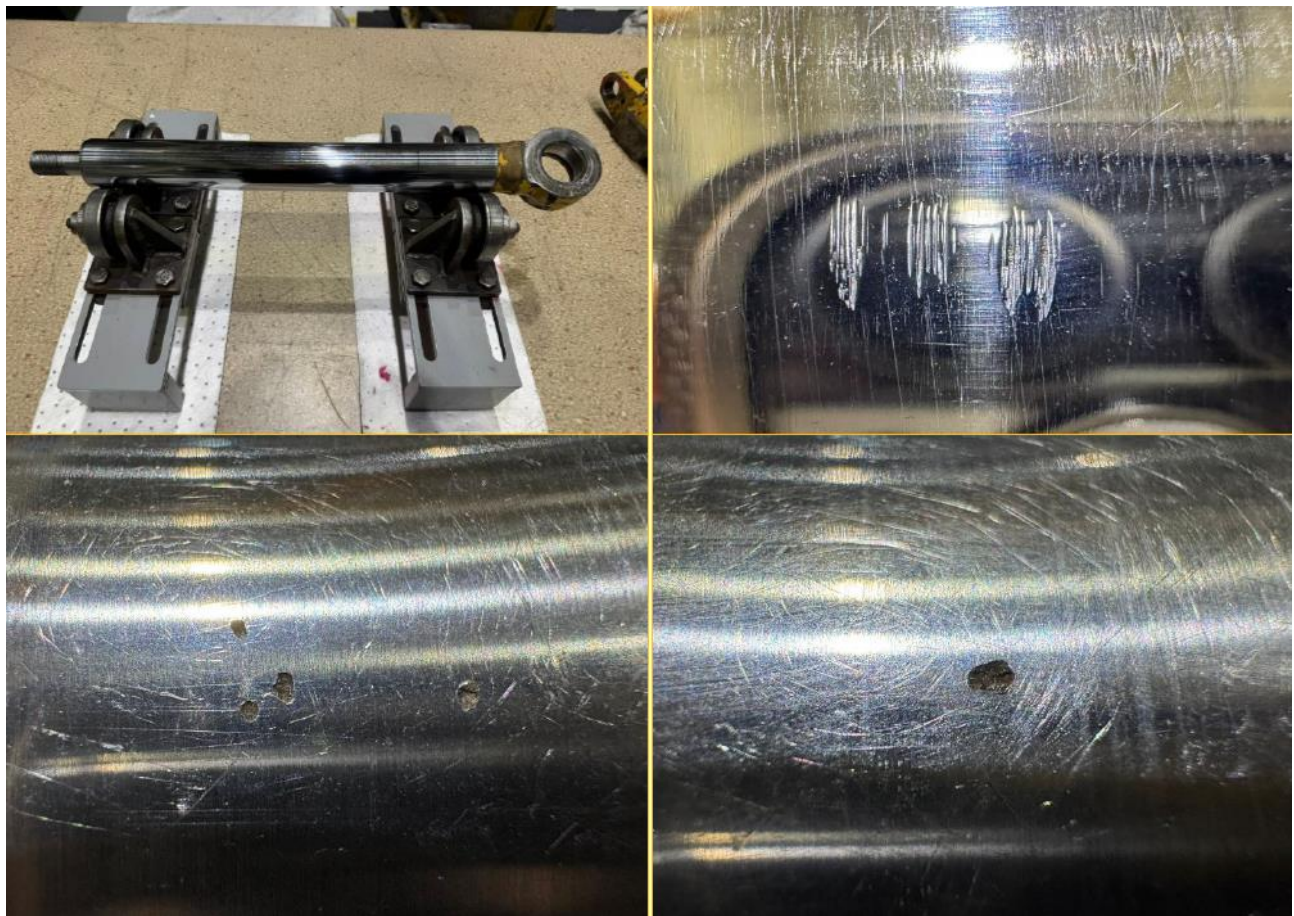
4-сурет. SC16M4 рульдік цилиндрінің жөндеуге келіп түскендегі көрінісі

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6]

Бұл айырмашылықтың себебін түсіну үшін 1-кестеде келтірілген рульдік цилиндрлердің статистикасындағы 26-нөмірлі жолға назар аудару керек. Аталған жолда «істен шығу себебі» бағанында қандай бөлшек ауысқаны көрсетілген. Талдау нәтижесінде

белгілі болғандай, екінші жоспарлы жөндеу циклында да дайындалған соташық (шток) ауыстырылған. Бұл жағдай жөндеу құнының артуына айтарлықтай әсер еткен. Сонымен қатар, бірінші және екінші жөндеу аралығындағы үш жыл ішінде инфляция деңгейі мен қосалқы бөлшектерге байланысты бағаның өсуі де есепке алынды. Осыған байланысты шығын көлемінің ұлғаюы объективті және орынды болып табылады [6].

Жөндеу жүргізілген сәттегі агрегаттың жалпы жұмыс уақыты 24 418 мотосағатты құрады. Бұл жоспардан тыс орындалған бірінші жөндеу циклі болғанымен, жалпы жөндеу реттілігі бойынша екінші, себебі оған дейін бірінші жоспарлы жөндеу жүргізілген. Ағып кетудің басты себебі – соташық бойындағы хром жабынының механикалық зақымдануы (5-сурет) [6].



5-сурет. SC16M4 рульдік цилиндрінің соташық (шток) бойындағы хромдалған қабаттың механикалық зақымдануы көрінісі

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6]

Хром қабатындағы сызаттар тығыздағыштың тозуына және жыртылуына себеп болып, нәтижесінде жоғары қысымдағы гидравликалық сұйықтықтың сыртқа ағып кетуі орын алған. Бұл жағдай бірінші SC16M9 үлгісіндегі агрегатта кездескен ақаумен толық сәйкес келеді, яғни қайталанатын құрылымдық мәселе бар екенін көрсетеді. Аталған

жағдай бойынша да рульдік цилиндрдің жөндеу жұмысына қажет болған қосалқы бөлшектерге талдау жүргізілді. Қосалқы бөлшектердің атауы, бағасы және қажетті саны 3-кестеде келтірілген [6].

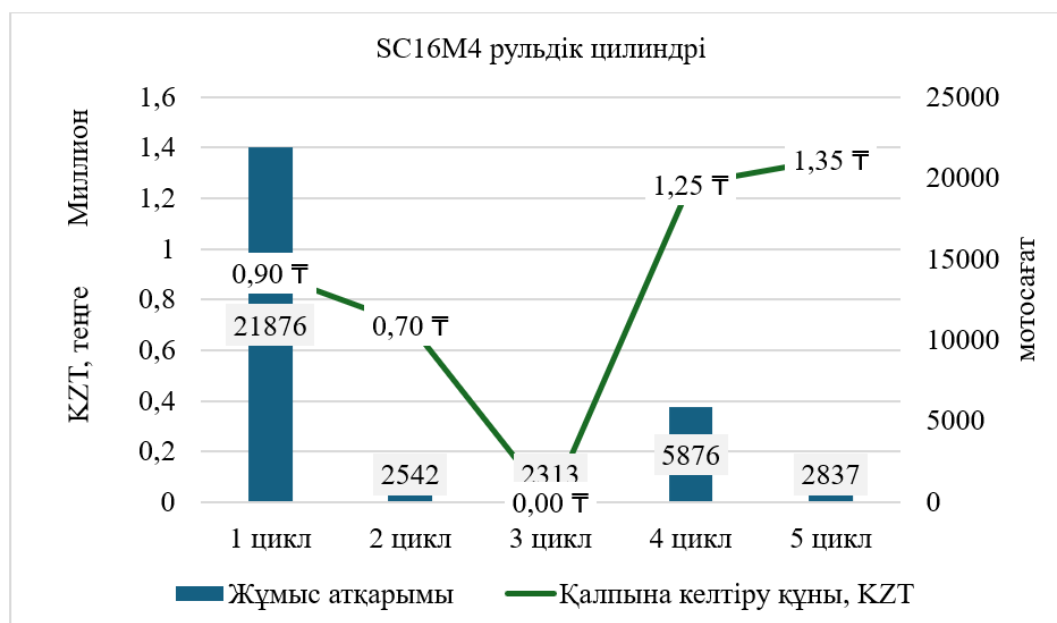
3-кестеде келтірілген мәліметтерге сүйене отырып, келесі жағдайды байқауға болады: жөндеуге пайдаланылған бөлшектердің ішінде ең қымбаттары арнайы дайындалған соташық (шток) пен гильза болған. SC16M9 рульдік цилиндріне қатысты 1-жағдайда қолданылған бөлшектермен салыстырғанда (2-ші кесте), SC16M4 цилиндрін жөндеуде бөлшектер саны біршама аз болған.

3-кесте. SC16M4 рульдік цилиндрінің жөндеу жұмысына қажет болған қосалқы бөлшектер тізімі [6, 7-12]

Бөлшек нөмірі	Бөлшек атауы	Саны	Бағасы (теңге)	Сомасы (теңге)
2493505	Мойынтірек сақинасы (обойма подшипника)	1	14733,78	14733,78
4418164	Тығыздағыш қаптама (пыльник)	1	6169,45	6169,45
2673865	Дайындалған соташық (Изготовленный шток)	1	205598,79	205598,79
2673864	Дайындалған гильза (изготовленная гильза)	1	277569,58	277569,58

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6, 7-12]

SC16M4 рульдік цилиндрінің де жөндеу жұмыстарының толық тарихы қарастырылды, ол 6-суретте көрсетілген [6].



6-сурет. SC16M4 рульдік цилиндрінің жөндеу тарихының диаграммасы

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6]

Жоғарыдағы 6-суреттегі диаграммаға сәйкес, зерттеліп отырған агрегат жалпы бес жөндеу циклынан өткен. Бірінші жоспарлы жөндеуден кейін қысқа уақыт аралығында қатарынан бірнеше жоспардан тыс жөндеу жұмыстары орын алған. Бұл жөндеулердің арасындағы жұмыс уақыты 2000 және 5000 мотосағат шамасында болған. Аталған жағдайдың себептерін анықтау мақсатында 1-кестеде келтірілген рульдік цилиндрлер статистикасының 4 пен 8-нөмірлі жолдарына талдау жүргізілді. Бірінші жөндеуге келген кездегі мотосағат мөлшері 21876 болған, бұл цилиндрдің бірінші циклдік жұмысты толық әрі сәтті аяқтағанын білдіреді. Екінші жөндеудің себебі – соташық (шток) бойымен тығыздағыш арқылы гидравликалық сұйықтықтың ағып кетуі. Бұл жағдай соташық бетінің қандай да бір сыртқы факторлардың әсерінен зақымдалуынан туындаған. Соның салдарынан тығыздағыш элементтер жыртылып, гильза ішіндегі жоғары қысымдағы сұйықтық сыртқа ағуға мәжбүр болған.

Алайда бұл жерде назар аударатын маңызды мәселе, 3-кестеде көрсетілген SC16M4 цилиндріне жүргізілген жөндеу жұмыстарына қажет бөлшектер тізімінің салыстырмалы түрде аздығы. Бұл көрсеткіш 1-жағдайдағы SC16M9 цилиндрімен салыстырғанда (2-ші кесте) айтарлықтай айырмашылықты байқатады және стандартты деп есептелетін барлық бөлшектердің ауыстырылмағанын көрсетеді. Осы толық ауыстырылмау факторы кейінгі 3-ші жоспардан тыс жөндеуге алып келді. Дегенмен, бұл жөндеу жағдайы кепілдік аясында болғандықтан, жөндеуге кеткен барлық шығын жөндеуші компания есебінен өтелген. Соған қарамастан, 5876 мотосағаттан кейін 4-ші жоспардан тыс жөндеу жұмысы қайта орын алған. Бұл жағдайдың себебі – алдыңғы жөндеуде стандартты бөлшектердің толық ауыстырылмауы. 4-ші жөндеу циклында бұл олқылықтар ескеріліп, барлық стандартты бөлшектер толық көлемде ауыстырылды. Алайда, 2837 мотосағат жұмыс істегеннен кейін агрегат тағы да жоспардан тыс жөндеуді қажет етті. Бұл жолы қате пайдалану салдарынан соташық поршені артық жүктемеге ұшырап, оның үзілуіне алып келген [6].

Жүргізілген талдау нәтижелері бойынша 1-кестеден келесі жағдайды байқауға болады: жоспардан тыс жөндеулер саны жоспарлы жөндеулермен шамалас болып, кейбір жағдайларда олардан асып түседі. Атап айтқанда, жоспардан тыс жөндеулер саны – 15, ал жоспарлы жөндеулер саны – 17. Қаржылық шығын тұрғысынан алғанда, жоспардан тыс жөндеулерге кеткен шығын – 16 052 951 теңге, ал жоспарлы жөндеулерге – 15 674 409 теңге болған. Бұл жағдай кәсіпорын үшін қосымша қаржылық ауыртпалық туғызатынын көрсетеді [6].

Сонымен агрегаттардың істен шығу себептері негізінен соташық (шток) бойымен тығыздағыш арқылы гидравликалық сұйықтықтың ағып кетуі, тұрғыландыру бергіші (датчик позиционера) ақауы, сондай-ақ механикалық үзілу мен сыну жағдайларымен байланысты [6].

Сонымен қатар, SC16M10 және SC16M4 сияқты кейбір рульдік цилиндрлер бірнеше рет жөндеуден өткен. Жүргізілген талдау барысында стандартты түрде ауыстырылуы тиіс бөлшектердің кей жағдайларда толық ауыстырылмайтыны анықталды. Бұл жайт олардың жиі істен шығуына және диагностикалық шаралардың сапасы жеткіліксіз екенін айғақтайды [6]. Осыған орай, жекелеген агрегаттардың қайталанатын бұзылуы жоспарлы жөндеудің бекітілген кестесімен жүргізілуі мерзімінен бұрын болатын тозудан қорғай алмайтынын, сондай-ақ бейімделмеген (адаптивті) тәсілдің болмауы істен шығу сәттерін

алдын ала болжауға мүмкіндік бермейтінін көрсетеді.

4-кесте. Рульдік цилиндрлерге жүргізілген жоспарлы және жоспардан тыс жөндеулер бойынша статистикалық ақпарат [6]

№	Жөндеу циклі	Жөндеуден кейінгі мотосағаты	Толық мотосағаты	Сериялық нөмері	Жөндеу түрі
1	1	9766	9766	SC16M1	Жоспарлы
2	1	19614	19614	SC16M2	Жоспарлы
3	1	17110	17110	SC16M3	Жоспарлы
4	1	21876	21876	SC16M4	Жоспарлы
5	2	2542	24418	SC16M4	Жоспардан тыс
6	3	2313	26731	SC16M4	Жоспардан тыс
7	4	5876	32607	SC16M4	Жоспардан тыс
8	5	2837	35444	SC16M4	Жоспардан тыс
9	1	17626	17626	SC16M5	Жоспарлы
10	2	13430	31056	SC16M5	Жоспарлы
11	3	19069	50125	SC16M5	Жоспарлы
12	1	21876	21876	SC16M6	Жоспарлы
13	2	8639	30515	SC16M6	Жоспардан тыс
14	3	3713	34228	SC16M6	Жоспардан тыс
15	1	17626	17626	SC16M7	Жоспарлы
16	2	13430	31056	SC16M7	Жоспарлы
17	3	13873	44929	SC16M7	Жоспардан тыс
18	4	6650	51579	SC16M7	Жоспардан тыс
19	1	17693	17693	SC16M8	Жоспарлы
20	2	6289	23982	SC16M8	Жоспардан тыс
21	3	15182	39164	SC16M8	Жоспардан тыс
25	1	12112	12112	SC16M9	Жоспардан тыс
26	2	13423	25535	SC16M9	Жоспарлы
27	1	12112	12112	SC16M10	Жоспардан тыс
28	2	3360	15472	SC16M10	Жоспардан тыс
29	3	3632	19104	SC16M10	Жоспардан тыс
31	1	16909	16909	SC16M11	Жоспарлы
32	2	7754	24663	SC16M11	Жоспардан тыс
22	1	17693	17693	SC16M12	Жоспарлы
23	2	16055	33748	SC16M12	Жоспарлы
24	3	9356	43104	SC16M12	Жоспарлы
30	1	16909	16909	SC16M13	Жоспарлы

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6]

Қорытындылай келе, жоспарлы жөндеу стратегиясын қайта қарау қажет. Себебі, нақты пайдалану жағдайларын ескермейтін тұрақты (фиксацияланған) жөндеу уақыт интервалы кәсіпорынға айтарлықтай қаржылық шығындар, техниканың ұзақ тұрып қалуы және қымбат жоспардан тыс жөндеулерге алып келуде.

2. Негізгі параметрлер бойынша статистикалық ақпаратты талдау.

Агрегаттардың жөндеу аралығын оңтайландыру әдісін құру үшін қолда бар статистикалық мәліметтер талданды. Атап айтқанда соңғы жөндеуден кейін орындалған мотосағаттар саны мен агрегаттардың жиынтық жұмыс уақытына қатысты статистикалық деректер жиналды. Аталған мәліметтер жөндеудің оңтайлы уақытын анықтауға негіз болатын негізгі ақпарат көзі болып табылады. (4-кесте) [6].

4-кестеде келтірілген деректерге сүйенсек, SC16M-5 және SC16M-12 рульдік цилиндрлері ең жоғары сенімділік көрсеткен агрегаттар қатарына жатады. Бұл цилиндрлер тек жоспарлы жөндеуден өткен және олардың жұмыс барысында жоспардан тыс ақаулықтар тіркелмеген [6].

Агрегаттар бойынша барлығы 15 жоспардан тыс жөндеу жағдайы анықталған. Бұл жөндеулердің тіркелу уақыты 2313-тен 15 182 мотосағатқа дейінгі аралықта орын алған. SC16M-4, SC16M-8 және SC16M-10 рульдік цилиндрлері жоспардан тыс ақауларға жиі ұшыраған агрегаттар ретінде бөлініп отыр. Бұл жағдай олардың істен шығу себептерін тереңірек зерттеу қажеттігін, сондай-ақ қолданыстағы жоспарлы жөндеу стратегиясын қайта қарауды талап етеді.

Осы деректер негізінде 7-суретте рульдік цилиндрлердің жөндеу түрлері бойынша мотосағаттармен бөліну диаграммасы көрсетілген [6].



7-сурет. Рульдік цилиндрлердің жөндеу түрлері бойынша бөлінуі
Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6]

Ұсынылған графикке сәйкес жоспардан тыс жөндеулердің көбінесе алғашқы жоспарлы жөндеуден кейін орын алатынын көрсетіп отыр. Сонымен қатар, тек жоспарлы жөндеулермен ғана шектелген агрегаттар да кездеседі. Алайда бұл агрегаттар, әдетте, белгіленген шекті мотосағат мөлшерінен аспаған. Мысалы, SC16M-12 рульдік цилиндрі орта есеппен 14 368 мотосағат жұмыс істеп, жоспардан тыс жөндеу қажеттілігіне ұшырамаған. Керісінше, SC16M-4 цилиндрі алғашқы жоспарлы жөндеуге 21 876 мотосағат

жұмыс істегеннен кейін ғана жіберілген. Бұл оның белгіленген шекті деңгейден (15 000 мотосағат) едәуір артық жүктемемен жұмыс істегенін көрсетеді. Соның салдарынан, бұл агрегат қайта-қайта жоспардан тыс жөндеуге түсіп отырған [6].

Сонымен қатар, кейбір жоспарлы жөндеу аралықтарының да оңтайлы болмауы ықтимал. Аралық тым ұзақ болған жағдайда – жоспардан тыс істен шығу қаупі артады, ал тым қысқа болған жағдайда – қызмет көрсетуге кететін шығындар орынсыз көбейеді.

Осылайша, рульдік цилиндр агрегаттарының мотосағаттары мен жиынтық жұмыс уақытына негізделген статистикалық талдау, қолданыстағы жөндеу жүйесіне түзетулер енгізудің қажеттілігін дәлелдейді. Агрегаттардың жоспардан тыс жөндеу шығындарын азайтуын қамтамасыз ету үшін, жөндеу аралықтарының негізгі параметрлеріне қосымша статистикалық өңдеу жүргізу қажет. Бұл өз кезегінде оңтайлы жөндеу уақытын нақты айқындауға мүмкіндік береді [13].

3. Статистикалық деректерді өңдеу әдістемесі.

Оңтайлы жөндеу уақытын анықтау үшін агрегаттардың істен шығуына дейінгі мотосағаттар мен олардың жалпы жұмыс уақыты бойынша жиналған статистикалық деректерге талдау жүргізу қажет. Техниканың сенімділік деңгейін сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік беретін мұндай талдау – жөндеу аралықтарын дәл жоспарлау және жоспардан тыс істен шығулардың алдын алу үшін аса маңызды [14].

Осы бағыттағы бағалау құралдарының ішінде ең кең таралған әрі дәл тәуелділіктердің бірі ретінде MTBF (Mean Time Between Failures) және MTBS (Mean Time Between Services) көрсеткіштері кеңінен қолданылады. Бұл көрсеткіштер техниканың сенімділігі мен қызмет көрсету тиімділігін кешенді бағалауға мүмкіндік береді және техникалық қызмет көрсету стратегиясын оңтайландырудың негізі болып табылады [15].

MTBF (Mean Time Between Failures) – агрегаттың немесе жабдықтың екі ақаудың арасындағы орташа жұмыс істеу уақыты. Бұл көрсеткіш техника сенімділігінің сандық өлшемі ретінде қолданылады және жабдықтың қаншалықты ұзақ уақыт істен шықпай жұмыс істей алатынын бағалауға мүмкіндік береді. MTBF көрсеткіші мына формула арқылы есептеледі [16]:

$$MTBF = \frac{\sum T}{n}, \quad (1)$$

мұнда: T – агрегаттың ақауға дейінгі жұмыс уақыты;

n – жоспардан тыс ақаулар саны.

MTBF жоғары болған сайын жабдықтың сенімділігі де жоғары болады. Бұл көрсеткіш жоспардан тыс істен шығуларды болжау, жөндеу стратегияларын оңтайландыру, сондай-ақ жабдықты алдын ала ауыстыру қажеттігін бағалау мақсатында кеңінен қолданылады [16].

MTBS (Mean Time Between Services) – бұл техникалық қызмет көрсетулер (жоспарлы жөндеулер) арасындағы орташа жұмыс істеу уақыты. Ол жоспарлы техникалық қызмет көрсету аралықтарының тиімділігін бағалауға арналған. MTBS анықтау формуласы келесідей [17]:

$$MTBS = \frac{\sum S}{m}, \quad (2)$$

мұнда: S – агрегаттың жоспарлы жөндеуге дейінгі жұмыс уақыты;

n – жоспарлы жөндеу саны.

Бұл көрсеткіш жөндеу аралықтарының тым ұзақ немесе тым қысқа болуын бағалауға мүмкіндік береді:

- егер $MTBS$ төмен болса – артық қызмет көрсету орын алып, шығын артады;
- егер $MTBS$ тым жоғары болса – бұл жоспардан тыс ақауларға алып келуі мүмкін.

$MTBS$ – техниканың жоспарлы күтім жүйесінің тиімділігін сипаттайтын маңызды көрсеткіш. Оны $MTBF$ -пен салыстыру арқылы қызмет көрсету жүйесінің жеткіліктілігі немесе жетілмеген тұстары айқындалады [18]. Мысалы, егер $MTBF > MTBS$ болса, бұл жоспарлы жөндеулердің жеткілікті деңгейде орындалып жатқанын көрсетеді. Ал егер $MTBF < MTBS$ болса, техниканың жоспарлы күтіміне қарамастан істен шығу жиілеп кеткенін, яғни жоспарлы жөндеулердің тиімділігін арттыру қажеттігін білдіреді [19]. Біздің жағдайда жоспардан тыс жөндеулердің саны артып, оларға жұмсалатын шығындар көбейіп отыр. Сондықтан оңтайлы жөндеу аралығы ретінде ең алдымен $MTBF$ мәнін қарастыру маңызды. Бұл техника істен шыққанға дейінгі нақты орташа уақытына негізделеді [20].

Алайда жалғыз $MTBF$ мәніне сүйену жеткіліксіз, себебі ол экономикалық тиімділікті ескермейді [21]. Сол себепті $MTBF$ пен $MTBS$ мәндерінің орташа арифметикалық мәнін есептеп, оны ұсынылатын оңтайлы жөндеу аралығы ретінде қарастыру ұсынылды:

$$T_{opt} = \frac{MTBF + MTBS}{2} \quad (3)$$

Осы интервал уақыты негізінде экономикалық есептеулер жүргізіліп, олар фактілік шығындармен салыстырылды және нақты тиімділік деңгейі бағаланды. Нәтижесінде ұсынылған әдістеме қолда бар статистикалық ақпаратты өңдеуге, агрегаттардың оңтайлы жөндеу аралығын анықтауға және оның экономикалық тұрғыдан тиімділігін дәлелдеуге мүмкіндік берді.

Нәтижелер мен талқылау

Статистикалық деректерді өңдеу нәтижелері. Жоғарыда келтірілген әдістеме бойынша статистикалық ақпаратты өңдеу нәтижелері ұсынылды. Статистикалық деректерді өңдеу үшін САТ 16М автогрейдерлерінің рульдік цилиндрлерге жүргізілген жоспарлы және жоспардан тыс жөндеулер бойынша жиналған деректер (4-кесте) пайдаланылды. Есептеулер жоғарыда сипатталған әдістемедегі (1)–(3) формулаларға сәйкес жүргізілді.

Ең алдымен, агрегаттың оңтайлы жұмыс уақыт аралығы (1) формула бойынша есептелді:

$$T_{opt.1} = \frac{\sum S}{m} = \frac{106884 \text{ мотосағат}}{15} = 7125,6 \approx 7000 \text{ мотосағат.}$$

Алынған 7125,6 мотосағат мәні 7000 мотосағатқа дейін жуықталды. Бұл жуықтаудың себебі – өндірісте техникалық қызмет көрсетудің ағымдағы түрлері (ТҚК) 250 немесе 500 мотосағаттық аралықтармен жүргізілуіне байланысты. Осы себепті 7000 мотосағат мәні қолданыстағы техникалық қызмет көрсету регламенттеріне сәйкестендірілген бірінші оңтайлы жұмыс уақыт аралығы ретінде қабылданды.

Келесі қадам – екінші оңтайлы жұмыс уақытын анықтау. Ол үшін алдымен (2) формула бойынша MTBS көрсеткіші есептелді:

$$MTBS = \frac{\sum S}{m} = \frac{279461}{17} = 16438 \text{ мотосағат.}$$

Ары қарай (3) формуланы пайдаланып, екінші оңтайлы жұмыс уақыты есептелді:

$$T_{opt.2.} = \frac{MTBF + MTBS}{2} = \frac{7000 + 16438}{2} = 11719 \approx 12000 \text{ мотосағат}$$

11719 мотосағат мәні 12000 мотосағатқа дейін жуықталды. Бұл да жоғарыда келтірілген себеппен – ТҚК интервалдарына сәйкестендіру қажеттілігімен түсіндіріледі. Нәтижесінде, 12000 мотосағат өндірістік қолдануға ыңғайлы және регламенттермен үйлесімді екінші оңтайлы жұмыс уақыт аралық ретінде қабылданды.

Ұсынылған әдістеме негізінде жүргізілген есептеулер нәтижесінде жөндеу уақыт аралықтарын оңтайландыру мақсатында екі түрлі оңтайлы жұмыс уақыт аралығы есептеліп шығарылды. Олар: 7000 және 12000 мотосағат. Осы зерттеуде ұсынылған әдістеменің таңдауы бірқатар объективті және практикалық себептерге негізделді. Ең алдымен, бұл тәсіл нақты өндірістік статистикалық деректерге сүйене отырып, карьерлік техниканың сенімділігін сандық тұрғыда бағалауға және агрегаттардың жөндеу аралығын дәл анықтауға мүмкіндік береді. Ұсынылып отырған әдістеме техниканың жоспарлы және жоспардан тыс жөндеулер аралығындағы жұмыс уақытын ескеріп, екі негізгі сенімділік көрсеткішін – MTBF (істен шығулар арасындағы орташа уақыт) және MTBS (жоспарлы жөндеулер арасындағы орташа уақыт) қолдануға негізделген. Аталған көрсеткіштер жөндеу аралығын бағалауда техниканың нақты пайдалану ерекшеліктерін ескеруге мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде жоспарлы жөндеулердің тиімділігін арттырып, жоспардан тыс істен шығулардың жиілігін азайтуға ықпал етеді. Сонымен қатар, MTBF және MTBS мәндерінің орташа арифметикалық шамасы ретінде ұсынылған оңтайлы жөндеу интервалы (T_{opt}) нақты өндірістік жағдайларға бейімделген, икемді шешім болып табылады.

Аталған әдістеменің ерекшелігі – ол басқа тәсілдердегідей жөндеу аралығын ұзарту емес, керісінше, қысқарту арқылы жалпы техникалық және экономикалық тиімділікті арттыруға бағытталған. Бұл ретте агрегаттардың нақты тозу себептері мен қайталанатын ақаулықтар динамикасы есепке алынады. Мысалы, зерттеу барысында стандартты бөлшектердің толық ауыстырылмауы салдарынан бірнеше реттік жоспардан тыс жөндеулер тіркелгені анықталды, бұл жоспарлы жөндеу кестесін қайта қараудың қажеттілігін көрсетті.

Осылайша, әдістеме агрегаттың сенімділік параметрлерін, нақты пайдалану режимін және шығын құрылымын ескере отырып, жөндеу стратегиясын тек формальды регламенттерге емес, нақты өндірістік нәтижелерге негіздеу қажеттігін дәлелдейді. Сонымен қатар, оның әмбебаптығы әртүрлі техникалық агрегаттарға бейімделе алуы, бұл тәсілді өндірістік жоспарлау және шығындарды оңтайландыруда кешенді стратегиялық құрал ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Жаңа әдістеменің енгізілуі кәсіпорынның жоспардан тыс тоқтап қалу қаупін төмендетіп, техниканың пайдалану сенімділігін

арттыруға және техникалық қызмет көрсету жүйесінің тиімділігін жоғарылатуға септігін тигізеді.

Қорытынды

Зерттеу барысында қойылған басты мақсат – карьерлік техниканың рульдік цилиндрлерін жөндеудің техникалық тұрғыдан оңтайлы уақыт аралығын анықтау толығымен орындалды. Бұл мақсатқа нақты өндірістік деректерді өңдеу, сенімділік көрсеткіштерін есептеу және алынған нәтижелерді өндірістік регламенттермен сәйкестендіру арқылы қол жеткізілді.

Жұмыстың міндеттеріне сәйкес біріншіден, жоспардан тыс жөндеулер мен істен шығу себептері талданды. Бұл кезеңде CAT 16М және 16М3 автогрейдерлерінің рульдік цилиндрлеріне жүргізілген жөндеулер туралы мәліметтер жиналып, істен шығу себептері талданды. Нақты екі агрегат – SC16М9 және SC16М4 мысалында, соташық (шток) бойындағы хромдалған қабаттың зақымдануы, тығыздағыштың жыртылуы, поршень мен гильзаның тозуы, датчик ақауы сияқты қайталанатын техникалық ақаулар тіркелді. Сонымен қатар, жөндеу құнына әсер ететін қосалқы бөлшектер тізімі мен бағасы анықталып, бөлшектер толық ауыстырылмаған жағдайда қайталап істен шығу қаупі артатыны дәлелденді. Агрегаттардың жиі істен шығуына жоспарлы жөндеудің бейімделмеген интервалы, диагностиканың жеткіліксіздігі және қосалқы бөлшектердің толық ауыстырылмауы себеп болатыны анықталды. Жоспардан тыс жөндеулердің саны мен құны жоспарлы жөндеулермен салыстырарлық деңгейде, бұл стратегияны қайта қараудың қажеттілігін көрсетті.

Екінші міндет бойынша, статистикалық параметрлер талданды. Жөндеу аралығын оңтайландыру мақсатында жөндеуден кейінгі және толық мотосағаттар туралы мәліметтер жинақталды (4-кесте). SC16М4, SC16М8 және SC16М10 модельдері жоспардан тыс жөндеуге жиі ұшыраған, ал SC16М5 және SC16М12 тек жоспарлы жөндеуден өткен агрегаттар ретінде анықталды. Жоспардан тыс жөндеулердің орын алу диапазоны 2313-тен 15 182 мотосағатқа дейін болған. Сондай-ақ, қажетсіз ұзартылған жоспарлы аралықтар (мысалы, SC16М4 – 21 876 мотосағат) жоспардан тыс жөндеулердің туындауына себеп болғаны байқалды. Статистикалық талдау қолданыстағы регламенттер шектен тыс жалпыланғанын көрсетті. Агрегаттардың нақты жағдайына қарай бейімделмеген жөндеу аралықтары техниканың жиі істен шығуына және шығындардың артуына алып келген. Осылайша, жөндеу уақытын нақты мотосағаттар бойынша реттеу қажеттілігі туындады.

Үшінші міндетке сәйкес статистикалық деректерді өңдеу және оңтайлы интервалдары есептелінді. Осы кезеңде жөндеуге дейінгі мотосағаттар мен ақаулар санын ескере отырып, сенімділік көрсеткіштері – MTBF және MTBS есептеліп шығарылды. Мәндерді өндірістік ТҚК регламенттеріне (250/500 м/с) сәйкестендірілді. Осы интервалдар қолда бар нақты статистикаға және сенімділік талдауға негізделіп алынған. 7000 және 12000 мотосағат – рульдік цилиндрлердің екі техникалық және экономикалық жағынан негізделген оңтайлы жөндеу аралығы ретінде анықталды. Бұл мәндер жабдық сенімділігін арттыруға, жоспардан тыс ақауларды азайтуға және жөндеу шығындарын оңтайландыруға мүмкіндік береді.

MTBF және MTBS көрсеткіштерінің көмегімен агрегаттардың істен шығу аралығы мен

жөндеу жиілігі есептеліп, техникалық қызмет көрсету кестесін икемді түрде қайта құруға негіз болды. Ұсынылған тәсіл жабдық сенімділігін жоғарылата отырып, өндірістік жоспардан ауытқуды төмендетуге және техникалық қызмет көрсету үдерісін неғұрлым дәл жоспарлауға мүмкіндік береді.

Осылайша, жөндеу аралықтарын ғылыми негізде және нақты мәліметтерге сүйене отырып есептеу техниканың өндірістік тиімділігі мен сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Алдағы кезеңде осы аралықтардың сенімділік-экономикалық тиімділігін бағалау арқылы ең үнемді шешімді таңдау жоспарлануда.

Авторлардың қосқан үлесі

Кадыров А.С. – зерттеу мақсаты мен міндеттерін, ғылыми жаңалығы мен практикалық маңыздылығын айқындады.

Кукешева А.Б. – статистикалық деректерді өңдеу әдістемесін әзірледі, әдеби талдау жүргізді және мақаланың құрылымын қалыптастырды.

Дәрібжан М.С. – KazMinerals Бозшакол кен өндірісі кәсіпорнынан қажетті өндірістік деректерді жинады, оларды талдап, мақала мәтінін жазды.

Бақытов Е.С. – рульдік цилиндрдің ақаулықтары бойынша талдау жұмыстарын жүргізді.

Карсакова А.Ж. – жиналған статистикалық мәліметті рәсімдеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Odeyar P., Apel D. B., Hall R., Zon B., Skrzypkowski K. A review of reliability and fault analysis methods for heavy equipment and their components used in mining // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, №17. – P. 6263. <https://doi.org/10.3390/en15176263> – ағылшын тіліндегі журнал
2. Castañón A. M., Gutiérrez-Díez J. C., Bascompta M. Analysis of the mining equipment replacement time. A case study focused on drilling rig // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 24. – P. 103057. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103057> – ағылшын тіліндегі журнал
3. Suryo S. H., Bayuseno A. P. Study on reliability analysis of hydraulic components and excavator engine in maintenance of mine heavy equipment // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 9, №8. – P. 1244–1254. URL:https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_9_ISSUE_8/IJMET_09_08_134.pdf (өтініш берген күні: 20.10.2025) – ағылшын тіліндегі журнал
4. Sharma N. R., Mishra A. K., Jain S. Impact factor improvement and maintenance schedule optimisation of mining shovels by remaining useful life and linear programming // *Journal of Mines, Metals & Fuels*. – 2021. – №9. – ағылшын тіліндегі журнал
5. Dashtaki M. R., Jafari A. J., Hoseinie S. H. Development of a new method for maintainability and downtime analysis of mining machinery // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15, №1. – P. 4565. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88505-3> – ағылшын тіліндегі журнал
6. 2018–2025 жылдар аралығындағы тау-кен кәсіпорнының техникалық қызмет көрсету мен жөндеу бойынша ішкі өндірістік есептері мен шығын сметалары. – Ішкі құжат
7. Caterpillar. 103-6169: M16 × 2 Hexagonal Head Bolt. – [Электрон. ресурс]. URL: <https://www.cat.com/> (өтініш берген күні: 20.10.2025) – Электрондық ресурс
8. HeavierParts. 1107149 Caterpillar RING. – [Электрон. ресурс]. URL: <https://heavierparts.com/> (өтініш берген күні: 20.10.2025) – Электрондық ресурс

9. eBay. 1362967 Seal O-Ring Fits Caterpillar 345B II, 345C, 345C L, 365B, 365B II. URL: <https://www.ebay.com/> (өтініш берген күні: 20.10.2025) – Электрондық ресурс
10. eBay. SEAL-D RING (1637233) for Caterpillar Aftermarket. – [Электрон. ресурс]. URL: <https://www.ebay.com/> (өтініш берген күні: 20.10.2025) – Электрондық ресурс
11. eBay. CATERPILLAR CAT 202-6473 HEX HEAD BOLT Original New. – [Электрон. ресурс]. URL: <https://www.ebay.com/> (өтініш берген күні: 20.10.2025) – Электрондық ресурс
12. TOO «Machinery Parts». Razreznnoe koltsevoe uplotnenie 220-4335 SEAL BRAKE CATERPILLAR. – [Электрон. ресурс]. URL: <https://machineryparts.kz/> (өтініш берген күні: 20.10.2025) – Электрондық ресурс
13. Leppinen J., Punkka A., Ekholm T., Salo A. An optimization model for determining cost-efficient maintenance policies for multi-component systems with economic and structural dependencies // *Omega*. – 2025. – Vol. 130. – P. 103162. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103162> – ағылшын тіліндегі журнал
14. Gölbaşı O., Demirel N. A cost-effective simulation algorithm for inspection interval optimization: An application to mining equipment // *Computers & Industrial Engineering*. – 2017. – Vol. 113. – P. 525–540. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.002> – ағылшын тіліндегі журнал
15. Hamasha M. M., Bani-Irshid A. H., Al Mashaqbeh S., et al. Strategical selection of maintenance type under different conditions // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13, №1. – P. 15560. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5> – ағылшын тіліндегі журнал
16. Sellitto M. A., Pinho B. Maintenance strategy choice supported by the failure rate function: Application in a serial manufacturing line // *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences*. – 2023. – Vol. 31, №1. – P. 38–51. <https://doi.org/10.3311/PPso.18627> – ағылшын тіліндегі журнал
17. Garg H. Performance analysis of complex repairable industrial systems using PSO and fuzzy confidence interval based methodology // *ISA Transactions*. – 2013. – Vol. 52, №2. – P. 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2012.09.010> – ағылшын тіліндегі журнал
18. Ben S. J. Implementation of autonomous maintenance and its effect on MTBF, MTTR, and reliability of a critical machine in a beer processing plant // *Int. J. Progressive Science and Technology*. – 2022. – Vol. 31. – P. 57–66. URL: <https://www.researchgate.net/>... (өтініш берген күні: 20.10.2025) – ағылшын тіліндегі журнал
19. Mohamed A., Ben J., Muduli K. Implementation of autonomous maintenance and its effect on MTBF, MTTR, and reliability of a critical machine in a beer processing plant // In: *Applications of Computational Methods in Manufacturing and Product Design*. – Singapore: Springer Nature, 2022. – P. 511–521. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0296-3_47 – конференция материалдары / кітап бөлімі
20. Nascimento Filho A., Takahata A. K., Ribeiro de Lima C., Berton L. Computational Intelligence in Maintenance Strategy Automotive Manufacturing Industry: A Survey. – [Электрон. ресурс]. URL: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5139162> (өтініш берген күні: 20.10.2025) – Электрондық ресурс
21. Mahale Y., Kolhar S., More A. S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions // *Discover Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 7, №4. – P. 243. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06681-3> – ағылшын тіліндегі журнал

А.С.Кадыров, А.Б.Кукешева, М.С.Дәрібжан *, Е.С.Бақытов, А.Ж.Карсакова

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

Формирование методики оптимизации интервалов ремонта агрегатов карьерной техники

Аннотация. В данной статье представлена методика оптимизации интервалов технического обслуживания агрегатов карьерной техники на примере рулевых цилиндров автогрейдеров моделей CAT 16М и 16М3, эксплуатируемых на горнодобывающем предприятии KazMinerals Бозшакол. В ходе исследования проведён анализ фактических производственных статистических данных за 2018–2025 годы по плановым и внеплановым ремонтам. Причины отказов и эксплуатационные ресурсы агрегатов были количественно оценены с использованием показателей MTBF (среднее время между отказами) и MTBS (время между плановыми ремонтами). По результатам расчётов определены два оптимальных интервала технического обслуживания — 7000 и 12000 моточасов. Указанные интервалы адаптированы к реальным условиям эксплуатации, направлены на предотвращение внеплановых отказов и позволяют сделать стратегию технического обслуживания более гибкой и эффективной. Разработанная методика даёт возможность учитывать реальные производственные условия, эффективно планировать техническое обслуживание и снижать риски простоев оборудования. Предлагаемый подход способствует повышению надёжности производственного процесса, снижению дополнительных затрат и совершенствованию системы технического обслуживания.

Ключевые слова: интервал ремонта, надёжность, моточас, рулевой цилиндр, плановый ремонт, карьерная техника.

A.S. Kadyrov, A.B. Kukeshova, M.S.Daribzhan*, E.S.Bakytov, A.Zh.Karsakova

NJSC "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", Karaganda, Kazakhstan

Development of a Methodology for Optimizing Repair Intervals of Open-Pit Mining Equipment Units

Abstract. This article proposes a methodology for optimizing the maintenance intervals of mining equipment components, using the example of steering cylinders in CAT 16M and 16M3 motor graders operated by KazMinerals Bozshakol mining enterprise. The study is based on the analysis of actual production statistics from 2018 to 2025, including both scheduled and unscheduled repairs. Causes of failures and component operational resources were quantitatively assessed using MTBF (Mean Time Between Failures) and MTBS (Mean Time Between Services) indicators. The calculations identified two optimal maintenance intervals — 7000 and 12000 engine hours. These intervals are tailored to actual operating conditions and are aimed at preventing unexpected failures while making maintenance strategies more flexible and effective. The method allows for adaptive scheduling of maintenance activities, based on real-world operational data, and ensures more efficient utilization of equipment resources. Moreover, the proposed approach improves the reliability of production processes, reduces unnecessary

expenses, and optimizes the overall maintenance workflow.

Keywords: maintenance interval, reliability, engine hours, steering cylinder, scheduled repair, mining equipment.

References

1. Odeyar P., Apel D. B., Hall R., Zon B., Skrzypkowski K. A review of reliability and fault analysis methods for heavy equipment and their components used in mining // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 17. – P. 6263. <https://doi.org/10.3390/en15176263>
2. Castanon A. M., Gutierrez-Diez J. C., Bascompta M. Analysis of the mining equipment replacement time: A case study focused on drilling rig // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 24. – P. 103057. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103057>
3. Suryo S. H., Bayuseno A. P. Study on reliability analysis of hydraulic components and excavator engine in maintenance of mine heavy equipment // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 9, No. 8. – P. 1244–1254. URL: [https://iaeme.com/...](https://iaeme.com/) (accessed 20.10.2025)
4. Sharma N. R., Mishra A. K., Jain S. Impact factor improvement and maintenance schedule optimisation of mining shovels by remaining useful life and linear programming // *Journal of Mines, Metals & Fuels*. – 2021. – No. 9.
5. Dashtaki M. R., Jafari A. J., Hoseinie S. H. Development of a new method for maintainability and downtime analysis of mining machinery // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – P. 4565. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88505-3>
6. 2018–2025 jıldar aralyǵyndaǵı tau-ken kásipornynyń tekhnikalıq qyzmet kórsetu men jöndeü jölindegi işki öndiristik esepteri men shyǵyn smetalary. – Ішкі qūjat.
7. Caterpillar. 103-6169: M16 × 2 Hexagonal Head Bolt. URL: <https://www.cat.com/> (accessed 20.10.2025)
8. HeavierParts. 1107149 Caterpillar RING. URL: <https://heavierparts.com/> (accessed 20.10.2025)
9. eBay. 1362967 Seal O-Ring Fits Caterpillar 345B II, 345C, 345C L, 365B, 365B II. URL: <https://www.ebay.com/> (accessed 20.10.2025)
10. eBay. SEAL-D RING (1637233) for Caterpillar Aftermarket. URL: <https://www.ebay.com/> (accessed 20.10.2025)
11. eBay. CATERPILLAR CAT 202-6473 HEX HEAD BOLT Original New. URL: <https://www.ebay.com/> (accessed 20.10.2025)
12. TOO “Machinery Parts”. Razreznoe koltsevoe uplotnenie 220-4335 SEAL BRAKE CATERPILLAR. URL: <https://machineryparts.kz/> (accessed 20.10.2025)
13. Leppinen J., Punkka A., Ekholm T., Salo A. An optimization model for determining cost-efficient maintenance policies for multi-component systems with economic and structural dependencies // *Omega*. – 2025. – Vol. 130. – P. 103162. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103162>
14. Golbasi O., Demirel N. A cost-effective simulation algorithm for inspection interval optimization: An application to mining equipment // *Computers & Industrial Engineering*. – 2017. – Vol. 113. – P. 525–540. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.002>
15. Hamasha M. M., Bani-Irshid A. H., Al Mashaqbeh S., et al. Strategical selection of maintenance type under different conditions // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 15560

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5>

16. Sellitto M. A., Pinho B. Maintenance strategy choice supported by the failure rate function: Application in a serial manufacturing line // *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences*. – 2023. – Vol. 31, No. 1. – P. 38–51. <https://doi.org/10.3311/PPso.18627>

17. Garg H. Performance analysis of complex repairable industrial systems using PSO and fuzzy confidence interval based methodology // *ISA Transactions*. – 2013. – Vol. 52, No. 2. – P. 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2012.09.010>

18. Ben S. J. Implementation of autonomous maintenance and its effect on MTBF, MTTR, and reliability of a critical machine in a beer processing plant // *Int. J. Progressive Science and Technology*. – 2022. – Vol. 31. – P. 57–66. URL: <https://www.researchgate.net/>... (accessed 20.10.2025)

19. Mohamed A., Ben J., Muduli K. Implementation of autonomous maintenance and its effect on MTBF, MTTR, and reliability of a critical machine in a beer processing plant // In: *Applications of Computational Methods in Manufacturing and Product Design*. – Singapore: Springer Nature, 2022. – P. 511–521. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0296-3_47

20. Nascimento Filho A., Takahata A. K., Ribeiro de Lima C., Berton L. Computational Intelligence in Maintenance Strategy Automotive Manufacturing Industry: A Survey. URL: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5139162> (accessed 20.10.2025)

21. Mahale Y., Kolhar S., More A. S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions // *Discover Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 7, No. 4. – P. 243. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06681-3>

Авторлар туралы мәлімет:

Кадыров А.С. – техника ғылымдарының докторы, «көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасының профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Назарбаев даңғ. 56, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Кукешева А.Б. – көлік, көлік техникасы және технологиялары, философия докторы (PhD), «көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасының аға оқытушысы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Назарбаев даңғ. 56, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Дәрібжан М.С. – хат-хабар авторы, «көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасының докторанты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Назарбаев даңғ. 56, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Бақытов Е.С. – «көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасының докторанты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Назарбаев даңғ. 56, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Карсакова А.Ж. – көлік, көлік техникасы және технологиялары, философия докторы (PhD), «көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасы доценті міндетін атқарушы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Назарбаев даңғ. 56, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Кадыров А.С. – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса

Сагинова, просп. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан.

Кукешева А.Б. – доктор философии (PhD) по направлению «Транспорт, транспортная техника и технологии», старший преподаватель кафедры «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, просп. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан.

Дәрібжан М.С. – автор для корреспонденции, докторант кафедры «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, просп. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан.

Бақытов Е.С. – докторант кафедры «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, просп. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан.

Карсакова А.Ж. – доктор философии (PhD) по направлению «Транспорт, транспортная техника и технологии», исполняющая обязанности доцента кафедры «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, просп. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан.

Kadyrov A.S. – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Engineering and Logistics Systems, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 56 Nazarbayev Avenue, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Kukesheva A.B. – PhD in Transport, Transport Engineering and Technologies, Senior Lecturer at the Department of Transport Engineering and Logistics Systems, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 56 Nazarbayev Avenue, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Daribzhan M.S. – Corresponding author, Doctoral Student at the Department of Transport Engineering and Logistics Systems, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 56 Nazarbayev Avenue, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Bakytov E.S. – Doctoral Student at the Department of Transport Engineering and Logistics Systems, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 56 Nazarbayev Avenue, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Karsakova A.Zh. – PhD in Transport, Transport Engineering and Technologies, Acting Associate Professor at the Department of Transport Engineering and Logistics Systems, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 56 Nazarbayev Avenue, 100027, Karaganda, Kazakhstan.





МРНТИ 89.25.35

Обзорная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-190-213>

Сравнительный анализ схем реализации малых разгонных блоков

М. К. Сулейменов^{id}, М. К. Омарбаев^{id}, Т. К. Жакенова*^{id},
Д. С. Назаргалиева^{id}

АО «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы,
Республика Казахстан

*E mail: m.suleimenov@spacres.kz, omarbayev.m@spacres.kz, t.zhakenova@spacres.kz,
d.nazargaliyeva@spacres.kz*

Аннотация. Данная статья посвящена обзору существующих малых разгонных блоков, в том числе и перспективных разгонных блоков, находящихся на этапе разработки или испытаний, активно применяемых в задачах выведения малых космических аппаратов на целевые орбиты, актуальность которых в последнее время растет на фоне тенденции миниатюризации космических аппаратов и, соответственно, уменьшения массы полезных нагрузок. В работе рассматриваются основные классификационные признаки разгонных блоков, включая массу, тип двигательной установки, конструктивно-компоновочные схемы. В частности, рассматриваются преимущества и недостатки указанных схем с точки зрения компоновочной гибкости, массы конструкции, технологичности, простоты сборки и эксплуатационной надежности. Целью настоящего исследования является выбор и обоснование схемы реализации малого разгонного блока, сочетающего оптимальные технические характеристики, высокую надежность, экономическую эффективность и экологическую безопасность. В качестве ключевого элемента научной новизны предлагается применение метода многокритериального анализа для оценки различных схем реализации малых разгонных блоков. Данный метод позволяет формализовать и сбалансировать противоречивые инженерные критерии, включая массовую эффективность, удельный импульс, возможность многократного включения, технологическую зрелость т. д.

Ключевые слова: малый разгонный блок, ракета-носитель, полезная нагрузка, малый космический аппарат

Введение

Разгонный блок – это компонент ракеты-носителя, оборудование, предназначенное для транспортировки полезной нагрузки с опорной орбиты на целевую орбиту, на траекторию отлета к Луне или на межпланетную траекторию. Он располагается над последней ступенью ракеты или непосредственно под полезной нагрузкой. Такие устройства обычно проектируются для работы в космосе, их можно многократно включать и выключать, что позволяет выполнять маневры в космосе для выхода на определенные орбиты [1].

Таблица 1. Типы разгонных блоков по массе

Тип РБ	Масса, кг	Масса выводимой полезной нагрузки, кг	Применение	Примеры
Тяжелые	Свыше 10000	Свыше 3000	Крупные спутники связи или наблюдения Земли, межпланетные миссии, пилотируемые миссии, развертывание крупной группировки спутников в рамках одного запуска и т. д.	Последняя ступень Saturn V, вторая ступень ракеты Delta IV, вторая ступень ракеты-носителя Falcon Heavy и др.
Средние	От 3000 до 10000	До 3000	Спутники связи среднего размера или наблюдения Земли, межпланетные миссии, доставка грузов на Международную Космическую Станцию (МКС) и т. д.	Последняя ступень РН Atlas V Centaur, Фрегат, PSLV PS4 – последняя ступень индийской РН Polar Satellite Launch Vehicle и др.
Легкие	До 3000	До 1500	Малые спутники, CubeSat и наноспутники, демонстрация технологий и эксперименты в космосе и т. д.	Photon, ION Satellite Carrier, Elytra, Sherpa, SpaceVan и др.

Разгонные блоки оснащены собственными двигательными установками, системами управления и навигации, системами терморегулирования, системами энергоснабжения, системами связи и передачи данных, системами ориентации и стабилизации. Их двигатели могут работать на различных видах топлива, включая жидкие (например, керосин и жидкий кислород), твердые топлива или гибридные системы. Помимо типа используемого топлива, разгонные блоки также классифицируются по массе, по типу двигательной установки, по конструктивно-компоновочной схеме [2] и т. д.

Классификация разгонных блоков по массе представлена в табл. 1. Разгонные блоки по массе делятся на тяжелые, средние и легкие [3-8].

Современные тенденции миниатюризации спутниковых технологий привели к стремительному росту числа малых космических аппаратов (CubeSat, наноспутники, микроспутники), используемых в задачах дистанционного зондирования Земли, телекоммуникаций, научных исследований и демонстрации технологий. Возникший спрос на пусковые услуги, адаптированные к малому диапазону масс, не может быть эффективно удовлетворён с использованием тяжёлых или средних разгонных блоков, так как запуск малых КА в качестве основной полезной нагрузки на таких носителях является экономически и энергетически нецелесообразным [9]. Альтернативный вариант в виде попутных запусков ограничивает операторов малых КА в выборе орбиты и временных параметров миссии, что может негативно повлиять на эффективность функционирования спутника [10]. В данной связи легкие РБ обеспечивают более гибкий и доступный способ доставки малых КА, позволяя точно выводить их на целевые орбиты в оптимальные временные окна, способствуя повышению эффективности миссии и устойчивому росту сектора малых спутников [11].

Разработка и применение легких РБ не только отвечают насущным требованиям рынка, но и способствуют демократизации доступа в космос для новых участников – университетов, стартапов и развивающихся стран. Эти носители позволяют реализовывать регулярные запуски с короткими сроками подготовки и высокой адаптивностью к задачам конкретной миссии [12]. Кроме того, внедрение малых РБ и совершенствование систем прецизионного выведения расширяют их возможности по доставке ПН на разнообразные орбиты, включая солнечно-синхронные и эллиптические. Таким образом, легкие РБ становятся неотъемлемым компонентом современной космической инфраструктуры и важным инструментом в обеспечении устойчивого роста космической экономики [13].

По типу двигательной установки РБ бывают с электрореактивными, твердотопливными и жидкостными ракетными двигателями. Ниже представлен обзор существующих малых РБ по каждому типу ДУ, в том числе и перспективных РБ, находящихся на этапе разработки или испытаний. Целью обзора является проведение сравнительного анализа ключевых классификационных признаков малых РБ по таким параметрам, как тяга, развиваемая ДУ, масса выводимой ПН, тип используемого топлива, способ подачи топлива в камеру сгорания ДУ (для РБ с жидкостными ракетными двигателями) и т. д. Для проведения данного исследования следует рассмотреть преимущества и недостатки каждого типа ДУ, изучить основные технические характеристики малых РБ, их конструктивно-компоновочные схемы, а также применить метод многокритериального анализа для численной оценки различных схем реализации малых РБ. На основе данного анализа выбрать и обосновать оптимальную схему реализации малого РБ, в том числе и тип ДУ, способной максимально удовлетворить

растущие требования рынка малых КА по энергетической и массовой эффективности, а также по операционной гибкости в миссиях по разворачиванию спутниковых группировок.

Новизна исследования заключается в формализации процесса выбора схемы реализации малого РБ с помощью многокритериального анализа, что позволяет получить объективный научный результат, выходящий за рамки традиционного технического обзора.

Методология

Настоящее исследование основано на системном подходе и включает в себя комплекс общенаучных и специальных методов для достижения поставленной цели. Основой методологического аппарата является сравнительный анализ, который применялся для сопоставления технических, эксплуатационных и экономических характеристик существующих и перспективных малых разгонных блоков (МРБ).

Исследовательский вопрос заключается в определении оптимальной конструктивно-компоновочной и технологической схемы реализации малого разгонного блока, которая бы наилучшим образом отвечала современным требованиям рынка по выведению малых космических аппаратов.

Выдвигаемая гипотеза состоит в том, что применение метода многокритериального анализа позволяет формализовать и объективизировать процесс выбора оптимальной схемы МРБ, сбалансировав противоречивые критерии, такие, как массовая эффективность, удельный импульс, стоимость, надежность и технологическая зрелость.

Этапы исследования:

1. Анализ и систематизация данных: проведен сбор и анализ открытых данных (научные публикации, техническая документация, материалы конференций) по существующим и разрабатываемым МРБ. Классификация МРБ по типу двигательной установки, массе, конструктивно-компоновочной схеме.

2. Сравнительный анализ: выполнено сопоставление преимуществ и недостатков различных типов двигательных установок (ЭРД, РДТТ, ЖРД, ГРД) и конструктивных схем.

3. Многокритериальный анализ: для формализации выбора оптимальной схемы был применен метод анализа иерархий (МАИ). В качестве ключевых критериев оценки были выбраны: массовая эффективность (отношение массы ПН к стартовой массе РБ), удельный импульс, возможность многократного включения, технологическая зрелость, стоимость и безопасность. Каждому критерию были присвоены весовые коэффициенты, определенные на основе экспертных оценок и анализа требований рынка.

4. Обоснование выбора: на основе результатов многокритериального анализа был сделан вывод об оптимальной схеме реализации МРБ и даны рекомендации по ее проектированию.

МРБ на электрореактивных двигателях

Электрореактивные двигатели (ЭРД) представляют собой тип ДУ, которые используют электрическую энергию для ускорения рабочего тела, создавая тягу. Характерной особенностью ЭРД является способность обеспечивать очень высокий удельный импульс, что означает высокую эффективность использования рабочего тела для достижения изменения скорости. Однако, как правило, ЭРД генерируют относительно низкую тягу, что приводит к необходимости длительного времени работы для выполнения значительных орбитальных маневров.

Среди МРБ, использующих ЭРД, стоит выделить Vigoride – космический буксир, разработанный компанией Momentus Space [14] и предназначенный для транспортировки и выведения малых спутников на различные орбиты. Одной из ключевых особенностей Vigoride является использование микроволнового электротермического двигателя (МЭТ), который в качестве рабочего тела использует воду. Эта технология позволяет достичь высокой эффективности при использовании нетоксичного и относительно недорогого рабочего тела.

Спутниковая платформа ION Satellite Carrier, разработанная итальянской компанией D-Orbit [15], также может быть отнесена к системам, использующим электрическую тягу для маневрирования на орбите. ION представляет собой спутниковый буксир, способный перевозить и последовательно выводить на различные орбиты множество спутников формата CubeSat и микроспутников.

SpaceVan от французской компании Exotrail [16] представляет собой малый орбитальный буксир с ЭРД, предназначенный для доставки малых КА на целевые орбиты. В качестве источника питания для ЭРД SpaceVan использует солнечные панели общей мощностью 800 Вт. Он разработан для повышения гибкости и эффективности вывода малых спутников, особенно в условиях растущего спроса на точное и своевременное размещение ПН.

Таблица 2. Технические характеристики МРБ на ЭРД

Параметр	Vigoride	ION Satellite Carrier	SpaceVan
Масса ПН, кг	750	160	200
Тяга ДУ, Н	-	-	0,028
ΔV , м/с	2000	-	500
Тип топлива	Вода	Ксенон/йод	Ксенон

МРБ на ракетных двигателях твердого топлива

Ракетные двигатели твердого топлива (РДТТ) представляют собой тип ракетных двигателей, в которых в качестве топлива и окислителя используется твердая смесь, называемая твердым топливом. РДТТ отличаются простотой конструкции и способны развивать очень высокую тягу, что делает их полезными для выведения ракет с Земли и для разгонных ступеней. Однако одним из существенных недостатков РДТТ является невозможность их многократного включения и выключения, а также регулирования тяги.

Среди МРБ, работающих на РДТТ, стоит рассмотреть модуль полезной нагрузки PAM-D (Payload Assist Module-Delta) [17], разработанный компанией McDonnell Douglas, который широко использовался в качестве верхней ступени на ракетах Delta и в составе полезной нагрузки Space Shuttle. PAM-D предназначался для выведения спутников с низкой опорной орбиты, достигаемой ракетой-носителем или шаттлом, на более высокие орбиты, в частности, на геостационарную переходную орбиту.

Также стоит упомянуть российскую перспективную разработку Thor [18]. РБ Thor выполнен по оригинальной схеме в виде тора с цилиндрической частью. Габариты и масса Thor настолько малы, что позволяют использовать его со всеми существующими и разрабатываемыми РН. Результаты расчетов показывают, что Thor способен обеспечить

межорбитальную транспортировку микро- и наноспутников с изменением высоты до нескольких тысяч километров, что позволяет выбрать практически любую орбиту МКА.

Таблица 3. Технические характеристики МРБ на РДТТ

Параметр	РАМ-D	Thor
Сухая масса, кг	232	16
Масса ПН, кг	1250	-
Тяга ДУ, Н	67 160	-
Тип топлива	НТРВ	-

МРБ с жидкостными ракетными двигателями

Жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) используют жидкое топливо и жидкий окислитель, которые подаются в камеру сгорания, где происходит их химическая реакция с выделением энергии и образованием тяги. Одним из ключевых преимуществ ЖРД является возможность регулирования тяги и многократного включения двигателя, что обеспечивает большую гибкость при выполнении космических миссий. Кроме того, ЖРД обычно обладают более высоким удельным импульсом по сравнению с РДТТ.

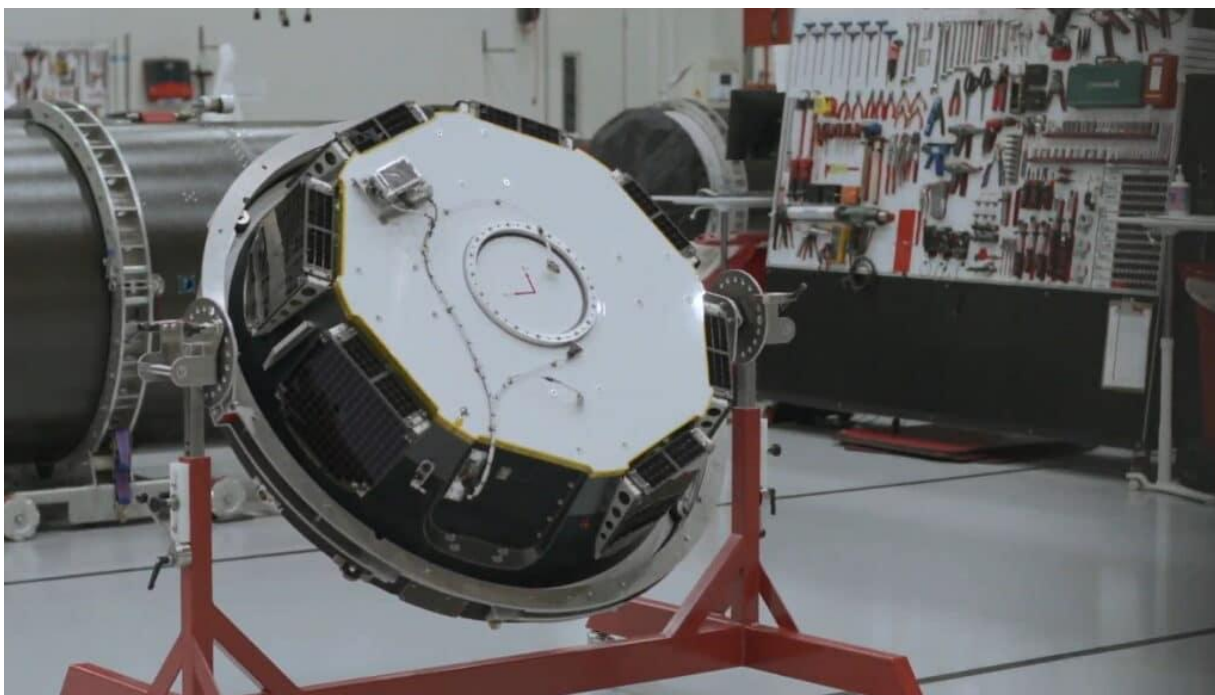


Рисунок 1. Разгонный блок Photon от Rocket Lab

По сравнению с РДТТ, ЖРД имеют более сложную конструкцию, что может влиять на их надежность и стоимость производства. Наличие систем подачи топлива и окислителя, а также необходимость обеспечения герметичности топливных баков усложняют разработку и эксплуатацию ЖРД.

Космическая платформа Photon, разработанная компанией RocketLab [19], представляет собой пример МРБ с ЖРД. Photon разработан на базе третьей ступени ракеты-

носителя сверхлегкого класса Electron и представляет собой полноценную спутниковую платформу, оснащенную системами энергоснабжения, ориентации, связи и двигательной установкой (рис. 1). Это позволяет Photon не только выводить ПН на заданную орбиту, но и выполнять различные орбитальные маневры, а также поддерживать работу ПН в течение длительного времени.

Photon способен доставлять ПН массой до 170 кг на различные орбиты, включая низкую околоземную, солнечно-синхронную, высокоэллиптические, геостационарную орбиты, а также выполнять перелеты к Луне и планетам (в модификации Explorer). Его возможности включают точное разведение спутников по разным орбитам в рамках кластерных запусков, поддержку экспериментов на борту и демонстрацию технологий. Photon был успешно применен в миссиях CAPSTONE к Луне и EscaPADE к Марсу.

МРБ Elytra, разрабатываемый компанией Firefly Aerospace [20], также использует ЖРД, обеспечивающий возможность многократного включения и регулирования тяги, а также способность выполнять орбитальные маневры и длительное время находиться на орбите. Elytra представляет собой верхнюю ступень ракеты-носителя легкого класса Firefly Alpha, предназначенную для выполнения различных задач на орбите, включая размещение ПН, ее транспортировку и обслуживание.

Некоторые ЖРД используют криогенные компоненты топлива и окислителя, такие, как жидкий водород и жидкий кислород, которые требуют хранения при очень низких температурах и могут испаряться со временем. Другие ЖРД могут использовать высокотоксичные компоненты, что создает дополнительные требования к безопасности при их производстве и эксплуатации.

МРБ с гибридными ракетными двигателями

Гибридные ракетные двигатели (ГРД) – тип двигателей, в которых один компонент топлива находится в твердом состоянии, а другой – в жидком. При работе такого двигателя жидкий окислитель (обычно жидкий кислород) впрыскивается в камеру сгорания, где происходит его взаимодействие с поверхностью твердого горючего [21].

ГРД обладают рядом теоретических преимуществ, прежде всего это упрощенная система подачи топлива, в котором подача требуется только для одного компонента (окислителя) [22], что потенциально упрощает конструкцию; безопасность при производстве, транспортировке и хранении из-за разделения компонентов топлива [23]; возможность многократного включения и регулирования тяги, в отличие от традиционных РДТТ, экологичность.

Вместе с тем, несмотря на теоретические преимущества, ГРД имеют и существенные ограничения, такие, как низкая скорость горения твердого компонента, сложности с обеспечением стабильного соотношения компонентов, низкая энергетическая эффективность, недостаточная отработанность технологии [24]. В теории ГРД обладают потенциалом для многократного запуска, поскольку процесс горения можно контролировать подачей жидкого окислителя. Этим они выгодно отличаются от классических РДТТ, перезапуск которых технически сложен. Повторное воспламенение ГРД может осуществляться относительно простыми средствами (пиротехническими воспламенителями, электрическими запальными устройствами или каталитическими элементами) при возобновлении подачи окислителя на поверхность твердого горючего [25]. Наиболее распространенные твердые горючие (НТРВ, парафины, полиэтилен) обладают достаточной термической стабильностью для выдерживания нескольких циклов

нагрева-охлаждения. К тому же, в отличие от ЖРД, где в условиях невесомости возникают проблемы с гарантированной подачей компонентов к форсункам, твердый компонент в ГРД не подвержен этому эффекту [26].

Несмотря на теоретические преимущества, практическая реализация многократного запуска ГРД в РБ сталкивается с рядом существенных технических проблем, таких, как изменение геометрии поверхности горения, тепловое состояние конструкции, эрозия критического сечения сопла, сложность обеспечения стабильного воспламенения.

Таким образом, несмотря на значительные исследования в области ГРД, до настоящего времени не существует эксплуатируемых РБ с данным типом ДУ, что подтверждает наличие нерешенных технических проблем в обеспечении их надежного многократного запуска.

Таблица 4. Выводы по типам двигательных установок

Тип ДУ	Основные преимущества	Основные недостатки	Лучше всего подходит для
ЭРД	Высокий удельный импульс, точность, экономичность	Малая тяга, медленные маневры	Долгосрочной доводки, группировки КА, многоимпульсной миссии
РДТТ	Простота, большая тяга, надежность	Нет управления, одноразовость	Быстрого вывода, аварийных миссий, военных спутников
ЖРД	Управляемость, многоразовость, точность	Сложность конструкции, токсичность	Разнообразных орбитальных маневров, исследовательских и коммерческих миссий
ГРД	Простота подачи, потенциальная экологичность, безопасность, возможность регулирования тяги	Низкая скорость горения, нестабильность характеристики при многократных включениях, низкая отработанность технологии	Потенциально перспективных решений при успешной доработке технологии; в текущем виде – ограниченное применение

Подача топлива в камеру сгорания осуществляется одним из двух способов: насосная или вытеснительная. Насосная схема использует турбонасосный агрегат для повышения давления компонентов топлива перед подачей в камеру сгорания. Турбина ТНА приводится в действие горячим газом, вырабатываемым в газогенераторе или предкамере за счет сжигания части компонентов топлива (циклы с открытой схемой, замкнутой схемой) или за счет теплообмена с камерой сгорания (бесприводной цикл). При этой схеме баки с

топливом могут быть менее прочными (и, соответственно, более легкими), поскольку им не требуется выдерживать высокое давление, необходимое для непосредственной подачи топлива в камеру сгорания; достаточно давления для предотвращения кавитации на входе в насосы.

Электронасосная схема является вариантом насосной, где насосы приводятся в действие электродвигателями, питаемыми от аккумуляторов, а не турбиной, работающей на продуктах сгорания [27].

Подобная схема применяется в МРБ Photon, двигательная установка которого, включая модификации Curie и Нурег Curie, использует электронасосы для подачи компонентов топлива [28].

При вытеснительной схеме подачи топлива компоненты топлива выдавливаются из баков за счет энергии сжатого газа, который подается в наддувочный объем баков. В качестве наддувочного газа обычно используется инертный газ, такой, как гелий или азот, хранящийся в баллонах высокого давления. Давление в баках должно быть выше давления в камере сгорания, с учетом гидравлических потерь в трубопроводах и форсунках.

Примером МРБ с вытеснительной схемой подачи топлива является перспективная российская разработка БОРИС (блок орбитального размещения искусственных спутников). БОРИС имеет уникальную платформенную конфигурацию, включающую двигательную установку с системой управления и систему хранения топлива, и каркас, адаптируемый под конкретную миссию (рис.2).

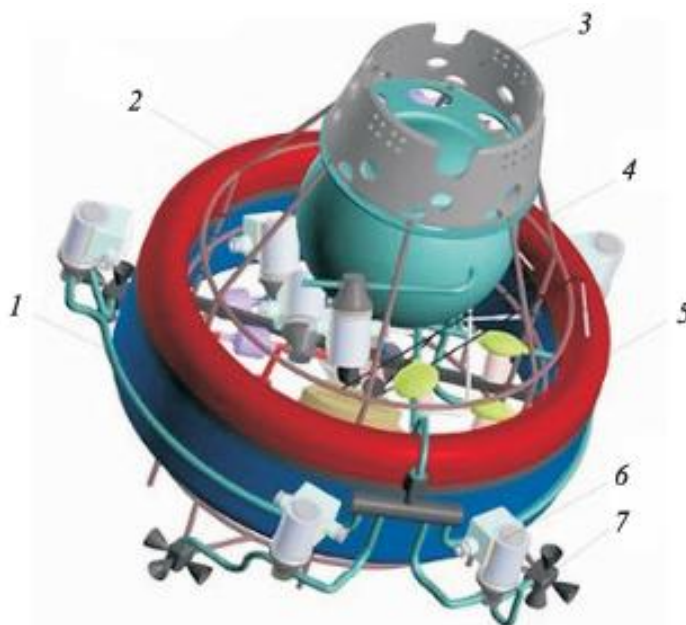


Рисунок 2. Космический буксир БОРИС: 1 – бак окислителя; 2 – шар-баллон вытеснительной системы; 3 – узел крепления ПН; 4 – рамная ферма; 5 – бак горючего; 6 – отсечные клапаны с электроприводом; 7 – блоки газовых рулей

Согласно проекту, сухая масса БОРИС составляет 47,7-60,2 кг, а масса ПН до 150 кг. Тяга ДУ составляет 540 Н. БОРИС предназначен для использования в качестве третьей ступени сверхлегких ракет-носителей или как попутная нагрузка на тяжелых и сверхтяжелых

носителях. Он способен выводить ПН на орбиты высотой от 500 до 30000 км, достигать лунной траектории, разводить несколько аппаратов по разным орбитам и потенциально использоваться для сбора космического мусора [29].

Таблица 5. Сравнение схем подачи топлива

Критерий	Вытеснительная	Насосная	Электронасосная
Сложность конструкции	Низкая	Высокая	Средняя
Надежность (теоретическая)	Высокая (меньше подвижных частей)	Потенциально ниже из-за сложности, но высокая при надлежащей проработке	Средняя, зависит от качества электроники и систем электропитания
Стоимость разработки и производства	Низкая	Высокая	Средняя
Удельный импульс	Низкий-средний (ограничено давлением в камере)	Высокий	Средний-высокий
Масса системы	Высокая (из-за прочных и тяжелых баков и запаса наддувочного газа)	Низкая (легкие баки)	Средняя (из-за массы аккумуляторов и силовой электроники)
Точность регулирования тяги	Ограниченная	Высокая	Высокая
Энергетическая эффективность	Низкая-средняя	Высокая	Средняя
Применимость	Простые и недорогие миссии, где важна надежность и стоимость	Высокоэнергетические миссии: ГСО, МПО, точное маневрирование, разведение КА	Новые малые РБ и орбитальные буксиры, где требуется баланс массы, стоимости и производительности
Технологическая зрелость	Высокая (проверенные решения)	Высокая (широкое применение в крупных РБ)	Пока низкая, но активно развивается

Вытеснительная схема подачи топлива отличается конструктивной простотой, что выражается в отсутствии сложных ТНА и, как следствие, повышенной теоретической надёжности, снижении числа потенциальных отказов и упрощении процессов проектирования и эксплуатации. Такие системы дешевле в производстве и могут

обеспечивать многократные включения двигателя, что делает их привлекательными для орбитальных манёвров [30]. Однако необходимость хранения топлива под высоким давлением требует использования прочных и тяжёлых баков, что увеличивает массу системы и снижает её энергетические возможности. Кроме того, ограниченное давление в камере сгорания снижает удельный импульс, что негативно сказывается на топливной эффективности.

Насосные схемы, напротив, позволяют достигать высоких давлений в камере сгорания, обеспечивая значительный прирост удельного импульса и тяги, при этом баки могут быть лёгкими, так как не требуют высокого давления. Это делает насосные ЖРД предпочтительными для высокоэнергетических миссий, требующих точного маневрирования, вывода на геопереходные и межпланетные орбиты, а также разведения спутников. Однако такие схемы значительно сложнее: ТНА работают в экстремальных условиях и требуют высокоточного изготовления, что повышает стоимость и может снижать надёжность. Несмотря на это, успешный опыт эксплуатации систем, таких, как Фрегат и Centaur, демонстрирует достижение высокой надёжности при грамотной инженерной реализации.

Развивающимся направлением являются электронасосные схемы, в которых насосы приводятся в действие электродвигателями. Они стремятся объединить преимущества насосной схемы с относительным упрощением конструкции, снижением массы и повышением технологичности. Однако подобные системы сталкиваются с проблемами генерации и хранения достаточной электроэнергии, а также пока обладают более низким уровнем технологической зрелости [31]. В конечном итоге выбор схемы подачи топлива определяется компромиссом между надёжностью, массой, эффективностью, стоимостью и требованиями конкретной миссии.

По типу топлива ЖРД делятся на однокомпонентные и двухкомпонентные. Однокомпонентные ЖРД используют унитарное топливо, разлагающееся на горючее и окислитель при контакте с катализатором. Примеры таких топлив – гидразин и перекись водорода. Эти двигатели просты по конструкции: не требуют форсуночных головок, системы смешивания, сложной системы зажигания. Благодаря этому они дешевле, легче, надежнее и легко перезапускаются, что особенно важно для малых РБ, выполняющих серию орбитальных манёвров. Простота также способствует снижению общей стоимости и повышает эксплуатационную гибкость.

Однако главным ограничением однокомпонентных ЖРД остаётся их низкий удельный импульс, что приводит к увеличению расхода топлива и снижению массы полезной нагрузки. Кроме того, большинство таких топлив либо токсичны (например, гидразин), либо нестабильны при длительном хранении (перекись водорода), что требует дополнительных мер безопасности. Возможность термического разложения и необходимость охлаждения камеры сгорания также могут усложнять конструкцию. Тем не менее, благодаря компактности и простоте, такие двигатели применялись, например, в ранних версиях двигателя Curie РБ Photon [32].

Двухкомпонентные ЖРД используют отдельные баки для горючего и окислителя, обеспечивая более высокие значения удельного импульса и лучшую эффективность использования топлива. Наиболее распространенные топливные пары включают керосин + жидкий кислород, гидразин + тетраоксид азота и жидкий водород + жидкий кислород. Эти системы позволяют точнее регулировать тягу и подбирать состав топлива под

конкретные требования миссии. Повышенное сгорание компонентов позволяет достигать большей скорости или выведения более тяжелых полезных нагрузок.

При этом двухкомпонентные системы сложнее: они требуют дублирующих систем подачи топлива, точных форсуночных головок, систем зажигания и часто криогенных условий хранения. Это увеличивает массу, стоимость и снижает технологическую простоту по сравнению с однокомпонентными ЖРД. Тем не менее, большинство современных малых РБ (Photon с Hyper Curie, Elytra, БОРИС, Волга, Юаньчжэн и др.) используют двухкомпонентное топливо, поскольку оно обеспечивает лучший компромисс между производительностью и возможностью точного орбитального маневрирования.

Таблица 6. Сравнение ЖРД по типу топлива

Параметр	Однокомпонентный	Двухкомпонентный
Удельный импульс, с	150-230	280-350+
Конструкция	Простая	Сложная
Надежность	Высокая	Средняя (много компонентов)
Стоимость	Ниже	Выше
Возможность многократного включения	Высокая (но низкая Δv)	Высокая
Массовая эффективность	Низкая	Высокая
Безопасность	Относительно выше (зависит от топлива)	Зависит от компонентов

Выбор топливной пары для двухкомпонентных ЖРД определяется требуемым удельным импульсом, плотностью компонентов, доступностью, условиями хранения, токсичностью и экологической безопасностью.

Наибольший удельный импульс (до 460 с) обеспечивает пара жидкий водород + жидкий кислород, продукты сгорания которой экологичны (вода), а тяговооружённость высока. Однако водород обладает крайне низкой плотностью (около 71 кг/м³), что требует громоздких и тяжёлых криогенных баков, а также сложной инфраструктуры хранения и заправки при температуре 20 К (температура кипения водорода). Кроме того, водород легко воспламеняется и взрывоопасен. Альтернативной является пара тетраоксид азота + несимметричный диметилгидразин (НДМГ), которая обеспечивает до 370 с удельного импульса, высокую плотность и гиперголичность, упрощающую зажигание и обеспечивающую многократные включения. Она широко применяется в двигателях малых РБ, включая Photon версии Hyper Curie и Юаньчжэн, разработанный Китайской академией технологий ракет-носителей (CALT) [33]. Главные её недостатки – высокая токсичность, канцерогенность и коррозионная активность, что требует сложных мер безопасности и увеличивает стоимость операций.

Наиболее оптимальной топливной парой для малых РБ считается жидкий кислород + керосин, обладающая приемлемым удельным импульсом (до 360 с), высокой плотностью, относительной экологичностью и простотой обращения. Керосин нетоксичен, не требует криогенного хранения и позволяет использовать компактные баки, снижая массу системы. Эта пара проверена десятилетиями эксплуатации, широко применяется в средних и

тяжёлых РБ [34]. Основной недостаток – отсутствие гиперголичности, что требует применения систем внешнего зажигания, однако данный аспект компенсируется зрелостью технологии и отработанностью инженерных решений.

Таблица 7. Сравнение топливных пар для двухкомпонентных ЖРД

Критерий	Жидкий водород + жидкий кислород	Тетраоксид азота + НДМГ	Керосин + жидкий кислород
Удельный импульс	До 460 с	До 370 с	До 360 с
Плотность топлива	Низкая (260-320 кг/м³)	Высокая (1185 кг/м³)	Средняя (1000 кг/м³)
Температура хранения	Криогенная (20 К для жидкого водорода)	Комнатная	Комнатная для керосина, криогенная для жидкого кислорода (90 К)
Гиперголичность (самовоспламенение)	Нет	Да	Нет
Сложность хранения/обращения	Очень высокая (взрывоопасность, испаряемость)	Средняя (простое хранение, но высокие риски)	Умеренная (требует криогеники только для жидкого кислорода)
Экологическая безопасность	Высокая (продукт – вода)	Очень низкая (токсичность, канцерогенность)	Умеренная
Примеры применения	Последние ступени Saturn V, Delta IV	Photon (версия Hyper Curie), Юаньчжэн, Sherpa	Последняя ступень Falcon 9, РБ серии ДМ

Таблица 8. Технические характеристики МРБ на ЖРД

Параметр	Photon	Юаньчжэн	БОРИС
Сухая масса, кг	40	-	47,7-60,2
Масса ПН, кг	170	1250	150
Тяга ДУ, Н	120	6500	540
Топливная пара	Однокомпонентное (версия Curie) Двухкомпонентное, гиперголическое (версия Hyper Curie)	Тетраоксид азота + несимметричный диметилгидразин	Жидкий кислород + этиловый спирт
Схема подачи топлива	Электронасосная	-	Вытеснительная

Метод многокритериального анализа

Для количественной оценки применен метод многокритериального ранжирования с

нормализацией критериев и взвешенной суммой. В качестве критериев выбраны масса топлива, затрачиваемого на выполнение определенного орбитального маневра, время выполнения маневра, сухая масса, экологичность топлива, надежность.

Расчет требуемой массы топлива выполнен по формуле Циолковского:

$$m = (m_0 + m_{\text{ПН}}) \left(e^{\frac{\Delta V}{g_0 I_{\text{уд}}}} - 1 \right)$$

где m_0 – сухая масса; $m_{\text{ПН}}$ – масса ПН; $I_{\text{уд}}$ – удельный импульс; ΔV – приращение скорости, необходимое для выполнения орбитального маневра.

Время трансфера для химических импульсных маневров оценено по Гомановскому переходу, а для электрореактивных систем время аппроксимировано как $t = \Delta V / (F_{\text{сум}} / m_{\text{ср}})$, где $F_{\text{сум}}$ – суммарная тяга ДУ, $m_{\text{ср}}$ – средняя масса РБ.

В качестве демонстрации метода проведены расчеты для четырех различных схем реализации малых РБ для орбитального маневра по выводу полезного груза с низкой околоземной орбиты высотой 200 км на орбиту высотой 600 км.

Таблица 9. Результаты расчета массы топлива и времени трансфера

МРБ	Масса ПН, кг	ΔV , м/с	Масса топлива, кг	Время трансфера	Доля топлива, %
Photon	170	226,7	15,73	46 минут	6,97
БОРИС	150	227	15,28	46 минут	6,97
SpaceVan	200	500	4,42	5 дней	1,15
Vigoride	750	2000	5,6	11 дней	1,1

Результаты и Обсуждение

Таким образом, МРБ на химических двигателях (ЖРД) при небольших ΔV требуют порядка 15-16 кг топлива, выполняя быстрые, оперативные маневры, тогда как МРБ на электрореактивных двигателях требуют значительно меньше топлива по массе, но у них существенно большее время трансфера – дни или даже недели при низкой суммарной тяге, что ограничивает их применение для миссий с жесткими требованиями по времени.

Конструктивно-компоновочные схемы МРБ

В легких РБ используется несколько типов конструктивно-компоновочных схем: моноблочная, двухотсечная, концентрическая и радиально-симметричная. Каждая из них отражает инженерные приоритеты – массогабаритную эффективность, структурную жесткость, баланс центра масс, технологичность производства и т. д. Выбор оптимальной конструктивно-компоновочной схемы для малого РБ является многокритериальной задачей, требующей баланса между производительностью, стоимостью, надежностью и технологичностью. Этот процесс особенно важен для малых РБ из-за их роли на быстрорастущем рынке малых КА, где ключевыми факторами являются быстрое развертывание и экономическая эффективность.

Моноблочная схема предполагает, что разгонный блок является единым, интегрированным агрегатом, в котором все основные функциональные компоненты – двигательная установка, топливные баки, система управления и бортовое оборудование – объединены в одном общем корпусе или структуре. Для твердотопливных разгонных блоков это часто является естественной компоновкой, поскольку корпус двигателя одновременно служит основной несущей конструкцией и контейнером для твердого топлива [35]. Так, например, РБ РАМ-D (Payload Assist Module-Delta) (рис. 3) является классическим примером твердотопливного разгонного блока моноблочной схемы.

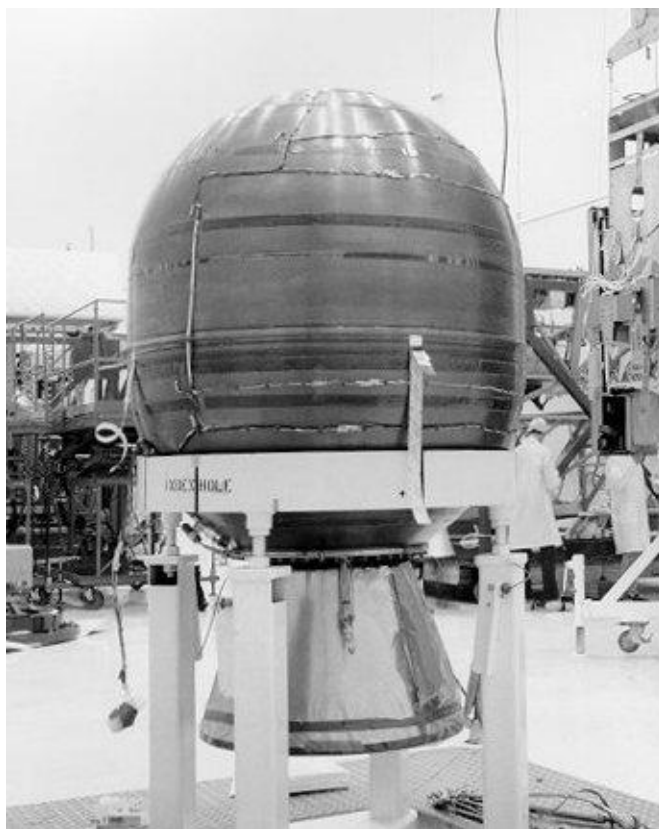


Рисунок 3. Ступень РАМ-D во время сборки

Основными преимуществами моноблочной схемы являются простота конструкции и изготовления. Отсутствие сложных механизмов разделения внутри блока и минимизация интерфейсов значительно снижают сложность проектирования, производства и сборки, что ведет к сокращению затрат. Основной недостаток моноблоков заключается в невозможности выключения или повторного запуска двигателя после зажигания, а также в отсутствии регулирования тяги. Это значительно ограничивает гибкость миссии и возможности маневрирования.

Двухотсечная схема подразумевает, что разгонный блок конструктивно разделен на две основные секции, каждая из которых может выполнять определенные функции или содержать различные подсистемы. Это может быть, например, разделение между топливными баками и приборным отсеком. Примером двухотсечной схемы является РБ Юаньчжэн (рис. 4).

Основным преимуществом двухотсечной схемы является модульность, которая позволяет оптимизировать каждую секцию для ее конкретных условий эксплуатации. Однако двухотсечная схема увеличивает инженерную сложность и количество деталей по сравнению с моноблочной, что может привести к увеличению массы и стоимости

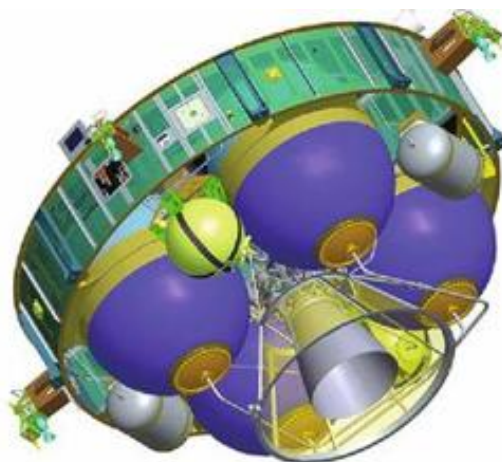


Рисунок 4. РБ Юаньчжэн

Концентрическая схема компоновки разгонного блока характеризуется расположением одного элемента (например, топливного бака) внутри другого, часто цилиндрической или тороидальной формы. Это позволяет максимально заполнить доступный объем и оптимизировать компоновку. В центре такой компоновки, как и в случае с торо-баллонами, может оставаться свободный объем, который может быть использован для размещения двигательной установки или бортового оборудования [36]. Примером РБ с концентрической схемой является БОРИС (блок орбитального размещения искусственных спутников), в конструкции которого используются сферические и тороидальные топливные баки.

Основным преимуществом концентрической схемы является эффективное использование объема, что позволяет создавать более компактные разгонные блоки [37]. Для криогенных компонентов топлива такая схема может обеспечить снижение теплового потока за счет экранирования внутреннего бака более холодным внешним. К недостаткам концентрической схемы относятся сложность изготовления и потенциальные проблемы, связанные с дифференциальным тепловым расширением различных материалов при криогенных температурах. Кроме того, такая компоновка может вызывать вибрации, поскольку опорожняющиеся баки могут резонировать на различных частотах.

Радиально-симметричная схема компоновки предполагает, что компоненты разгонного блока расположены симметрично вокруг центральной оси. Это часто достигается путем размещения двигательной установки или основного оборудования в центре, а топливных баков или полезных нагрузок – по периферии, равномерно распределяя массу и нагрузки. Такая архитектура способствует сбалансированности аппарата [38]. Подобная схема компоновки применяется в большинстве малых РБ, таких, как Sherpa (рис. 5) [39], Elytra, Волга и др.

Радиально-симметричная компоновка обеспечивает хорошую стабильность работы и способность воспринимать значительные нагрузки, что достигается равномерным

распределением силовых потоков и напряжений в конструкции. Для вращающихся космических аппаратов радиальная симметрия идеально подходит, так как она позволяет сбалансировать динамику и упростить управление ориентацией. Кроме того, она может упростить интеграцию множества небольших полезных нагрузок, например, малых КА, размещаемых вокруг центральной структуры. Несмотря на преимущества в стабильности, радиально-симметричная схема может накладывать ограничения на движение или маневрирование, если элементы жестко закреплены. Развертывание радиальных элементов, таких, как солнечные панели или антенны, сопряжено с рисками, такими, как отказы развертывания или повреждения от микрометеоритов.



Рисунок 5. РБ Sherpa

Таким образом, каждая конструктивно-компоновочная схема обладает уникальным набором преимуществ и недостатков, определяющих ее применимость для конкретных миссий.

Заключение

На основе анализа технических характеристик и эксплуатационных требований жидкостные ракетные двигатели представляются наиболее предпочтительным типом двигательной установки для малых разгонных блоков. Их ключевые преимущества включают высокий удельный импульс, возможность многократного включения, регулирование тяги и широкий спектр орбитальных манёвров, что критично для точного выведения полезной нагрузки, развертывания спутниковых группировок и межпланетных миссий. Среди вариантов подачи топлива выбор между вытеснительной и насосной схемами определяется энергетическими потребностями миссии и требованиями к надежности: вытеснительная система предпочтительна при простоте и низкой стоимости, тогда как насосная – при необходимости высокой производительности. Особый интерес представляют электро-насосные схемы, предлагающие компромисс между эффективностью и снижением массы. Для большинства применений двухкомпонентные

ЖРД являются оптимальными, обеспечивая необходимую энергоэффективность и гибкость, особенно при использовании топливной пары керосин + жидкий кислород, сочетающей производительность, экономичность и технологическую зрелость.

Выбор конструктивно-компоновочной схемы малых РБ определяется необходимостью баланса между массой, габаритами, типом топлива, точностью выведения и технологичностью изготовления. Наибольшее распространение получила радиально-симметричная компоновка, благодаря эффективному размещению полезных нагрузок, хорошему распределению масс и высокой устойчивости в полёте. Такая схема обеспечивает гибкость при орбитальных манёврах и доставку ПН на индивидуальные орбиты, что особенно важно в контексте развивающегося рынка малых КА. Перспективы развития малых РБ связаны с повышением степени многозадачности, использованием экологичных компонентов топлива и возрастанием уровня автономности, что позволит сократить стоимость миссий и повысить эффективность космических операций.

Благодарность

Это исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR249008/0224)

Вклад авторов

Омарбаев М.К. – руководитель исследования, разработка общей концепции и дизайна работы. Постановка цели и задач исследования. Осуществлял общее руководство проектом и критический пересмотр рукописи на всех этапах. Утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

Сулейменов М.К. – разработка методологии исследования, включая применение метода многокритериального анализа для оценки схем реализации МРБ. Написание ключевых аналитических разделов, включая «Методология» и «Результаты и обсуждение». Формулирование основных выводов и заключения.

Жакенова Т.К. – сбор и систематизация информации по существующим и перспективным малым разгонным блокам с жидкостными и гибридными двигателями. Проведение анализа их конструктивно-компоновочных схем и подготовка соответствующих табличных данных.

Назаргалиева Д.С. – сбор и анализ информации по малым разгонным блокам с электрореактивными и твердотопливными двигателями. Поиск и обработка научных публикаций по теме, оформление списка литературы и транслитерированного списка (References), а также подготовка аннотаций на других языках.

Список литературы

1. Philip R Blanco 2022 Learning about rockets, in stages *Phys. Educ.* 57 045035, doi: 10.1088/1361-6552/ac6928
2. Зеленцов В. В., Щеглов Г. А. Конструктивно-компоновочные схемы разгонных блоков: учебное пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 139 с.
3. Bauer H. E. Operational Experiences on the Saturn V S-IVB Stage. Aeronautics and Space Engineering and Manufacturing Meeting, Los Angeles, Calif. Oct. 7-11, 1968.
4. Frank A. Slazer, James C. Harvey, Robert J. Sirko, Johnathan D. Barr, Scott C. Ward. Delta IV

- Launch Vehicle Growth Options to Support Nasa's Space Exploration Vision, 55th International Astronautical Congress 2004 – Vancouver, Canada.
5. SpaceX. URL: <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-heavy/> (дата обращения: 2.05.2025)
 6. Pavithra Ravi, Carolin Frueh and Thomas Schildknecht. Investigation of Three Recent Atlas V Centaur Upper Stage Fragmentation Events [Proc. 8th European Conference on Space Debris (virtual)]. Darmstadt, Germany, 20-23 April 2021.
 7. Лемешевский С. А., Ишин С. В., Асюшкин В. А., Викуленков В. П., Ширшаков А. Е., Федоскин Д. И., Ефанов В. В., Яковлев Б. Д., Жумаханов Н. Б., Порешнев А. Ю., Бирюков А. С. Усовершенствованный разгонный блок типа «Фрегат» для перспективных ракет космического назначения среднего класса // Вестник «НПО им. С. А. Лавочкина». – Химки: НПО им. С. А. Лавочкина, 2018. - №2 (40). – С. 3-12.
 8. Shreya Mane. Theoretical Overview on Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV). International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering, Vol. 13 Issue 9, September, 2024.
 9. Матвеев Ю. А., Позин А. А., Юрченко М. И. Оценка спроса на запуски малых космических аппаратов и его влияние на технический облик систем выведения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 9. EDN IVXQFP
 10. Малых Д. А., Пешков Р. А., Шалашов М. А. Анализ основных проектных параметров малого разгонного блока. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, №4, с. 52-59, doi: 10.18698/0536-1044-2022-4-52-59
 11. Grant Bonin. The case for smaller launch vehicles in human space exploration (part 2). International Space Development Conference, June 19-22, 2025.
 12. William W. Benson. Enabling Multiple Small Satellite Near-Earth Asteroid Flyby Missions Using Small Solid Rocket Kick Stages with Rideshare Opportunities, AIAA SciTech Forum, 2024.
 13. Elizabeth Buchen, Dominic DePasquale. Custom analyses and more detailed assessments are available from SpaceWorks for nano/microsatellites and larger satellite classes, SpaceWorks Enterprises, Inc. (SEI), 2014.
 14. Momentus Space. URL: <https://momentus.space/services/> (дата обращения: 17.01.2025)
 15. D-Orbit. URL: <https://www.dorbit.space> (дата обращения: 17.01.2025)
 16. Exotrail. URL: <https://www.exotrail.com> (дата обращения: 17.01.2025)
 17. Ordahl C. A. The MDAC Payload Assist Modules (PAM-A and PAM-D), 9th AIAA Communication Satellite System Conference, 8 March 1982.
 18. Кислицкий М. И., Черепанов В. А., Голованова В. В. Создание унифицированного модульного малого космического разгонного блока «Тор» на основе серийного ракетного двигателя твердого топлива. Крупногабаритные трансформируемые конструкции космических аппаратов, 2009.
 19. Rocket Lab USA. Payload User Guide. LAUNCH.V6.6. URL: <https://www.rocketlabusa.com/assets/Uploads/Payload-User-Guide-LAUNCH-V6.6.pdf> (дата обращения: 22.10.2024)
 20. Firefly Aerospace. URL: <https://fireflyspace.com/elytra/> (дата обращения: 2.05.2025)
 21. Cantwell B., Karabeyoglu A., Altman D. Recent Advances in Hybrid Propulsion // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. – 2010. – Vol. 9, № 4.
 22. Егорычев В. С. Топлива химических ракетных двигателей: учеб. пособие / В. С. Егорычев, В. С. Кондрусев. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 72 с.
 23. Юхно М. Ю., Тимохович А. С. Гибридные ракетные двигатели – перспективное направление в современном ракетостроении. Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2020.

24. Heister S., Wernimont E. Hydrogen Peroxide, Hydroxyl Ammonium Nitrate, and Other Storable Oxidizers // Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion. – AIAA, 2007. – P. 457-487.
25. Casalino L., Pastrone D. Optimal Design of Hybrid Rocket Motors for Launchers Upper Stages // Journal of Propulsion and Power. – 2012. – Vol. 28, № 2. – P. 405-413.
26. Алемасов В. Е., Дрегаллин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 520 с.
27. Livia Ordóñez Valles, Arturs Jasjukevics, Marco Wolf, Lily Blondel Canepari, Uwe Apel, Martin Tajmar, Angelo Pasini. Luna Nova kick stage: an overview of the system propulsion trade-offs, 9th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), 2022, doi: 10.13009/EUCASS2022-7482
28. Peter Beck. Making Space on Orbit: Responsible Orbital Deployment in the Era of High-Volume Launch, 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2019.
29. Интерполярис. URL: <https://interpolyaris.ru/reference-list/razgonnyj-blok/> (дата обращения: 27.12.2024)
30. James L. Cannon. Liquid Propulsion: Propellant Feed System Design. Encyclopedia of Aerospace Engineering, Volume 2 Propulsion & Power, Wiley Publishers, 2010.
31. G. Waxenegger-Wilfing, R. H. S. Hahn, J. Deeken. Studies on electric pump-fed liquid rocket engines for micro-launchers, Conference: Space Propulsion, 2018.
32. Eric J. Wernimont. System Trade Parameter Comparison of Monopropellants: Hydrogen Peroxide vs Hydrazine and Others, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, CA, July 9-12, 2006.
33. Kun Ma, Wu Guo, Song Guan, Zhibin Ma, Tongyu Li. Development Status and Trend Analysis of Upper Stages. Missiles and Space Vehicles, 2024.
34. Sutton G. P., Biblarz O. Rocket Propulsion Elements. – 9th edition. – Wiley, 2016. – 792 p.
35. Bettes, Johnathan and Fuller, Andrew, "Design of an Experimental Solid Rocket Motor" (2024). Williams Honors College, Honors Research Projects. 1877.
36. Шаповалов А. В., Щеглов Г. А. Синтез рациональной компоновки малого разгонного блока на газообразных компонентах топлива. Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. №2. С. 70-77, doi: 10.34759/vst-2023-2-70-77
37. Rhodes Russel, 2022. The Benefits of a Rocket Vehicle Concentric Cryogenic Tank Design. SEVO (Space and Evolution): Brief Communication 12:1.
38. Shannon A., Brian P., Spencer P., Larry L. Deployment Methods for an Origami-Inspired Rigid-Foldable Array, The 42nd Aerospace Mechanism Symposium, 2014.
39. Jason Andrews. Spaceflight Secondary Payload System (SSPS) and Sherpa Tug – A New Business Model for Secondary and Hosted Payloads, 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2012.

М. Қ.Сулейменов, М. Қ.Омарбаев, Т. Қ.Жакенова*, Д. С.Назаргалиева

«Ұлттық ғарыш зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы, Қазақстан Республикасы

Шағын үдеткіш блоктардың іске асыру схемаларын салыстырмалы талдау

Аңдатпа. Бұл мақала қолданыстағы шағын үдеткіш блоктарды, соның ішінде әзірлеу

немесе сынау кезеңіндегі перспективті үдеткіш блоктарды шолуға арналған, шағын ғарыш аппараттарын мақсатты орбиталарға шығару міндеттерінде белсенді қолданылады, олардың өзектілігі соңғы уақытта ғарыш аппараттарын миниатюризациялау үрдісі аясында өсуде және тиісінше пайдалы жүктемелер массасының азаюы. Жұмыста үдемелі блоктардың негізгі жіктеу белгілері, соның ішінде массасы, қозғалтқыштың түрі, құрылымдық орналасу схемалары қарастырылады. Атап айтқанда, бұл схемалардың артықшылықтары мен кемшіліктері орналасу икемділігі, құрылымның массасы, өнімділігі, құрастырудың қарапайымдылығы және пайдалану сенімділігі тұрғысынан қарастырылады. Олардың арасында қозғалтқыш дамытатын тарту, мақсатты орбитаға шығарылатын пайдалы жүктеме массасы, отын беру әдісі сияқты негізгі параметрлер бойынша салыстырмалы талдау жасалады. Сондай-ақ, бір және екі компонентті отынды қолдану ерекшеліктері, сондай-ақ отын буын таңдаудың үдеткіш қондырғының тиімділігі мен қауіпсіздігіне әсері қарастырылады. Осы зерттеудің мақсаты оңтайлы техникалық сипаттамаларды, жоғары сенімділікті, экономикалық тиімділікті және экологиялық қауіпсіздікті біріктіретін шағын үдемелі блокты іске асыру схемасын таңдау мен негіздеу болып табылады. Ғылыми жаңалықтың негізгі элементі әртүрлі шағын үдемелі блоктардың жобалау тұжырымдамаларын бағалау үшін көп критерийлі талдау әдісін қолдануы ұсынылады. Бұл әдіс масса тиімділігі, нақты импульс, бірнеше рет қосу мүмкіндігі, технологиялық жетілу және т. б. сияқты қарама-қайшы инженерлік критерийлерді формальдау және теңестіруге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: шағын үдемелі блок, зымыран-тасығыш, пайдалы жүктеме, шағын ғарыш аппараты

M. K.Suleimenov, M. K.Omarbayev, . K. T. Zhakenova*, D. S.Nazargaliyeva

JSC «National center of space research and technology», Almaty, Republic of Kazakhstan

Comparative analysis of the small upper stages implementation schemes

Abstract. This article is devoted to a review of existing small upper stages, including perspective upper stages under development or testing, actively used in the tasks of launching small spacecraft into target orbit, the relevance of which has recently been increasing against the background of the trend of miniaturization of spacecraft and, consequently, the reduction of payload mass. The paper considers the main classification features of upper stages, including mass, type of propulsion system, design and layout schemes. In particular, the advantages and disadvantages of the above schemes are discussed in terms of layout flexibility, design weight, manufacturability, ease of assembly, and operational reliability. A comparative analysis between them is given for such key parameters as thrust developed by the propulsion system, the mass of the payload to be launched to the target orbit, and the method of propellant supply. The peculiarities of the use of single-component and two-component fuel are also considered, as well as the influence of fuel pair selection on the efficiency and safety of the upper stage. The purpose of this study is to select and justify a scheme for the realization of a small upper stage combining optimal technical characteristics, high reliability, economic efficiency and environmental safety. The key element of scientific novelty is the application of a multi-criteria analysis method to evaluate various designs for small upper stages. This method allows formalizing and balancing

conflicting engineering criteria, including mass efficiency, specific impulse, multiple firing capability, technological maturity, etc.

Keywords: small upper stage, launch vehicle, payload, small spacecraft.

References

1. Philip R Blanco 2022 Learning about rockets, in stages *Phys. Educ.* 57 045035, doi: 10.1088/1361-6552/ac6928
2. Zelentsov V. V., Shcheglov G. A., Design and layout schemes of upper stages: textbook. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publisher, 2018. – 139 p.
3. Bauer H. E. Operational Experiences on the Saturn V S-IVB Stage. Aeronautics and Space Engineering and Manufacturing Meeting, Los Angeles, Calif. Oct. 7-11, 1968.
4. Frank A. Slazer, James C. Harvey, Robert J. Sirko, Johnathan D. Barr, Scott C. Ward. Delta IV Launch Vehicle Growth Options to Support Nasa's Space Exploration Vision, 55th International Astronautical Congress 2004 – Vancouver, Canada.
5. SpaceX. URL: <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-heavy/> (accessed 2.05.2025)
6. Pavithra Ravi, Carolin Frueh and Thomas Schildknecht. Investigation of Three Recent Atlas V Centaur Upper Stage Fragmentation Events [Proc. 8th European Conference on Space Debris (virtual)]. Darmstadt, Germany, 20-23 April 2021.
7. Lemeshevsky S. A., Ishin S. V., Asyushkin V. A., Vikulenkov V. P., Shirshakov A. E., Fedoskin D. I., Efanov V. V., Yakovlev B. D., Zhumakhanov N. B., Poreshnev A. Yu., Biryukov A. S. Improved type "Fregat" upper stage for advanced medium-class space rockets // Bulletin "RPA named after S. A. Lavochkin". – Khimki: RPA named after S. A. Lavochkin, 2018. - №2 (40). – P. 3-12.
8. Shreya Mane. Theoretical Overview on Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV). International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering, Vol. 13 Issue 9, September, 2024.
9. Matveev Yu. A., Pozin A. A., Yurchenko M. I. Estimation of Demand for Small Spacecraft Launchers and its impact on the Technical Design of Launch Systems. Engineering Journal: Science and Innovations, 2024, issue 9. EDN IVXQFP
10. Malykh D. A., Peshkov R. A., Shalashov M. A. Basic design parameters analysis of a small upper stage. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenyi. Mashinostroenie*, 2022, No. 4, p. 52-59, doi: 10.18698/0536-1044-2022-4-52-59
11. Grant Bonin. The case for smaller launch vehicles in human space exploration (part 2). International Space Development Conference, June 19-22, 2025.
12. William W. Benson. Enabling Multiple Small Satellite Near-Earth Asteroid Flyby Missions Using Small Solid Rocket Kick Stages with Rideshare Opportunities, AIAA SciTech Forum, 2024.
13. Elizabeth Buchen, Dominic DePasquale. Custom analyses and more detailed assessments are available from SpaceWorks for nano/microsatellites and larger satellite classes, SpaceWorks Enterprises, Inc. (SEI), 2014.
14. Momentus Space. URL: <https://momentus.space/services/> (accessed 17.01.2025)
15. D-Orbit. URL: <https://www.dorbit.space> (accessed 17.01.2025)
16. Exotrail. URL: <https://www.exotrail.com> (accessed 17.01.2025)
17. Ordahl C. A. The MDAC Payload Assist Modules (PAM-A and PAM-D), 9th AIAA Communication Satellite System Conference, 8 March 1982.

18. Kislitsky M. I., Cherepanov V. A., Golovanova V. V. Design of unified modular small upper stage "Thor" on the basis of solid propellant rocket engine. Spacecrafts large-size transformable constructions, 2009.
19. Rocket Lab USA. Payload User Guide. LAUNCH.V6.6. URL: <https://www.rocketlabusa.com/assets/Uploads/Payload-User-Guide-LAUNCH-V6.6.pdf> (accessed 22.10.2024)
20. Firefly Aerospace. URL: <https://fireflyspace.com/elytra/> (accessed 2.05.2025)
21. Cantwell B., Karabeyoglu A., Altman D. Recent Advances in Hybrid Propulsion // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. – 2010. – Vol. 9, № 4. – P. 305-326.
22. Egorychev V. S. Chemical rocket engine fuels: textbook / V. S. Egorychev, V. S. Kondrusev. – Samara: SSAU Publisher, 2007. – 72 p.
23. Yukhno M. Y., Timokhovich A. C. Hybrid rocket engines is a perspective direction in modern rocket engineering. Aviation and cosmonautics actual problems – 2020. Vol. 1.
24. Heister S., Wernimont E. Hydrogen Peroxide, Hydroxyl Ammonium Nitrate, and Other Storable Oxidizers // Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion. – AIAA, 2007. – P. 457-487.
25. Casalino L., Pastrone D. Optimal Design of Hybrid Rocket Motors for Launchers Upper Stages // Journal of Propulsion and Power. – 2012. – Vol. 28, № 2. – P. 405-413.
26. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. Rocket engines theory. – Moscow: Mashinostroenie, 2006. – 520 p.
27. Livia Ordonez Valles, Arturs Jasjukevics, Marco Wolf, Lily Blondel Canepari, Uwe Apel, Martin Tajmar, Angelo Pasini. Luna Nova kick stage: an overview of the system propulsion trade-offs, 9th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), 2022, doi: 10.13009/EUCASS2022-7482
28. Peter Beck. Making Space on Orbit: Responsible Orbital Deployment in the Era of High-Volume Launch, 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2019.
29. nterpolaris. URL: <https://interpolyaris.ru/reference-list/razgonnyj-blok/> (accessed 27.12.2024)
30. James L. Cannon. Liquid Propulsion: Propellant Feed System Design. Encyclopedia of Aerospace Engineering, Volume 2 Propulsion & Power, Wiley Publishers, 2010.
31. G. Waxenegger-Wilfing, R. H. S. Hahn, J. Deeken. Studies on electric pump-fed liquid rocket engines for micro-launchers, Conference: Space Propulsion, 2018.
32. Eric J. Wernimont. System Trade Parameter Comparison of Monopropellants: Hydrogen Peroxide vs Hydrazine and Others, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, CA, July 9-12, 2006.
33. Kun Ma, Wu Guo, Song Guan, Zhibin Ma, Tongyu Li. Development Status and Trend Analysis of Upper Stages. Missiles and Space Vehicles, 2024.
34. Sutton G. P., Biblarz O. Rocket Propulsion Elements. – 9th edition. – Wiley, 2016. – 792 p.
35. Bettes, Johnathan and Fuller, Andrew, "Design of an Experimental Solid Rocket Motor" (2024). Williams Honors College, Honors Research Projects. 1877.
36. Shapovalov A. V., Shcheglov G. A. Rational layout of a small upper stage synthesis on gas fuel components. Moscow Aviation Institute bulletin. 2023. T. 30. №2. P. 70-77, doi: 10.34759/vst-2023-2-70-77
37. Rhodes Russel, 2022. The Benefits of a Rocket Vehicle Concentric Cryogenic Tank Design. SEVO (Space and Evolution): Brief Communication 12:1.

38. Shannon A., Brian P., Spencer P., Larry L. Deployment Methods for an Origami-Inspired Rigid-Foldable Array, The 42nd Aerospace Mechanism Symposium, 2014.
39. Jason Andrews. Spaceflight Secondary Payload System (SSPS) and Sherpa Tug – A New Business Model for Secondary and Hosted Payloads, 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2012.

Сведения об авторах:

Сулейменов М. К. – докторант 2 курса, механико-математический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, г. Алматы, Казахстан.
Омарбаев М. К. – докторант 2 курса, механико-математический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, г. Алматы, Казахстан.
Жакенова Т. К. – автор по корреспонденции, магистрант 2 курса, институт телекоммуникаций и космической инженерии, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, ул. Байтурсынова, 126/1, г. Алматы, Казахстан.
Назаргалиева Д. С. – инженер-конструктор конструкторского отдела, Национальный центр космических исследований и технологий, ул. Шевченко 15, г. Алматы, Казахстан.

Suleimenov M. K. – 2nd year PhD student, school of mechanics and mathematics, Kazakh national university named after Al-Farabi, Al-Farabi ave. 71, Almaty, Kazakhstan.
Omarbayev M. K. – 2nd year PhD student, school of mechanics and mathematics, Kazakh national university named after Al-Farabi, Al-Farabi ave. 71, Almaty, Kazakhstan.
Zhakenova T. K. – the corresponding author, 2nd year Master's student, Institute of telecommunications and space engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunication named after Gumarbek Daukeev, Baitursynov str. 126/1, Almaty, Kazakhstan.
Nazargaliyeva D. S. – design department's design engineer, National center of space research and technology, Shevchenko str. 15, Almaty, Kazakhstan.

Сулейменов М. Қ. – 2 курс докторанты, механика-математика факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы 71, Алматы, Қазақстан.
Омарбаев М. Қ. – 2 курс докторанты, механика-математика факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы 71, Алматы, Қазақстан.
Жакенова Т. К. – хат хабар үшін авторы, 2 курс магистранты, телекоммуникация және ғарыш инженерия институты, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Байтұрсынов көшесі 126/1, Алматы, Қазақстан.
Назаргалиева Д. С. – конструкторлық бөлімінің инженер-конструкторы, Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы, Шевченко көшесі 15, 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 73.31.41
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-214-234>

Форсирленген дизельді қозғалтқыштардың өнімділігін майлау жүйесіндегі май көлемін басқаруды жақсарту арқылы арттыру

А.М. Табинбаев^{1*} , К.К. Джолдасова¹ , А.М. Биниязов² ,
А.С. Денисов³ 

¹Қ. И. Сәтбаева атындағы Қазақ ұлттық ұлттық зерттеу университеті,
Алматы, Қазақстан

²Батыс Қазақстан инновациялық технологиялық университеті, Орал, Қазақстан

³Ю.А. Гагарин атындағы Саратов мемлекеттік техникалық университеті,
Саратов, Ресей

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

Андатпа. Бұл ғылыми-зерттеу жұмысының өзектілігі автомобильдердегі форсирленген қозғалтқыштарды пайдалану тиімділігін арттыру және оларды жөндеуге кететін ағымдағы шығындарды азайту үшін қосымша мүмкіндіктерді іздеу қажеттілігімен негізделеді. Зерттеу мақсаты — қозғалтқыштағы май деңгейінің майдың ескіру процестеріне және дизельді қозғалтқыштың техникалық жай-күйінің өзгеруіне әсер етуінің жалпы принциптері мен заңдылықтарын бағалау. Зерттеу барысында автомобиль қозғалтқышын пайдалану кезінде мотор майы параметрлерінің өзгеру сипатына эксперименттік бағалау жүргізілді. Алынған нәтижелер әр 2000 км сайын май құюды қарастыратын, қазіргі уақытта қабылданған автомобиль дизельді қозғалтқышының карттеріне май құю жиілігін қайта қарау қажеттілігін көрсетеді. Себебі, бұл жағдайда қозғалтқышты пайдалануға кететін меншікті шығындар жоғары болғандықтан, экономикалық тұрғыдан тиімсіз. Нәтижелердің практикалық маңыздылығы оларды автокөлік техникасына қызмет көрсету кезінде, сондай-ақ күрделі жөндеу немесе дизельді қозғалтқыштарды форсирлеу қажет болған жағдайда, майлау жүйесіндегі май көлемін өзгерту мүмкіндігінде жатыр.

Түйін сөздер: көлік кәсіпорындары, күрделі жөндеу, техникалық қызмет көрсету, қосалқы бөлшектер, конструктивтік параметрлер, апатсыз пайдалану.

Түсті 10.09.2025. Жөнделді 23.11.2025. Мақұлданды 27.11.2025. Онлайн қолжетімді 30.12.2025

* хат хабар үшін авторы

Кіріспе

Көлік құралдарының апатсыз жұмыс істеуіне техникалық қызмет көрсету талаптарын сақтау, яғни майлау жүйесіндегі майды уақытылы ауыстыру және қозғалтқыш пен басқа да тетіктердің техникалық жай-күйін бақылау арқылы қол жеткізуге болады.

Автомобильдерді пайдалану тиімділігіне қойылатын талаптардың үнемі артуы қозғалтқыштарды форсирлеуді қажет етеді. Бұл, өз кезегінде, қозғалтқыш тетіктері мен элементтерінің термиялық кернеуін арттыруға, мотор майының тиімділігін күрт төмендетуге әкеледі. Соның салдарынан, майдың «жанып кетуі» көбейіп, қоспалар тез ескіреді, үйкелетін бөлшектердің тозуы жылдамдап, олардың бетінде күйе пайда болады, бұл қозғалтқыштың қызмет ету мерзімін айтарлықтай қысқартады.

Автомобиль қозғалтқышының майлау жүйесінің дұрыс жұмыс істеуі оның техникалық жай-күйі мен жұмысқа қабілеттілігін айтарлықтай анықтайды және қызмет ету мерзіміне тікелей әсер етеді. Форсирленген қозғалтқыштардың майлау жүйесінің тиімділігі оның үйкелетін беттер арасындағы үйкеліс процесін қалыпқа келтіру арқылы тозуды барынша азайту қабілетіне байланысты. Осы тұрғыда, майлау жүйесіндегі май көлемін басқару арқылы форсирленген қозғалтқыштардың жұмысқа қабілеттілігін арттыру мәселесі алдыңғы қатарға шығады.

2024 жылдың басында Қазақстан Республикасының автомобиль шаруашылығында қалыптасқан жағдайға сәйкес, бұл мәселені сәтті шешу қозғалтқыштардың апатсыз жұмыс істеу мерзімін ұзартуға және олардың сенімділігін арттыруға кең мүмкіндіктер ашады, бұл өз кезегінде автокөлік техникасын пайдалану қауіпсіздігіне тікелей әсер етеді.

2022 жылы А.М. Биниязов пен А.С. Денисовтың ғылыми зерттеулерінде майлау жүйесіндегі май көлемін басқаруды жетілдіру арқылы форсирленген автомобиль дизельді қозғалтқыштарын пайдалану тиімділігін арттыру мәселелері қарастырылған. Авторлар автомобиль қозғалтқыштарының жұмыс сенімділігін арттыру Қазақстан экономикасы үшін маңызды міндеттердің бірі екенін атап өтеді. Қозғалтқыштардың тозу, істен шығу және соған байланысты техниканың тоқтап қалуы қосалқы бөлшектердің көп шығынына және автокөлік техникасын пайдаланудағы қиындықтарға әкеледі. Елде қосалқы бөлшектерді өндіруге жаңа автомобильдер шығаруға бөлінген қаражаттың жартысына дейін жұмсалады. Сонымен қатар, мақалада автомобиль қозғалтқыштарын күрделі жөндеу құнын төмендету және олардың қызмет ету мерзімін арттыру мәселелері қарастырылмаған.

Өз кезегінде, Р.Ю. Зарипов және т.б. (2023) автомобиль негізіндегі гибриді қондырғыны әзірлеудің бірқатар проблемалық аспектілерін қарастырып, автомобиль қозғалтқышының майлау жүйесіндегі май көлемін басқару процесін жетілдіру автокөлікті пайдалану қауіпсіздігін қамтамасыз етудің маңызды аспектісі екенін атап өткен. Зерттеушілердің пікірінше, қозғалтқыш картеріндегі қажетті май деңгейін сақтау бөлшектердің қажетті температуралық режимін қамтамасыз ету, үйкеліс жұптарынан тозу өнімдерін шығару, сондай-ақ майдағы қоспалар арқылы оңтайлы майлау жағдайларын жасау үшін қажет. Алайда, мақалада бұл міндеттерді шешудің технологиялық жолдары қарастырылмаған.

М. Табатабаев және т.б. (2022) биодизельдің антиоксиданттарының әсерінен дизельді қозғалтқыштардың жұмыс сипаттамаларының өзгеруіне қатысты бірқатар проблемалық аспектілерді бірлесіп қарастырған. Ғалымдар биоотынды пайдалану автомобиль

қозғалтқыштарын форсирлеудің жаңа, қосымша мүмкіндіктерін ашады деген пікірде. Сонымен қатар, авторлар дизель отынын тұтыну көлемін азайту жалпы экологиялық жағдайға оң әсер етеді және сонымен бірге майлау жүйесіндегі мотор майының көлемін оңтайлы деңгейде ұстауға мүмкіндік береді деп атап өтеді. Дегенмен, бір отын түрінен екіншісіне ауысқан кезде қозғалтқыштың конструктивтік схемасына өзгерістер енгізу мәселелері ғылыми зерттеуде қарастырылмаған.

Сонымен қатар, V. Praveena және т.б. (2023) бірлескен ғылыми зерттеуде сафлор майымен жұмыс істейтін және сутегі газымен байытылған ішкі жану қозғалтқышының тиімділігін бағалау және қоршаған ортаға шығаратын қалдықтардың сипаты мәселелерін қарастырған. Зерттеушілердің пікірінше, қозғалтқыш картеріндегі май көлемін басқару қоршаған ортаға зиянды шығарындыларды азайту үшін қажет. Дегенмен, бұл мәселені шешудің нақты нұсқалары ғылыми жұмыста келтірілмеген.

Б. Жардемов және т.б. (2021) Қазақстанның машина жасау үшін маңыздылығы тұрғысынан екі отынмен жұмыс істейтін автомобиль және локомотив қозғалтқыштарын форсирлеу мәселелерін қарастырған. Қозғалтқыштың жұмысқа қабілеттілігін арттыру үшін картердегі май көлемін басқаруды және жұмыстың барлық кезеңдерінде қозғалтқыштың жай-күйін бақылауды дұрыс ұйымдастыру қажет екендігі атап өтілген. Бұл ретте зиянды шығарындылар көлемін азайту мәселелері қарастырылмаған.

2023 жылы X. Rao және т.б. жүргізген ғылыми зерттеуде ыстық қозғалтқышта жүргізілген жүріс сынақтары кезінде мотор майына графен-аттапульгит қоспаларын енгізу арқылы дизельді қозғалтқыштардың эмиссиялық және вибрациялық сипаттамаларының өзгеру мәселелері қарастырылған. Зерттеушілер форсирленген автомобиль қозғалтқыштарын пайдалану кезінде жалпы отын энергиясының шамамен 4%-дан 15%-ға дейіні механикалық үйкеліс күштерін жеңуге жұмсалатынын атап өтеді. Бұл факті қозғалтқыштың майлау жүйесіндегі мотор майы көлемінің өзгеру динамикасын басқару процестерінің маңыздылығын көрсетеді, өйткені май деңгейі оның қозғалмалы бөліктерінің үйкеліс күшінің параметріне әсер етеді, бұл қозғалтқыштың өнімділігі мен қызмет ету мерзіміне тікелей әсер етеді. Зерттеушілердің пікірі бұл жұмыста баяндалған нәтижелермен сәйкес келеді, өйткені қозғалтқыш картеріндегі май температурасының май құю көлеміне тәуелділігі эксперименттік жолмен анықталған, ал май температурасының параметрі қозғалтқыштың қозғалмалы бөліктерінің үйкеліс күшімен тікелей байланысты.

Өз кезегінде, 2021 жылы M. Magiappa және т.б. бірлескен ғылыми зерттеуінде автомобиль қозғалтқыштарының майлау жүйесіндегі май көлемін басқару мәселелерін шешу мақсатында пиролиздік пластикалық майды өндіру және оңтайландыру бойынша проблемалық аспектілердің кең кешені қарастырылған. Авторлардың пікірінше, автомобиль қозғалтқышының майлау жүйесіндегі май көлемін басқару процестерін оңтайландыру осы қозғалтқыштың жұмысқа қабілеттілігі мен қызмет ету мерзіміне тікелей әсер етеді. Бұл ретте, пиролиз катализаторы ретінде көмір күлін қосқанда май шығымы айтарлықтай артады, бұл қозғалтқыштың қозғалмалы элементтері арасындағы үйкеліс күшін төмендетіп, оның мерзімінен бұрын тозуын болдырмайды. Ғалымдардың қозғалтқыштың майлау жүйесіндегі май көлемін басқару процестерін оңтайландыру тұрғысынан пікірі осы ғылыми зерттеудің нәтижелеріне сәйкес келеді, ал көмір күлінің бұл процестегі рөліне қатысты пікірді практикада тексеру қажет. Сонымен қатар, R. Sabarish, M.P. Kumar и R. Rajasekar (2022) отын қоспаларының дизельді қозғалтқыштардың жұмысқа

қабілеттілігіне әсерін зерттеу бойынша бірлескен ғылыми жұмыстарында сапалы отынға деген қажеттілік және майлау жүйесінің жұмысын басқару мәселелері дизельді қозғалтқыштардың жоғары деңгейдегі жұмысқа қабілеттілігін сақтау контекстіндегі негізгі факторлардың бірі болып табылатыны атап өтілген. Ғалымдардың пікірінше, балама отын түрлерін, атап айтқанда, бірқатар тағамдық немесе тағамдық емес майлардан өндірілген биодизельді пайдалану автомобиль қозғалтқышының зиянды шығарындыларының түзілу қаупін азайтады, оның қызмет ету мерзімін ұзартады, сондай-ақ майлау жүйесіндегі май көлемін басқару процесін айтарлықтай жеңілдетеді. Зерттеушілердің бұл қорытындылары осы зерттеудің нәтижелеріне қайшы келмейді, алайда олардың нақты дәлелдерін алу үшін тәжірибе жүзінде тексеруді қажет етеді.

R. Senthilraja және т.б. (2016) ғылыми-зерттеу жұмысында дизельді автомобиль қозғалтқышының өнімділігі және оның қалдықтарының қоршаған ортаға әсері мәселелері қарастырылған. Зерттеушілер форсирленген автомобиль дизельді қозғалтқышының сипаттамалары, оның шығарындыларының сипаттамалары және отынның тұтануы мен жануы кезіндегі жұмыс істеу ерекшеліктері арасында тікелей өзара байланыс бар деген қорытындыға келген. Ғалымдардың пікірінше, автомобиль қозғалтқышын форсирлеу кезінде майлау жүйесіндегі май көлемінің өзгеру тенденцияларын, сондай-ақ оның жұмысқа қабілеттілігіне әсер ететін конструктивтік ерекшеліктерін (жану камерасының көлемі, тактылығы және т.б.) ескеру қажет. Авторлардың пікірі осы зерттеудің нәтижелерімен расталады, өйткені олар автомобиль дизельді қозғалтқышының конструктивтік ерекшеліктері мен оның жұмысқа қабілеттілігі арасындағы тәуелділіктің бар екенін көрсетеді.

Өз кезегінде, Q. Xin (2013) өзінің ғылыми зерттеуінде қозғалтқышты майлаудың қозғалмалы бөліктердің үйкеліс күшіне әсер ету заңдылықтарын зерттей отырып, қозғалтқыштағы үйкеліс күшін азайтуға жекелеген кіші жүйелерді: поршень торабын, клапан жүйесін, поршеньдік сақиналарды және т.б. жаңғыртуға бағытталған бірқатар конструктивтік шараларды енгізу ықпал ететінін атап өтеді. Бұл ретте, енгізілетін өзгерістер оның жұмыс режимін бұзбау үшін қозғалтқыштың майлау жүйесіндегі майдың оңтайлы деңгейін ұстап тұрумен келісілуі тиіс. Ғалымдардың қорытындылары осы жұмысты орындау кезінде алынған нәтижелерге сәйкес келеді, сондай-ақ олардың дизельді қозғалтқыштың жұмысқа қабілеттілігіне әсер етуі тұрғысынан майлау жүйесіндегі май көлемін өзгерту бойынша конструктивтік шаралардың маңыздылығын көрсетеді.

2018 жылы G. Sujesh пен S. Ramesh зерттеушілер тобы бірлесіп жазған ғылыми мақалада дизельді қозғалтқыштарды модельдеудің және олардың жұмысын басқарудың бірқатар жалпы принциптері қарастырылған. Ғалымдар қозғалтқыштың бірқатар параметрлері, атап айтқанда, сығу дәрежесі (CR), сондай-ақ бүрку сәті биодизельдік қоспалармен жұмыс істейтін дизельді қозғалтқыштың процестері мен шығарындыларына айтарлықтай әсер ететініне назар аударады. Авторлардың пікірінше, форсирленген дизельді қозғалтқыштың майлау жүйесіндегі май көлемінің өзгеруін басқару зиянды шығарындылардың сипатын бақылауды қамтуы керек, өйткені картердегі май деңгейі мен қозғалтқыштың жұмысы арасында, демек, оның қоршаған ортаға шығаратын қалдықтарының сипаты арасында айқын өзара байланыс бар. Авторлардың пікірі осы ғылыми жұмыстың нәтижелерімен расталады, себебі қозғалтқыштың майлау жүйесіндегі

май деңгейінің оның функционалдығының өзгеруімен тәуелділігі анық көрінеді.

S.B. Chauhan және т.б. (2020) ғалымдар тобы өз жұмыстарында орташа қуатты форсирленген автомобиль дизельді қозғалтқыштарына арналған қызған майдың шығарындыларының сипаттамаларын зерттеудің бірқатар проблемалық аспектілерін қарастырды. Отындарды қозғалтқышқа беру кезінде олардың температурасының жоғарылауы тежегіштердің пайдалы әсер коэффициентінің айтарлықтай артуына және олардың меншікті энергия тұтынуының төмендеуіне әкеледі деген пікір айтылады. Болашақта жылу алмастырғышта қыздырылған ятрофа майын пайдалану автомобиль дизельді қозғалтқыштары үшін отынның сенімді және тиімді баламасы бола алады, бұл олардың жұмысқа қабілеттілігін арттыру перспективалары тұрғысынан өте маңызды. Зерттеушілердің пікірі даулы болып көрінеді, себебі оны практикалық жолмен тексеруді қажет етеді.

Сонымен қатар, M.T. Boldaji және т.б. (2021) ғалымдар тобы бірлесіп бірқатар отын қоспаларының автомобиль дизельді қозғалтқышындағы эквиваленттілік коэффициентінің, пайдаланылған газдардағы оттегі үлесінің, сондай-ақ су мен май температурасының өзгеру динамикасына әсерін зерттеді. Авторлар бүгінгі таңда құрамында табиғи негіздегі оттегі мөлшері жоғары отынды, атап айтқанда, этанол мен биодизельді дәстүрлі дизельді отынның тиімді алмастырғышы ретінде қарастыруға болатынын атап өтеді. Бұл автомобиль дизельді қозғалтқыштарының жұмысқа қабілеттілігін арттыру және оларды форсирлеу перспективалары тұрғысынан маңызды, себебі мұндай тәсіл қозғалтқыштағы май шығынын айтарлықтай азайтып, май көлемін басқару процесін жеңілдетеді. Ғалымдардың пікірі өте даулы болып көрінеді, себебі оны қолдайтын нақты практикалық нәтижелер әлі алынған жоқ.

Өз кезегінде, J. Patel және т.б. (2023) жалпы автомобиль өнеркәсібіне және атап айтқанда мотор майларына арналған сұйықтықтарды өндіру процестерінің қазіргі жай-күйін зерттеді. Ғалымдар мотор майына қоспа ретінде наносұйықтықтарды практикалық қолдану оның қасиеттерін жақсартады және қозғалтқыштың майлау жүйесіндегі май көлемін басқару тұрғысынан оңтайлы нәтижелерге қол жеткізуге мүмкіндік береді, сонымен қатар автомобиль дизельді қозғалтқыштарын форсирлеу үшін оңтайлы жағдайлар жасайды деген қорытындыға келді. Зерттеушілердің қорытындылары осы ғылыми жұмыстың нәтижелеріне сәйкес келеді, себебі сапалы май қоспаларын пайдалану оның қасиеттерін жақсартады, бұл автомобиль қозғалтқышының майлау жүйесіндегі май көлемін басқарудың оңтайлы жағдайларына қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Осы ғылыми зерттеудің мақсаты — қозғалтқыштағы май көлемінің майдың ескіру процестеріне және форсирленген автомобиль дизельді қозғалтқышының техникалық жай-күйінің өзгеруіне әсер ету заңдылықтарын зерттеу.

Әдіснама

Талдау әдісін қолдану арқылы майлау жүйесіндегі май деңгейін басқару есебінен форсирленген дизельді қозғалтқыштардың жұмысқа қабілеттілігін арттыру перспективалары тұрғысынан Қазақстан Республикасының автокөлік паркін дамытудың ағымдағы проблемалары мен міндеттері қарастырылды. Сонымен қатар, автомобиль қозғалтқыштарын күрделі жөндеу құнының олардың бастапқы құнына қатынасы және бұл қозғалтқыштардың екіншілік қызмет ету мерзімін бағалау туралы деректер алынды. Синтез әдісін қолдану форсирленген автомобиль қозғалтқышының майлау жүйесіндегі

май көлемін басқару процесінің автомобильді қауіпсіз пайдалану тұрғысынан маңыздылығын бағалауға мүмкіндік берді.

Жалпылау әдісін қолдану автомобиль дизельді қозғалтқышының майлау жүйесінің функционалдығы мен олардың бүкіл қызмет ету мерзімі ішіндегі жұмысқа қабілеттілігі арасындағы өзара байланысты талдауға мүмкіндік берді. Бұдан басқа, көрсетілген әдістердің үйлесімі картер мен майлау жүйесіндегі май деңгейін басқару арқылы дизельді қозғалтқыштардың жұмысқа қабілеттілігін арттыру мәселесін шешудің перспективаларын бағалауға мүмкіндік берді. Сондай-ақ, бұл әдістер форсирленген автомобиль дизельді қозғалтқыштарында әртүрлі май қоспаларының тиімділігін талдауға жол ашты.

Автомобиль қозғалтқышын пайдалану кезінде мотор майы параметрлерінің өзгеру сипатына эксперименттік баға беру үшін 28 КАМАЗ көлігіне үш жыл бойы бақылау жүргізілді. Бұл эксперимент "ЮгТрансГаз" ЖШС Автомобиль көлігі басқармасында жүргізілді. Алынған мотор майы сынамалары әрбір 2000 км жүргеннен кейін талдауға ұшырады. Эксперименттік мотор майы сынамасының көлемі 1,5 литрді құрады, барлығы 180 сынама талданды. Shell Rimula R3 X SAE 15W40 маркалы мотор майы пайдаланылды.

Май сынамаларын талдау кезінде келесі параметрлер анықталды: кинематикалық тұтқырлық (сСт), ашық тигельдегі тұтану температурасы ($^{\circ}\text{C}$), ластану деңгейі (cm^{-1}), сілтілік саны (mg KOH/g май), 20°C -дағы тығыздық (g/dm^3), судың массалық үлесі (%). Барлық қажетті талдаулар 2024 жылдың басына қарай Қазақстан Республикасындағы қолданыстағы МЕМСТ (ГОСТ) әдістемелеріне сәйкес зертханада орындалды.

Құйылған май көлемінің әсерін анықтау үшін экспериментке таңдалған барлық көліктер (28 бірлік) құйылатын майдың орташа көлеміне сәйкес шартты түрде төрт топқа бөлінді.

- Бірінші топқа бір құюдағы май көлемі 1,5-тен 3,5 литрге дейін болған көліктер енгізілді.
- Екінші топқа бұл параметр 3,5-тен 5,5 литрге дейін болған көліктер кірді.
- Үшінші топта — 5,5-тен 7,5 литрге дейін.
- Төртінші топта — 7,5-тен 10 литрге дейін.

Әрбір эксперименттік топ бойынша келесі көрсеткіштер анықталып, тіркелді:

- Бүкіл рейс бойы тіркелген картердегі майдың орташа температурасы.
- Орташа май шығыны.
- Майлау жүйесіндегі қысым.

Температура параметрін анықтау үшін май көлемін өлшейтін шұп орналасқан жерге термометр қойылды. Майлау жүйесіндегі май қысымын өлшеу үшін аспаптар панелінде орналасқан стандартты автомобиль манометрі пайдаланылды. Май шығыны май шұпындағы ең жоғарғы белгіге дейін құйылған май көлемі бойынша анықталды.

Нәтижелер мен талқылау

Келтірілген әдістеме бойынша жинақталған және өңделген эксперименттік деректер майдың күй көрсеткіштерінің жұмыс істеу уақытына тәуелділік параметрлерін алуға мүмкіндік берді (1-кесте). Тәуелділіктердің өздері 1-4-суреттерде келтірілген.

-кестеден көрініп тұрғандай, R^2 сенімділік параметріне қарағанда, барлық көрсеткіштер жоғары тығыз байланыспен аналитикалық тәуелділіктерге сәйкес келеді.

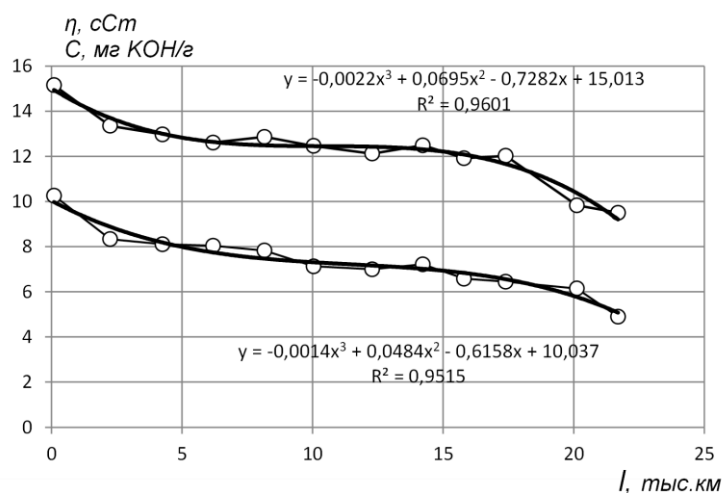
Майдың ескіру қарқындылығы тек қана жұмыс істеу уақытына (немесе наработкаға) ғана емес, сонымен қатар жануды өтеу үшін құйып қосу жағдайларына да байланысты болады.

1 – кесте. Мотор майы күйі көрсеткіштерінің жұмыс істеу уақытына (немесе наработкаға) тәуелділік параметрлері

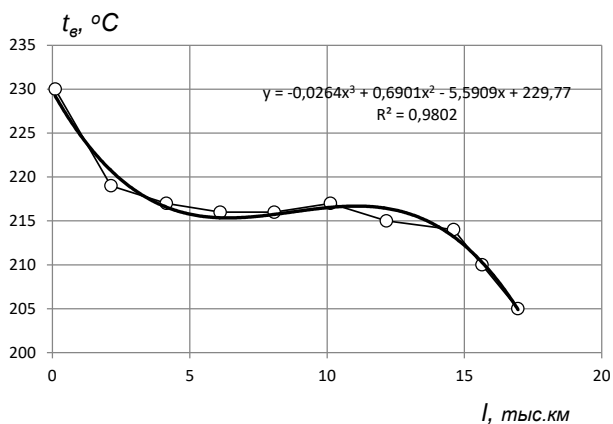
Көрсеткіштер	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²
η , сСт	15,01	-0,728	0,0695	-0,0022	0,961
<i>C</i> , мг КОН/г	10,037	-0,616	0,048	-0,0014	0,952
<i>t</i> _ө , °С	229,8	-5,591	0,69	-0,0254	0,98
<i>Z</i> , см ⁻¹	52,46	55,6	-3,45	0,173	0,883
ρ , кг/м ³	884,2	-1,505	0,168	-0,007	0,982

* η – кинематикалық тұтқырлық, сСт; *C* – сілтілік саны, мг КОН/г;

*t*_ө – ашық тигельдегі тұтану температурасы, °С; *Z* – ластану деңгейі, см⁻¹; ρ – тығыздық, кг/м³.

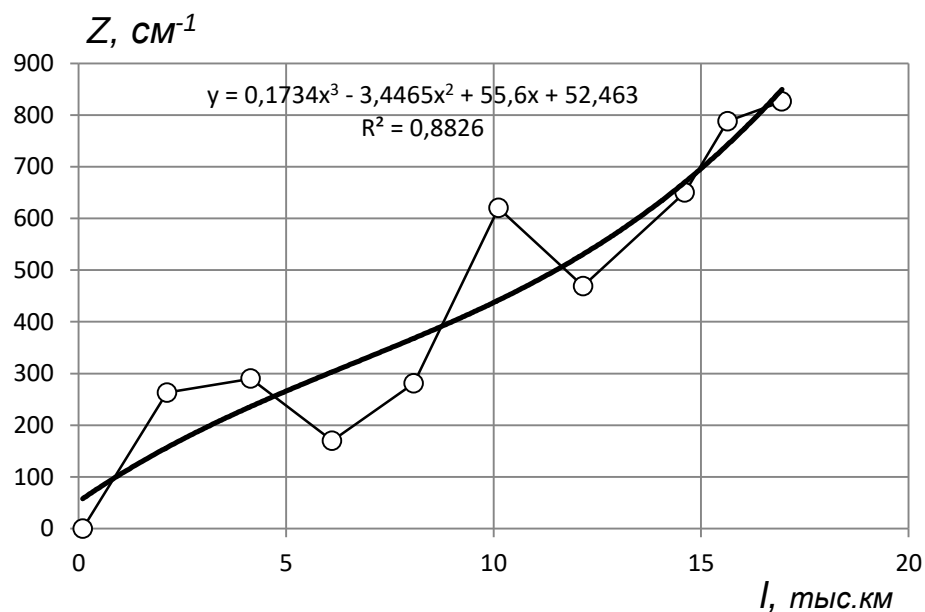


1 – сурет. Мотор майының жұмыс істеу процесіндегі КАМАЗ-ЕВРО автокөліктері бойынша сілтілік саны *C* мен тұтқырлықтың η өзгеруі

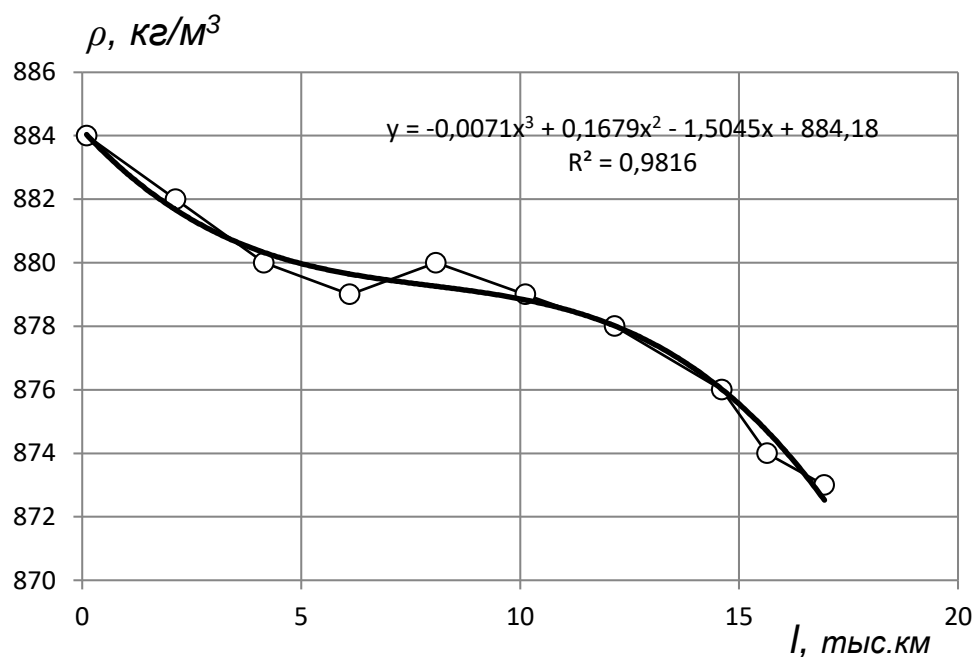


2 – сурет. Мотор майының жұмыс істеу процесіндегі КАМАЗ-ЕВРО автокөліктері бойынша тұтану температурасының *t*_ө өзгеруі

Бақылаудағы партияның автокөліктері бойынша майды құйып қосу (долив) деректерін өңдеу құйылатын май көлемінің таралуын (5-сурет) алуға және оның параметрлерін (2-кесте) анықтауға мүмкіндік берді.



3 – сурет. Мотор майының жұмыс істеу процесіндегі КАМАЗ-ЕВРО автокөліктері бойынша ластану дәрежесінің Z өзгеруі

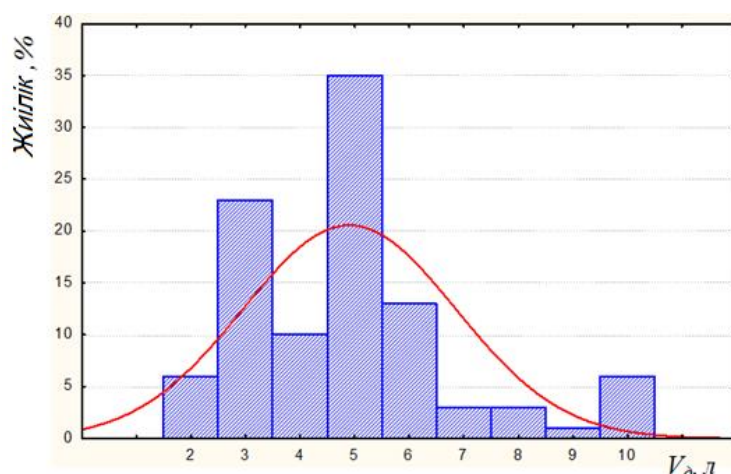


4 – сурет. Мотор майының жұмыс істеу процесіндегі КАМАЗ-ЕВРО автокөліктері бойынша тығыздықтың ρ өзгеруі

2 – кесте. Құйылатын май көлемі таралуының параметрлері

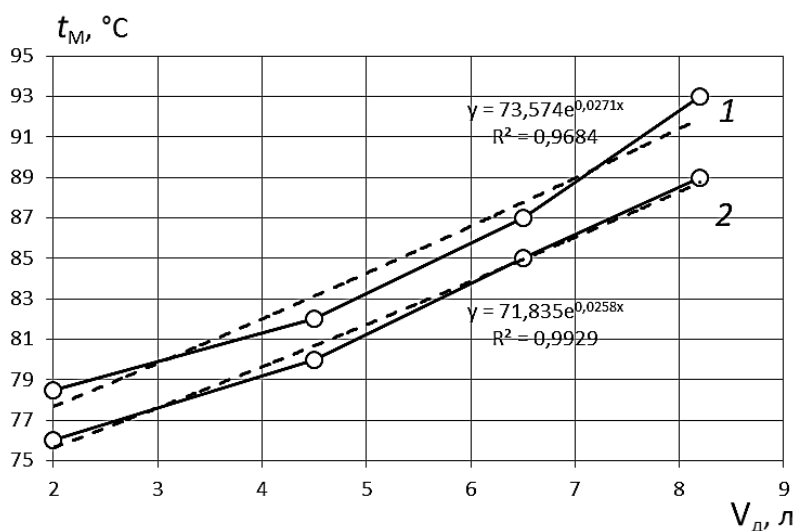
Көрсеткіштер	Орташа мән	Вариация коэффициенті
Бір реттік құйып қосу көлемі, л	3,6	0,292
Меншікті құйып қосу, л/мың км	1,78	0,289

2-кестеден көрініп тұрғандай, майды құйып қосу (долив) көлемі мен мерзімділігі ұсынылған мәндерден екі есе жоғары.



5 - сурет. Жануды (шығынды) өтеу үшін құйылатын май көлемінің таралуы

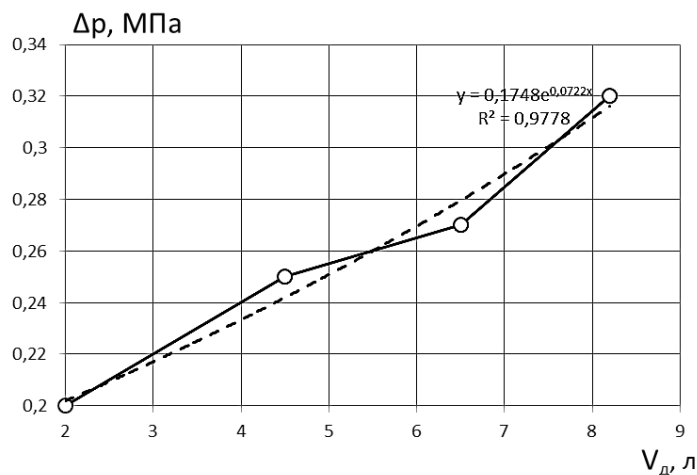
Майды құйып қосу мерзімділігінен басқа, құйылған майдың көлемі де қозғалтқыштың сенімділігіне әсер етеді.



6-сурет. Автокөлік қозғалтқышының картеріндегі май температурасының (жазда - 1, қыста - 2) құйылатын май көлеміне тәуелділігі.

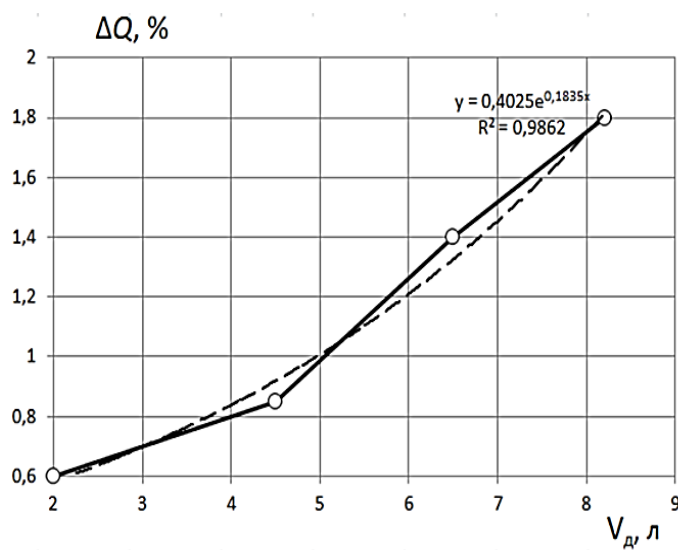
Эксперименттік жолмен майды бір реттік құю көлемі біртіндеп артқанда, белгілі бір уақыт ішінде сирек құйылған кезде май температурасының орташа есеппен 13-14°C-қа артқаны анықталды. Бұл қозғалтқыш картерінде май көлемінің аз болуымен түсіндіріледі,

бұл оның жылу өткізгіштік коэффициентінің төмен болуына әкеледі. Нәтижесінде, автомобиль қозғалтқышының техникалық жай-күйі күрт өзгереді (майлау жүйесіндегі май қысымы 40-45%-ға өзгереді), сонымен қатар майдың ескіруі қарқындырақ болады (75-80%-ға дейін).



7-сурет. Үш жылдық пайдалану кезеңінде қозғалтқыштың майлау жүйесіндегі қысымның төмендеуінің бір реттік құйылған май көлеміне тәуелділігі.

Майдың құйылатын көлемі азайған, бірақ құю жиілігі жоғары болған жағдайда, майдың жалпы көлемі қажетті ең жоғарғы деңгейге жақын болады.

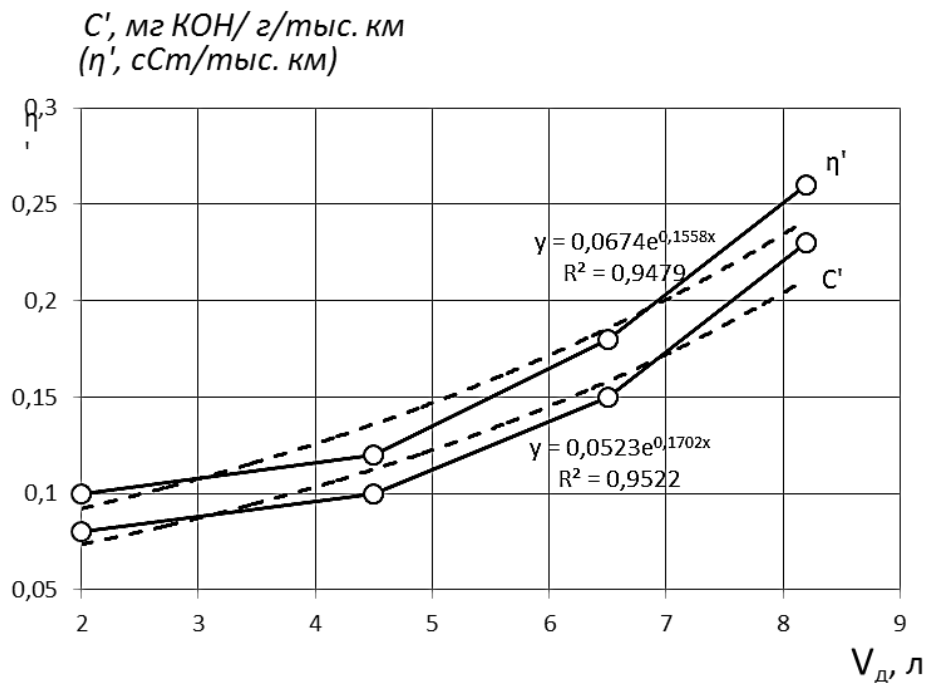


8-сурет. Қозғалтқыштың үш жылдық пайдалану кезеңінде майдың «жанып кетуге» кететін шығынының бір реттік құйылған май көлеміне тәуелділігі.

Бұл, өз кезегінде, жылу өткізгіштіктің жоғары болуын және май температурасының төмен болуын қамтамасыз етеді, бұл май параметрлерінің өзгеру қарқындылығын

төмендетуге және автомобиль қозғалтқышының техникалық жай-күйін тұрақтандыруға әкеледі.

6-9 суреттерде автомобиль қозғалтқышы майының әртүрлі параметрлерінің белгілі бір уақыт мезеттерінде картердегі нақты деңгейіне тәуелділігі көрсетілген. Жоғарыда көрсетілген тәуелділіктерді анықтау КАМАЗ-ЕВРО автомобилінің майлау жүйесінің істен шығуының алдын алуға және май құюға кететін меншікті пайдалану шығындарының көлемін анықтауға мүмкіндік берді.



9-сурет. Майдың тұтқырлығы мен сілтілігі параметрлерінің төмендеу қарқындылығының бір реттік құйылған май көлеміне тәуелділігі.

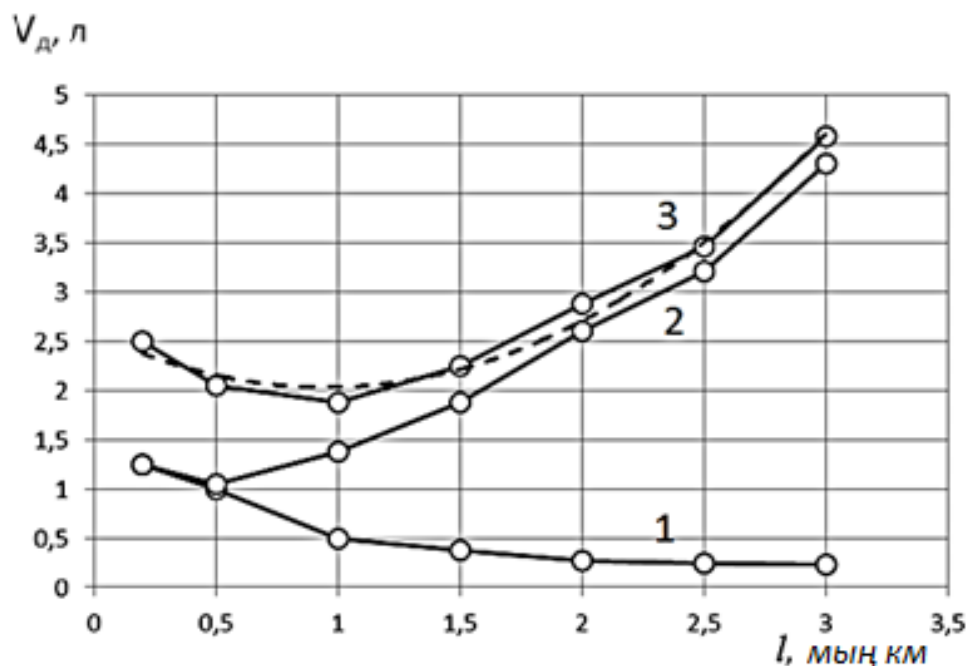
3-кесте. Май күйі көрсеткіштерінің Y майды бір реттік құйып қосу көлемінен V_0 экспоненциалды тәуелділігінің параметрлері V_0 ($Y=Ae^{bV_0}$)

Май күйінің көрсеткіші	A	b	R^2
Жаздағы картердегі температура, °C	73,574	0,0271	0,968
Қыстағы картердегі температура, °C	71,835	0,0258	0,953
Жүйедегі қысымның төмендеуі, МПа	0,175	0,0722	0,978
Май тұтқырлығының төмендеу қарқындылығы, сСт/мың км	0,0674	0,1558	0,948
Сілтіліктің төмендеу қарқындылығы, мг КОН/г/мың км	0,0523	0,1702	0,952

R^2 – эксперименттік деректерге арналған тренд сызығының сенімділік параметрі.

Осыған сәйкес, майлау жүйесіне май құюға дейінгі қозғалтқыштың оңтайлы жүріс мөлшері 1000 км-ді құрайды. Мотор майының қызмет ету мерзімі ішінде 17-18 рет май құю қажет, әр құюдың көлемі 1,8-2 литр болуы тиіс.

10-суретте әртүрлі шығындар көлемінің май құю жиілігіне графикалық тәуелділігі көрсетілген.



10-сурет. Шығындар көлемінің май құю жиілігіне тәуелділігі.

10-суретте келесі көрсеткіштер белгіленген:

1. Мотор майын құюға кететін пайдалану шығындарының көлемі.
2. Автомобиль дизельді қозғалтқышын жөндеуге кететін пайдалану шығындарының көлемі.
3. Пайдалану процесіндегі жиынтық шығындардың көлемі.

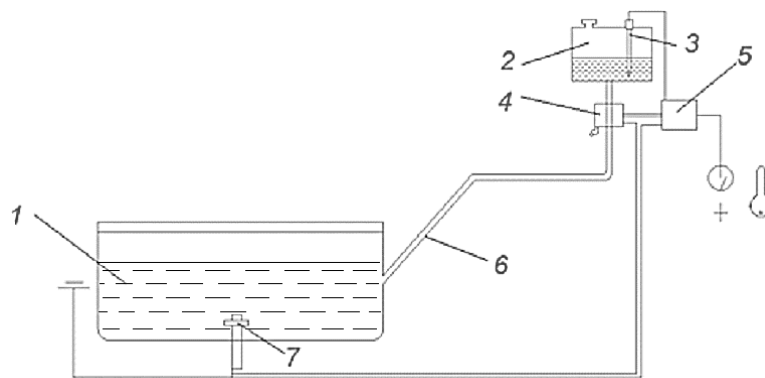
Алынған нәтижелер ең төменгі қажетті деңгейде келесі көрсеткіштерді қамтамасыз етуге мүмкіндік береді: картердегі май температурасын, қозғалтқыштың техникалық жай-күйінің өзгеру қарқындылығын, сондай-ақ майдың ескіру қарқындылығын. Бұл, мотор майын көрсетілген шарттарда құю кезінде, автомобиль қозғалтқышының ең жоғары рұқсат етілген қызмет ету мерзімі және мотор майының нормативтік жарамдылық кезеңі толығымен қамтамасыз етілетінін білдіреді.

Осы оңтайлы май құю режимін қамтамасыз ету мақсатында форсирленген автомобиль дизельді қозғалтқыштарында қолдануға арналған арнайы май деңгейін реттегіш жасалды. Бұл реттегіш 11-суретте көрсетілген. Бұл реттегіш жеке өнертабыс ретінде танылып, № 2641184 патенті берілген.

Конструктивтік схемасы 11-суретте көрсетілген бұл құрылғы — автомобильді пайдаланушылардың қалауы бойынша ғана жүргізілетін, автомобильдің функционалдық тюнингінің элементі болып табылады. Ұсынылған технологиялық элементтің тәжірибелік үлгілері экспериментке қатысқан дизельді қозғалтқыштары бар үш автомобильге орнатылған. Қазіргі уақытта олар Қазақстан Республикасының автокөлік кәсіпорындарының бірінде практикалық, жүріс сынақтарынан өтуде.

11-суретте келесі бөліктер белгіленген:

1. Қозғалтқыштың май картері.
2. Мотор майына арналған резервуар (бак).
3. Резервуардағы май көлемінің индикаторы.
4. Беру клапаны.
5. Ауыстырып-қосқыш.
6. Иілгіш май құбыры.
7. Қозғалтқыш картеріндегі май деңгейінің датчигі.



11-сурет. Форсирленген автомобиль дизельді қозғалтқышының картеріндегі май көлемін реттегіштің жұмыс істеу схемасы (№ 2641184 ресми патентке сәйкес).

Дереккөз: автор құрастырған

Бұл реттегіштің конструктивтік жұмыс істеу принципі келесідей:

- Автомобиль жүргізушісі қозғалтқыш жұмыс істемей тұрғанда және автомобиль қозғалмай тұрғанда 5-ауыстырып-қосқыш арқылы реттеу жүйесін қосады.
- Май деңгейі шұптың ең жоғарғы белгісінен төмен түскен кезде, 7-датчик арқылы 4-клапанға сигнал жіберіледі. Клапан ашылып, 2-резервуардан мотор майы тікелей 1-қозғалтқыш картеріне құйылады.
- Мотор майы шұптың жоғарғы белгісіне дейін көтерілген сәтте, 7-датчик 4-клапанның жабылуына сигнал береді. Осы кезде қозғалтқыш картеріне май құйылуы тоқтайды.
- Резервуардағы май таусылған кезде, жүргізуші 3-индикатордан резервуарға май құю қажеттілігі туралы сигнал алады.

Практикада май деңгейін реттегішті қолдану картердегі майдың нақты деңгейі шұптағы барлық белгілерден төмен болған жағдайда дизельді қозғалтқышты пайдаланудың алдын алуға мүмкіндік береді. Бұл апатты әсерлер нәтижесінде қозғалтқыштың иінді білік подшипниктерінің және цилиндр-поршеньді тобының зақымдану ықтималдығын айтарлықтай төмендетеді. Практикада май деңгейін реттегіштің орнына автомобильдің әрбір 1000 км жүрісінен кейін май құюды қолдануға болады, бұл ретте картердегі май деңгейі шұптағы ең жоғарғы белгіден жоғары болмауы тиіс.

Форсирленген автомобиль дизельді қозғалтқыштары майлау жүйесінде

қолданылатын майларға қоспалардың көлемін үнемі арттыруды талап етеді. Ең алдымен, тұтқырлықты арттыратын, жуғыш және диспергирлеуші қоспалардың қолданылу көлемі ұлғаяды. Соңғы екі типтегі қоспалар негізінен турбокомпрессорда, қозғалтқыш цилиндрлері мен поршеньдерінде түзілетін көміртекті шөгінділердің түзілу қарқындылығын төмендетуге арналған. Қозғалтқыштарды форсирлеу кезінде майлау жүйесіндегі май көлемін басқару процестерінің тиімділігін арттыру үшін диспергирлеуші және жуғыш қоспалар ретінде негізінен сілтілігі жоғары сульфонаттар, сондай-ақ алкилсалицилаттар қолданылады. Бұдан басқа, алкилфеноляттар мен карбон қышқылдарының және сульфоқышқыл тұздарының басқа да түрлері кеңінен қолданылады [11].

Майдың жуғыш қоспалары әсер етуіне қарай дисперсанттар мен детергенттерге бөлінеді.

Дисперсанттар шламның (лайдың) түзілуіне, әртүрлі тотығу өнімдерінің жабысуына, сондай-ақ механизмдер мен жеке бөлшектердің беттерінде шайыр шөгінділерінің пайда болуына кедергі келтіреді. Бұл май қоспаларының түрі ретінде негізінен сукцинимидтер мен полярлығы қарама-қарсы топтары бар полимерлер қолданылады. Дисперсанттарды қолдану ластанулар мен тотығу өнімдерінің коллоидты бөлшектерін суспензия күйінде ұстап тұруға мүмкіндік береді [1]. Негізінен, осы типтегі қоспалардың арқасында сөндірілген қозғалтқыштың тазалығы сақталады.

Детергенттер айқын жуғыш қасиеттерімен ерекшеленеді, оларды қолдану арқылы бөлшектер мен механизмдердің беті тотығу өнімдерінен қорғалады. Анионды детергенттер қатарына негізінен майда оңай еритін алкилбензолсульфонаттар, фосфонаттар және осы сияқты басқа да қосылыстар жатады [15]. Олардың барлығының айқын сілтілік қасиеттері бар және тотығу өнімдерін бейтараптандыру процестерінде өте тиімді.

Бұл ғылыми зерттеу барысында форсирленген автомобиль дизельді қозғалтқышының жұмысқа қабілеттілігін сипаттайтын бірқатар параметрлердің май құю көлеміне тәуелділік сипатын көрсететін нәтижелер алынды.

Сондай-ақ, майлау жүйесіндегі май көлемін басқару процесінің негізгі элементі болып табылатын қозғалтқыштың май деңгейін реттегіштің конструктивтік схемасы мен жұмыс істеу принципі ұсынылды.

Осылайша, бұл жұмыстың нәтижелерін форсирленген автомобиль дизельді қозғалтқыштарының жұмысқа қабілеттілігін майлау жүйесіндегі май көлемін басқаруды жетілдіру арқылы арттырудың жалпы принциптерін зерттеуге бағытталған бірқатар зерттеулердің нәтижелерімен және қорытындыларымен салыстыру олардың ғылыми зерттеудің бірқатар негізгі параметрлері бойынша сәйкестігін көрсетеді.

Қорытынды

Осы ғылыми зерттеуді орындау барысында форсирленген автомобиль

қозғалтқышының картеріндегі майдың қажетті деңгейін ұстап тұрған жағдайда, қозғалтқыш бөлшектерінің қажетті температуралық режимі қамтамасыз етілетіні анықталды. Бұдан басқа, үйкелетін бөлшектерден тозу өнімдерінің шығарылуы және майдағы қоспалардың жиынтығын қолдану арқылы оңтайлы майлау жағдайлары қамтамасыз етіледі.

Форсирленген автомобиль қозғалтқышын пайдалану барысында ағып кету және "жанып кету" салдарынан картердегі май көлемі біртіндеп азаяды, сонымен қатар майдың ескіруіне байланысты оның қасиеттері өзгереді. Бұл майлау жүйесінің функционалдық жағдайында көптеген проблемаларға, май температурасының біртіндеп артуына, сондай-ақ қалыпты майлау режимінің бұзылуына және қозғалтқыш бөлшектерінің тозуының жеделдеуіне әкеледі.

Жүргізілген эксперименттік зерттеу автомобиль дизельді қозғалтқышының майлау жүйесіне бір реттік құйылған отын көлемі мен оның жұмысқа қабілеттілігін сипаттайтын бірқатар параметрлер арасындағы тәуелділіктің бар екенін анық көрсетеді. Мұндай параметрлерге келесілер жатады: жазда және қыста қозғалтқыш картеріндегі май температурасы; қозғалтқыштың майлау жүйесіндегі май қысымының төмендеу шамасы мен сипаты; қозғалтқышты пайдаланудың үш жылы ішінде майдың "жанып кетуге" кететін шығынының артуы; майдың тұтқырлығы мен сілтілігі параметрлерінің төмендеу қарқындылығы. Бұл, май деңгейін басқарудың негізгі элементі ретінде, автомобиль дизельді қозғалтқышының картеріндегі май деңгейін реттегішті практикалық қолданудың орындылығын негіздейді.

Зерттеу нәтижелерін практикалық қолданудың экономикалық тиімділігінің қорытынды бағасын қалыптастыру, іс жүзінде бар және жоспарланған оңтайлы май құю режимдерінде дизельді автомобиль қозғалтқышының майлау жүйесінің жұмыс қабілеттілігін сақтауға кететін шығындар көлемін салыстыруды қарастырды. Жүргізілген эксперимент барысында майды әр 2000 км жүріс сайын құю экономикалық тұрғыдан тиімсіз екендігі анықталды, өйткені бұл жағдайда меншікті орташа шығындар көлемі ұсынылған май құю жиілігіне қарағанда 1,48 есе жоғары болады.

Форсирленген, автомобильдік, дизельді қозғалтқыштардың жұмысқа қабілеттілігін арттыру мүмкіндіктерін іздеу саласындағы одан арғы ғылыми зерттеулердің перспективалары Қазақстан Республикасының көлік кәсіпорындарын елеулі ресурсқа ие және техникалық қызмет көрсетуі сенімді сапалы техникамен қамтамасыз ету мәселелерін шешу қажеттілігімен негізделеді.

Авторлардың қосқан үлесі.

А.М. Табинбаев - мәтін жазу және мақаланың рәсімделуіне елеулі үлесін қосты; зерттеу нәтижелерін жинау, талдау жұмыстарын жасады;

К.К. Джолдасова - мақаланың тұжырымдамасына және жариялау үшін мақаланың соңғы нұсқасын бекітуде елеулі үлесін қосты;

А.М. Биниязов - зерттеу нәтижелерін жинау, талдау жұмыстарында елеулі үлесін қосты;

А.С. Денисов - зерттеу нәтижелерін жинау, талдау жұмыстарында елеулі үлесін қосты;

Әдебиеттер тізімі

1. Биниязов, А.М., Денисов, А.С., Повышение эффективности эксплуатации форсированных автомобильных дизельных двигателей совершенствованием управления объёмом масла в смазочной системе [Текст] // Қазақстан ғылымы мен техникасы. – 2022. - №. 4. -127-138 б.
2. Зарипов Р. Ю., Муканов Р. Б., Миллер С. А., Садыков А. А., Гаврилов П., Автомобиль негізінде гибриді энергетикалық қондырғы тұжырымдамасын әзірлеу [Текст] //

Қазақстан ғылымы мен техникасы. – 2023. - №. 1. -130-140 б.

3. Boldaji, M.T., Ebrahimzadeh, R., Kheiralipour, K., Borghei, A.M., 2021, Effect of some BED blends on the equivalence ratio, exhaust oxygen fraction and water and oil temperature of a diesel engine, *Biomass and Bioenergy*, Volume 35, Issue 10, pp. 4099-4106. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096195341100198X>
4. Chauhan, B.S., Kumar, N., Jun, Y.D., Lee, K.B., 2020. Performance and emission study of preheated Jatropha oil on medium capacity diesel engine, *Energy*, Volume 35, Issue 6, pp. 2484-2492. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544210001076>
5. Mariappan, M., Panithasan, M.S., Venkadesan, G., 2021, Pyrolysis plastic oil production and optimisation followed by maximum possible replacement of diesel with bio-oil/methanol blends in a CRDI engine, *Journal of Cleaner Production*, Volume 312, 127687. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621019053>
6. Oqut, H., Oquz, H., Aydin, F., Ciniviz, M., Deveci, H., 2019, The investigation of the use of plant-based wild mustard and boron doped oil as engine lubrication oil in diesel engines, *Renewable Energy*, Volume 136, pp. 79-83. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148118315714>
7. Patel, J., Sani, A., Barai, D.P., Bhanvase, B.A., 2023, A minireview on nanofluids for automotive applications: Current status and future perspectives, *Applied Thermal Engineering*, Volume 219, Part A, 119428. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431122013588>
8. Phya, M.Z.M., Wai, P., Thin, M.H., Oh, B.-S., Phairate, W., Srilomsak, M., Charoenphonphanich, C., Masomtob, M., Srimanosaowapak, S., Kosaka, H., Karin, P., 2023, Experimental investigation of metallic partial-flow particulate filter on a diesel engine's combustion pressure and particle emission, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 49, 103188. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X2300494X>
9. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X2300494X>
10. Prasad, G.A., Murugan, P.C., Wincy, W.B., Sekhar, S.J., 2021, Response Surface Methodology to predict the performance and emission characteristics of gas-diesel engine working on producer gases of non-uniform calorific values, *Energy*, Volume 234, 121225. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221014730>
11. Praveena, V., Bai, F. J., Balasubramanian, D., Devarajan, Y., Aloui, F., Varuvel, E.G., 2023, Experimental assessment on the performance, emission and combustion characteristics of a safflower oil fueled CI engine with hydrogen gas enrichment, *Fuel*, Volume 334, Part 2, 126682. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236122035062>
12. Ramasubramanian, S., Kumar, S.S., Karikalan, L., Baskar, S., 2021, Performances emissions behaviors of Compression ignition engine by mahua oil, *Materialstoday: proceeding*, Volume 37, Part 2, pp. 982-985. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320346411>
13. Rao, X., Sheng, C., Guo, Z., Dai, L., Yuan, C., 2023, A novel finding on tribological, emission, and vibration performances of diesel engines linking to graphene-attapulgite lubricants additives under hot engine tests, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 182, 113366. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403212300223X>
14. Sarabish, R., Kumar, M.P., Rajasekar, R., 2022, Experimental investigation on direct injection diesel engine fuelled by JFO with nano additives, *MaterialsToday: proceeding*, Volume 62, Part 4, pp. 1821-1829. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321082006>
15. Senthilraja, R., Sivakumar, V., Thirugnanasambandham, K., Nedunchezian, N., 2016,

- Performance, emission and combustion characteristics of a dual fuel engine with Diesel–Ethanol – Cotton seed oil Methyl ester blends and Compressed Natural Gas (CNG) as fuel, *Energy*, Volume 112, pp. 899-907. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421630888X>
16. Singh, G., Sharma, S., Sinhg, J., Kumar, S., Singh, Y., Ahmadi, M.H., Issakhov, A., 2021, Optimization of performance, combustion and emission characteristics of acetylene aspirated diesel engine with oxygenated fuels: An Experimental approach, *Energy Reports*, Volume 7, pp. 1857-1874. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721001918>
17. Sujesh, G., Ramesh, S., 2018, Modeling and control of diesel engines: A systematic review, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 57, Issue 4, pp. 4033-4048. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016818301984>
18. Tabatabaev, M., Hasseinzadeh-Bandbaphia, H., Kumar, D., Singh, B., Shanbeig, H., Lam, S.S., Aghbashia, M., 2022, Biodiesel antioxidants and their impact on the behavior of diesel engines: A comprehensive review, *Fuel Processing Technology*, Volume 232, 107264. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382022001047>
19. Xin, Q., 2013, 10 - Friction and lubrication in diesel engine system design, *Diesel Engine System Design*, pp. 651-758. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781845697150500108>
20. Yesilyurt, M.K., Aydin, M., Yilbasi, Z., Arsian, M., 2020, Investigation on the structural effects of the addition of alcohols having various chain lengths into the vegetable oil-biodiesel-diesel fuel blends: An attempt for improving the performance, combustion, and exhaust emission characteristics of a compression ignition engine, *Fuel*, Volume 269, 117455. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120304506>
21. Zhardemov, B., Kanatbayev, T., Abzaliyeva, T., Koilybayev, B., Nazarbekova, Z., 2021, Justification of location of LNG infrastructure for dual-fuel locomotives on the railway network in Kazakhstan, *Procedia Computer Science*, Volume 149, pp. 548-558. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919301838>

А.М. Табинбаев^{*1}, К.К. Джолдасова¹, А.М. Биниязов², А.С. Денисов³

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

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

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

Повышение производительности форсированных дизельных двигателей за счет улучшения управления объемом масла в системе смазки

Аннотация. Актуальность данной научно-исследовательской работы обосновывается необходимостью поиска дополнительных возможностей для повышения эффективности использования форсированных двигателей на автомобилях и снижения текущих затрат на их ремонт. Цель исследования — оценить общие принципы и закономерности влияния уровня масла в двигателе на процессы старения масла и изменение технического состояния дизельного двигателя. В ходе исследования была проведена экспериментальная оценка характера изменения параметров моторного масла в процессе эксплуатации автомобильного двигателя. В

результате получены данные, отражающие характер зависимости различных параметров, характеризующих работоспособность форсированного автомобильного дизельного двигателя, от величины заправочной емкости. Также был установлен характер зависимости объема затрат на повышение работоспособности форсированного автомобильного дизельного двигателя от частоты заправки масла в процессе эксплуатации. Кроме того, дано описание принципа работы и предложена конструктивная схема регулятора уровня масла в картере двигателя. Полученные результаты показывают необходимость пересмотра принятой в настоящее время периодичности заправки масла в картер автомобильного дизельного двигателя, предусматривающей заправку каждые 2000 км. В этом случае удельные затраты на эксплуатацию двигателя высоки и экономически невыгодны. Практическая значимость результатов заключается в возможности изменения объема масла в системе смазки при техническом обслуживании автотранспортной техники, а также в случае необходимости капитального ремонта или форсирования дизельных двигателей.

Ключевые слова: транспортные предприятия, капитальный ремонт, техническое обслуживание, запасные части, конструктивные параметры, безаварийная эксплуатация.

A.M. Tabinbayev^{1*}, K.K. Dzholdasova¹, A.M. Biniyazov², A.S. Denisov³

¹ Satbayev University, Almaty city, Republic of Kazakhstan

² West Kazakhstan Innovation and Technology University, Uralsk city, Republic of Kazakhstan

³ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov city, Russian Federation

Enhancing the performance of forced-induction diesel engines by improving oil volume management in the lubrication system

Abstract. The relevance of this research is based on the need to find additional ways to improve the efficiency of using forced-induction engines in vehicles and to reduce the ongoing costs of their maintenance. The research aims to evaluate the general principles and patterns of how oil level in the engine affects oil aging and changes in the technical condition of the diesel engine. The study included an experimental assessment of how motor oil parameters change during the operation of a car engine. The results provided data that shows how various parameters, which characterize the performance of a forced-induction automotive diesel engine, depend on the oil fill capacity. The study also determined how the cost of improving the performance of a forced-induction automotive diesel engine relates to the frequency of oil changes during its operation. Furthermore, the paper describes the operating principle and proposes a design for a regulator of the oil level in the engine crankcase. The findings indicate a need to reconsider the current practice of changing the oil in the crankcase of automotive diesel engines every 2000 km. This is because, under this schedule, the specific operating costs of the engine are high and economically inefficient. The practical significance of the results lies in the ability to change the oil volume in the lubrication system during vehicle maintenance, as well as when a major overhaul or forced induction of diesel engines is required.

Keywords: transport enterprises, major overhaul, maintenance, spare parts, design parameters, accident-free operation.

References

1. Biniyazov, A.M., Denisov, A.S., Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii forsirovannykh avtomobilnykh dizelnykh dvigatelei sovershenstvovaniem upravleniya obomom masla v smazochnoi sisteme [Increasing the efficiency of operation of forced diesel engines by improving the control of oil volume in the lubrication system] // *Qazaqstan ғылыми мен техникasy.* – 2022. - №. 4. -127-138 b.
2. Zaripov R. İu., Mukanov R. B., Miller S. A., Sadykov A. A., Gavrilov P., Avtomobil negızinde gibridtı energetikalyq qondyrğy tūjyrymdamasyn āzirleu [Development of the concept of a hybrid power plant based on a car] // *Qazaqstan ғылыми мен техникasy.* – 2023. - №. 1. -130-140 b.
3. Boldaji, M.T., Ebrahimzadeh, R., Kheiralipour, K., Borghei, A.M., 2021, Effect of some BED blends on the equivalence ratio, exhaust oxygen fraction and water and oil temperature of a diesel engine, *Biomass and Bioenergy*, Volume 35, Issue 10, pp. 4099-4106. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096195341100198X>
4. Chauhan, B.S., Kumar, N., Jun, Y.D., Lee, K.B., 2020. Performance and emission study of preheated Jatropha oil on medium capacity diesel engine, *Energy*, Volume 35, Issue 6, pp. 2484-2492. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544210001076>
5. Mariappan, M., Panithasan, M.S., Venkadesan, G., 2021, Pyrolysis plastic oil production and optimisation followed by maximum possible replacement of diesel with bio-oil/methanol blends in a CRDI engine, *Journal of Cleaner Production*, Volume 312, 127687. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621019053>
6. Oqut, H., Oquz, H., Aydin, F., Ciniviz, M., Deveci, H., 2019, The investigation of the use of plant-based wild mustard and boron doped oil as engine lubrication oil in diesel engines, *Renewable Energy*, Volume 136, pp. 79-83. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148118315714>
7. Patel, J., Sani, A., Barai, D.P., Bhanvase, B.A., 2023, A minireview on nanofluids for automotive applications: Current status and future perspectives, *Applied Thermal Engineering*, Volume 219, Part A, 119428. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431122013588>
8. Phya, M.Z.M., Wai, P., Thin, M.H., Oh, B-S., Phairate, W., Srilomsak, M., Charoenphonphanich, C., Masomtob, M., Srimanosaowapak, S., Kosaka, H., Karin, P., 2023, Experimental investigation of metallic partial-flow particulate filter on a diesel engine's combustion pressure and particle emission, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 49, 103188. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X2300494X>
9. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X2300494X>
10. Prasad, G.A., Murugan, P.C., Wincy, W.B., Sekhar, S.J., 2021, Response Surface Methodology to predict the performance and emission characteristics of gas-diesel engine working on producer gases of non-uniform calorific values, *Energy*, Volume 234, 121225. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221014730>
11. Praveena, V., Bai, F. J., Balasubramanian, D., Devarajan, Y., Aloui, F., Varuvel, E.G., 2023, Experimental assessment on the performance, emission and combustion characteristics of a safflower oil fueled CI engine with hydrogen gas enrichment, *Fuel*, Volume 334, Part 2, 126682. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236122035062>
12. Ramasubramanian, S., Kumar, S.S., Karikalan, L., Baskar, S., 2021, Performances emissions behaviors of Compression ignition engine by mahua oil, *Materialstoday: proceeding*, Volume 37,

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320346411>

13. Rao, X., Sheng, C., Guo, Z., Dai, L., Yuan, C., 2023, A novel finding on tribological, emission, and vibration performances of diesel engines linking to graphene-attapulgite lubricants additives under hot engine tests, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 182, 113366.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403212300223X>

14. Sarabish, R., Kumar, M.P., Rajasekar, R., 2022, Experimental investigation on direct injection diesel engine fuelled by JFO with nano additives, *MaterialsToday: proceeding*, Volume 62, Part 4, pp. 1821-1829. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321082006>

15. Senthilraja, R., Sivakumar, V., Thirugnanasambandham, K., Nedunchezian, N., 2016, Performance, emission and combustion characteristics of a dual fuel engine with Diesel-Ethanol – Cotton seed oil Methyl ester blends and Compressed Natural Gas (CNG) as fuel, *Energy*, Volume 112, pp. 899-907. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421630888X>

16. Singh, G., Sharma, S., Sinhg, J., Kumar, S., Singh, Y., Ahmadi, M.H., Issakhov, A., 2021, Optimization of performance, combustion and emission characteristics of acetylene aspirated diesel engine with oxygenated fuels: An Experimental approach, *Energy Reports*, Volume 7, pp. 1857-1874. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721001918>

17. Sujesh, G., Ramesh, S., 2018, Modeling and control of diesel engines: A systematic review, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 57, Issue 4, pp. 4033-4048. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016818301984>

18. Tabatabaev, M., Hasseinzadeh-Bandbaphia, H., Kumar, D., Singh, B., Shanbeig, H., Lam, S.S., Aghbashia, M., 2022, Biodiesel antioxidants and their impact on the behavior of diesel engines: A comprehensive review, *Fuel Processing Technology*, Volume 232, 107264. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382022001047>

19. Xin, Q., 2013, 10 - Friction and lubrication in diesel engine system design, *Diesel Engine System Design*, pp. 651-758.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781845697150500108>

20. Yesilyurt, M.K., Aydin, M., Yilbasi, Z., Arsian, M., 2020, Investigation on the structural effects of the addition of alcohols having various chain lengths into the vegetable oil-biodiesel-diesel fuel blends: An attempt for improving the performance, combustion, and exhaust emission characteristics of a compression ignition engine, *Fuel*, Volume 269, 117455. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120304506>

21. Zhardemov, B., Kanatbayev, T., Abzaliyeva, T., Koilybayev, B., Nazarbekova, Z., 2021, Justification of location of LNG infrastructure for dual-fuel locomotives on the railway network in Kazakhstan, *Procedia Computer Science*, Volume 149, pp. 548-558. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919301838>

Авторлар туралы мәлімет:

Табинбаев Аманжол Муратович, «технологиялық машиналар және көлік» кафедрасының «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» білім беру бағдарламасы бойынша докторант. Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қ.Сәтбаев көшесі, 22 үй, Алматы қаласы 410003 Қазақстан Республикасы. 8-700-217-46-10 Джолдасова Куралай Каирберлиновна, техника ғылымдарының кандидаты, «технологиялық машиналар және көлік» кафедрасының қауымдастырылған профессоры.

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қ. Сәтбаев көшесі, 22 үй, Алматы қаласы, 410003, Қазақстан Республикасы. 8-701-372-11-90

Биниязов Абзал Махсотович, философия докторы (PhD), «көлік және технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры. Батыс Қазақстан инновациялық технологиялық университеті, Орал, Ихсанов көшесі 44/1 үй, 090009, Қазақстан Республикасы, 8-775-300-64-62

Денисов Александр Сергеевич, техника ғылымдарының докторы, «тасымалдауды ұйымдастыру, жол қозғалысының қауіпсіздігі және автомобильдерге қызмет көрсету» кафедрасының профессоры. Ю.А. Гагарин атындағы Саратов мемлекеттік техникалық университеті, Саратов қаласы, Политехническая көшесі, 77 үй, 410003 Ресей Федерациясы. 8-960-357-06-70

Табинбаев Аманжол Муратович, докторант по образовательной программе «Транспорт, транспортная техника и технологии», кафедры «Технологические машины и транспорта». Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы 410003 Республика Казахстан.

Джолдасова Куралай Каирберлиновна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Технологические машины и транспорта».

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы 410003 Республика Казахстан.

Биниязов Абзал Махсотович, доктор философии (PhD), ассоциированный профессор кафедры «Транспорт и технологии», Западно Казахстанский инновационно-технологический университет, Уральск, 090009, Республика Казахстан

Денисов Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей». Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, г. Саратов 410003 Российская федерация.

Tabynbayev Amanzhol Muratovich, Doctoral Student in the educational program "Transport, Transport Equipment and Technologies", Department "Technological Machines and Transport". Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty 410003 Republic of Kazakhstan. Dzholdasova Kuralay Kairberlinovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technological Machines and Transport". Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, 410003, Republic of Kazakhstan.

Biniyazov Abzal Makhsotovich, Doctor of Philosophy (PhD), Associate Professor of the Department "Transport and Technologies", West Kazakhstan Innovation and Technology University, Uralsk, 090009, Republic of Kazakhstan

Denisov Alexander Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Organization of transportation, traffic safety and car service". Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov 410003 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/>).



ХҒТАР 73.41.25
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-235-246>

Экскаватор шөмішінің тістеріне түсетін жүктемені зерттеу

К.Г.Балабекова , А.Б.Забиева* , А.М. Арпабекова ,
О Абдирашев 

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

*E mail: balabekovakyrmyzy@gmail.com, aliya.zhakupovazabieva@mail.ru,
aيمانasholpana@mail.ru, abdirashev_ok@enu.kz*

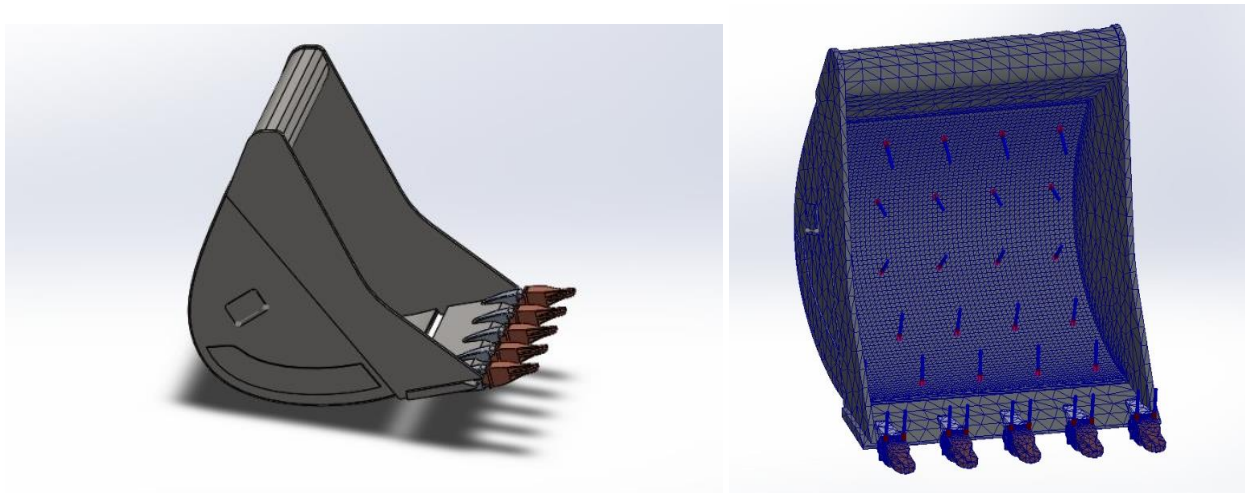
Аңдатпа. Мақалада экскаватор шөмішінің ұзын және қысқа тістерінің жұмыс тиімділігіне әсері қарастырылған. Патенттік шешімдерді талдау және SolidWorks Simulation бағдарламасында сандық модельдеу негізінде зерттелді. Зерттеудің өзектілігі әртүрлі топырақ түрлеріне бейімделген тіс ұзындығын дұрыс таңдаудың маңыздылығымен байланысты екенін көрсетті. Зерттеудің мақсаты – ұзын және қысқа тістердің беріктік сипаттамаларын, кернеу-деформация күйін және топыраққа ену қарсылығын салыстырмалы түрде бағалау болып табылады. Әдістеме ретінде қазуға қарсы кедергі күшін есептеуді, АҚШ, Еуропа, Қытай және Ресей патенттерін талдауды, 3D-модельдер құруды және SolidWorks бағдарламасында статикалық модельдеуді қамтыды. Сонымен қатар, есептеу жұмыстары жүргізілді. Негізгі нәтижелер көрсеткендей, ұзын тістер тығыз топырақтарға ену қабілетін арттырып, шөміште туындайтын шындық жүктемелерді азайтады, бірақ олардың түбінде кернеулер жоғары болады. Қысқа тістер кернеудің бірқалыпты таралуын қамтамасыз етеді және орташа немесе жұмсақ топырақта ұзақ қызмет етеді. Зерттеудің өзектілігі заманауи жер қазу машиналары әмбебап шешімдерді қажет ететін ауыспалы топырақ тығыздығы жағдайында жұмыс істейтіндігімен күшейтіледі. Тістердің ұзындығын оңтайландыру энергия шығынын азайтуға, өнімділікті арттыруға және жабдық ресурсын арттыруға мүмкіндік береді. Соған байланысты ұсыныстар жасалған.

Түйін сөздер: экскаватор, шөміш, экскаватор тістері, жүктеме, қазу ені, SolidWorks.

Кіріспе

Экскаватор шөміші (сурет 1) - жер жұмыстарын орындау кезіндегі негізгі жұмысты атқаратын құрал. Экскаваторлардың тістері жұмыс жабдықтарының ең көп жүктелген элементтерінің бірі болып табылады. Қазу процесінде олар айтарлықтай байланыс қысымын, иілу уақытын, абразивті тозуды және циклдік динамикалық жүктемелерді сезінеді. Тістің құрылымдық параметрлері - материалы, геометриясы, ұзындығы және шабуыл бұрышы - оның беріктік сипаттамалары мен қызмет ету мерзімін анықтайды.

Шөміш тістерінің ұзындығы ерекше маңызды, өйткені ол күш қолдану иығына және тіс адаптерінің ауысу аймағындағы кернеулердің сипатына тікелей байланысты. Тістердің әртүрлі түрлерін кеңінен қолдануға қарамастан, тіс ұзындықтарының әсері туралы мәселе жеткілікті терең зерттелмеген [1].



1-сурет. Экскаватор шөміші

Мақаланың мақсаты - бұл мақаланың мақсаты-әртүрлі ұзындықтағы экскаватор тістерінің кернеулі деформацияланған күйін зерттеу және тістің ұзындығының өзгеруі (қысқа және ұзартылған дизайн) кернеудің таралуына, деформация мөлшеріне және жұмыс жүктемелерінің жалпы тұрақтылығына қалай әсер ететінін анықтауға бағытталған салыстырмалы талдау жүргізу [2].

Дәстүрлі жұмыс органдарының функционалдық шектеулеріне қосымша талдау көрсеткендей, тістердің бекітілген ұзындығы оңтайлы енгізу бұрышын және өзгермелі даму жағдайында топырақпен байланыс өзара әрекеттесуінің тұрақтылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік бермейді. Нәтижесінде кесу күштерінің айтарлықтай ауытқуы байқалады, бұл қазу процесінің тұрақтылығының төмендеуіне және жұмыс циклінің сапасының нашарлауына әкеледі. Бұл әсіресе траекторияны болжауды және гидравликалық жетек жүктемесінің тұрақтылығын қажет ететін жоғары дәлдіктегі операцияларды орындау кезінде өте маңызды.

Топырақты бұзу механикасы саласындағы зерттеулер кесу құралының геометриялық бейімделуі экскавациялық процестердің энергия тиімділігін арттырудың ең тиімді әдістерінің бірі екенін растайды. Тістердің ұзындығының басқарылатын өзгеруі оңтайлы кесу тереңдігін сақтауға және жер асты ортасының паразиттік деформацияларын азайтуға

мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде нақты энергия шығынын азайтуға және шөміш құрылымындағы ең жоғары жүктемелерді азайтуға көмектеседі [2].

Әдіснама

Қазуға төзімділікті бағалау жер қазу жабдықтарын жобалаудың негізгі кезеңі болып табылады, өйткені дәл осы көрсеткіш экскаватордың қажетті қуатын, шелектің құрылымдық элементтерінің беріктігін және технологиялық процестің тиімділігін анықтайды. Қарсыласу күші Шелек тістері мен кесу жиегінің топырақ массасымен өзара әрекеттесуінен туындайды және оның мөлшері топырақтың физикалық-механикалық қасиеттеріне, енгізу жылдамдығына, тістердің пішініне, кесу бұрышына және батыру тереңдігіне байланысты.

Жалпы алғанда қазу кедергісін үш негізгі компонентке бөлуге болады [3]:

- Тістерді енгізу кезінде бөлшектердің жарылуы мен ығысуына байланысты топырақты кесу төзімділігі.

- Шөмішті топырақпен толтырған кезде пайда болатын шөміштің бүйір қабырғаларына әсер ететін үйкеліс.

- Әзірленетін материалды жеделдетуге байланысты инерциялық кедергі.

Есептеу үшін түрдің жалпыланған формуласы қолданылады [3]:

$$F = C \cdot b \cdot h + \mu \cdot G + F_{in}$$

мұнда:

C -топырақты кесуге меншікті қарсылығы, Н/см²;

b -кесу жиегінің ені немесе тістердің жалпы ені, см;

h - тереңдігі, см;

μ - шелек қабырғаларына әсер ететін топырақтың үйкеліс коэффициенті;

G - шелектегі топырақтың салмағы;

F_{in} - инерциялық компонент.

Топырақ түрі: тығыз ылғалды топырақ (орташа қаттылық).

Кесуге меншікті қарсылық: $k_p = 180 \dots 240 \text{ кН/м}^2$ - 200 кН/м^2 деп қабылдаймыз.

Топырақтың меншікті салмағы: $\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$.

Металдың топыраққа үйкелу коэффициенті $\mu = 0,55$

Топырақты кесудің күштік есептемесі:

$$R_{kesu} = k_p \cdot A,$$

Кесу ауданы:

$$A = b \cdot h = 1,1 \cdot 0,20 = 0,22 \text{ м}^2.$$

$$R_{kesu} = 200 \cdot 0,22 = 44 \text{ кН}.$$

Кесу күші: 44 кН.

Шөміш қабырғаларына үйкеліс күшін есептеу:
Топырақтың щөміштегі салмағы:

$$G = \gamma \cdot V = 18 \text{ кН.}$$

Үйкелу:

$$R_u = \mu \cdot G = 9,9 \text{ кН}$$

Үйкелу күші 10 кН.

Жерді тереңдету және жинау кезіндегі инерциялық күш. Инерциялық компонент топырақ массасының үдеуі:

$$F_{in} = m \cdot a$$

басып алу аймағындағы топырақ массасы: $m=600...800$ кг, $m=700$ кг аламыз
қазу кезінде тістердің орташа үдеуі: $a=1,2 \text{ м/с}^2$

$$F_{in} = 0,7 \cdot 1,2 \cdot 10^3 = 0,84 \text{ кН.}$$

Инерциялық күш: 0,8-1,0 кН.
Толық қарсылық күші:

$$R_{ж} = 55 \text{ кН.}$$

Тісті 120 мм созсақ.

$$A' = b \cdot h' = 1,1 \cdot 0,14 = 0,154 \text{ м}^2.$$

$$R'_{kesu} = 200 \cdot 0,154 = 30,8 \text{ кН.}$$

$$\epsilon = \frac{44 - 30,8}{44} \cdot 100\% = 29,9\%$$

Талдау Solidworks бағдарламасында соңғы - элементер әдісімен (СЭӘ) әдісімен жүзеге асырылады. Бірдей қимасы бар, бірақ ұзындығы әртүрлі екі-үш өлшемді тіс моделі жасалды:

Қысқа тіс - 120 мм;

Ұзын тіс – 180 мм.

Екі модель үшін бірдей жүктеме шарттары берілген:

Тістің ұшына қолданылатын 35-45 кН жұмыс күші;

Орнату аймағында қатты бекіту;

Материал-жоғары беріктігі бар болат ($\sigma = 1500$ МПа, $E = 210$ ГПа).

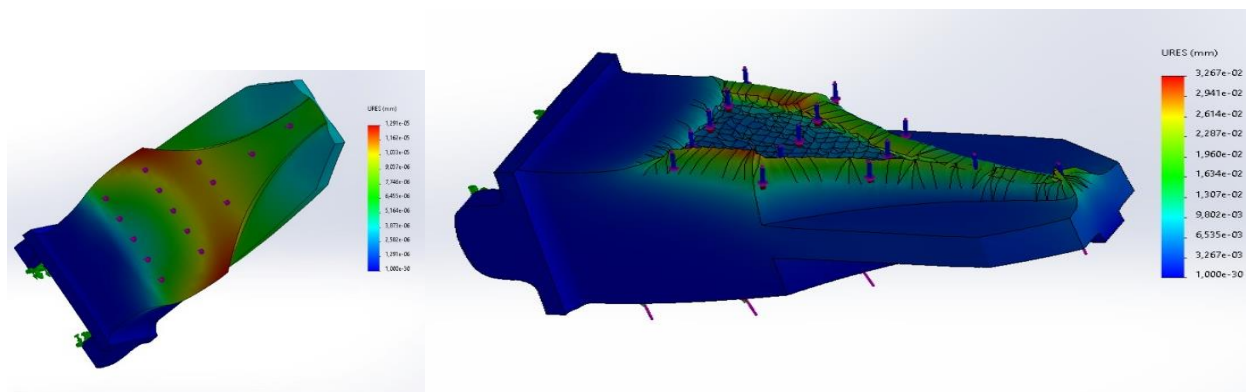
Мизес формуласы бойынша максималды эквивалентті кернеулерді, ауытқуларды және кернеу шоғырлану аймақтарын бағалай отырып, статикалық жүктемеге жүргізілді (сурет 2).

Нәтижелер мен талқылау

1. Кернеудің таралуы

Ұзын тіс - Иілу бұрыштарының тіктігі аз, кернеудің біркелкі таралуы. Максималды кернеу қысқа тіспен салыстырғанда 10-15%-ға жоғарылайды, бұл үлкен иілу моментіне байланысты. Кернеу концентрациясының аймақтары негізге жақындайды.

Қысқа тіс - Қаттылық жоғары, деформация аз. Максималды кернеулер төмен, бірақ ұшындағы байланыс жүктемелері жоғары. Жергілікті кернеудің жоғарылауы мұрынға жақын жерде пайда болады.



2-сурет. Жүктелген тістер

2. Иілу және деформация

Ұзын тістің иілісі 30-40% - ға артады. Бұл қазу дәлдігінің төмендеуіне әкеледі, бірақ соққы жүктемелерін азайту қабілетін арттырады.

Қысқа тіс аз деформацияланады, сондықтан жұмыс органының тұрақты және болжамды әрекетін қамтамасыз етеді.

Шөміштің құрылымын зерттеу барысында келесі патенттік шешімдер қарастырылды: US 4,238,896; US 4,052,803; EP 2644786 A3; US 10,066,371 B2; RU 2107779 C1; RU 2048255 C1; CN 105484313 A; EP 2235269 B1; US 3,238,646 A; CN 111411657 B; CN 210946949 U; CN 103603386 B; CN 114482159 A; US 5,692,855 B1; US 5,332,353.

Аталған патенттерді талдау нәтижесінде экскаватор шөміштері мен олардың тіс жүйелерін жетілдіруге бағытталған бірнеше репрезентативті инженерлік шешімдер анықталды. Олардың ішінде:

Ауыстырылатын және қайтымды кесу жиектері – жұмыс органының ресурсын арттыруға мүмкіндік береді (US 4,238,896; US 4,052,803);

Модульдік тозуға төзімді сегменттер – құрылымды жұмыс жағдайларына икемді бейімдеуді қамтамасыз етеді (EP 2644786 A3; US 10,066,371 B2);

Шөміш пішінін алгоритмдік оңтайландыру – топырақпен өзара әрекеттесу тиімділігін арттырудың перспективалы бағыты (CN 111411657 B);

Жылдам ауыспалы қосылу механизмдері – техникалық қызмет көрсетуді жеделдетеді және құралды ауыстыру уақытын азайтады (CN 210946949 U; US 5,692,855 B1; US 5,332,353);

Интеллектуалды басқару жүйелері – нақты уақыттағы жұмыс процесін бейімдеу мүмкіндігін ашады (CN 114482159 A). Жүргізілген салыстырмалы талдау көрсеткендей, тозуға төзімділік, модульдік құрылым және қызмет көрсетудің технологиялылығы бағыттарында айтарлықтай прогресс болғанымен, топырақтың өзгермелі сипаттамаларына бейімделетін адаптивті геометриялық шешімдер жеткілікті дамымаған. Бұл экскаватордың жұмыс тиімділігін арттыру үшін тістердің геометриясын өзгерту қағидатына негізделген жаңа тәсілдерді қажет ететінін көрсетеді.

Осыған байланысты зерттеу жұмысы екі түрлі тіс конфигурациясын — қысқа және ұзын тістерді — салыстырмалы талдауға бағытталды. Бұл тістердің әрқайсысы топырақтың әртүрлі түрлерінде және қазу режимдерінде ерекшеленетін артықшылықтарға ие болуы мүмкін. Патенттік материалдарды талдау нәтижелері шөміштің жұмыс процесін оңтайландыру үшін тіс геометриясын дұрыс таңдаудың маңыздылығын растады.

Пайдаланылған патенттердің қысқаша мазмұны мен техникалық сипаттамалары 1-кестеде келтірілген

1-Кесте. Патенттерді зерттеу кестесі

№	Патент нөмері	Негізгі шешім	Артықшылықтары	Шектеулер
1 – 4	US 4,238,896; US 4,052,803; EP 2644786; US 10,066,371	Тозуға төзімді және ауыстырылатын кескіш жиектер	Төзімділік, тұрақтылық	Жиектің пішіні мен жұмысы реттелмейді
5 – 7	RU 2107779; RU 2048255; CN 105484313	Жақсартылған тістер мен бекіткіштер	Жеңіл кіру	Шөміштің жерге бейімделуіне әсер етпейді, Жоғары күрделілік
9	US 3,238,646	Дірілдейтін пышақ	Кіріс кедергісін азайту	Шектеулі қолдану мүмкіндігі
10	CN 111411657	Шөміш пішінін оңтайландыру	Тиімділікті арттыру	Жұмыс кезінде бекітілген пішін
11,14, 15	CN210946949U; US5692855; US5332353	Қосылымдарды жылдам өзгерту	Орнату уақытын қысқарту	Қазу үрдісіне әсер етпейді
12 – 13	CN103603386B; CN114482159A	Жұмысты интеллектуалды басқару	Үрдісті автоматтандыру	Басқарылатын шөміш жоқ

Қолданыстағы шешімдер шөміш элементтерін жақсартады, бірақ қазу процесінде жұмыс геометриясын өзгертуге мүмкіндік бермейді.

Патенттік көздерді қосымша салыстырмалы талдау қолданыстағы құрылымдық шешімдердің көп бөлігі жұмыс органының жекелеген элементтерінің сипаттамаларын жергілікті арттыруға бағытталғанын көрсетеді, бірақ ол негізгі проблеманы — жұмыс процесінде жұмыс геометриясын белсенді түрде өзгерту мүмкіндігін қозғамайды. Сегменттелген және ауыстырылатын кесу жиектері жабдықтың беріктігін арттырса да, ауыспалы қазу жағдайларында енгізу тереңдігі мен шабуыл бұрышының бейімделуін қамтамасыз етпейді. Модульдік тозуға төзімді жүйелер де негізінен пассивті болып қалады және конфигурацияны өзгерту үшін оператордың немесе қызмет көрсету персоналының қатысуын талап етеді [9].

Алгоритмдік оңтайландырылған шөміш конструкцияларын талдау (CN 111411657B) цифрлық дизайнның перспективасын растайды, бірақ бұл шешімдерде де құрал геометриясы өндірістен кейін тұрақты болып қалады. Осылайша, математикалық оңтайландыру дизайнның бастапқы кезеңіне ғана әсер етеді, бірақ нақты уақыттағы параметрлердің өзгергіштігін қамтамасыз етпейді. Жылдам ауыспалы байланыс механизмдері (CN210946949U; US5692855 B1; US5332353), технологиялылығына қарамастан, негізінен қазу процесін бейімдеу емес, қызмет көрсету уақытын қысқарту мәселесін шешеді.

Интеллектуалды басқару жүйелері (CN114482159A) ерекше назар аударатын жүктеме параметрлерін, тербелістерді немесе топырақ сипаттамаларын талдау қолданылады. Бұл әзірлемелер сенсорлық технологиялар мен автоматты реттеу алгоритмдерін біріктіру әлеуетін көрсетеді. Алайда, қолданыстағы патенттерде басқару негізінен экскаватордың жалпы жұмыс режимдеріне — жылдамдыққа, қуатқа, жебе қозғалысының траекториясына бағытталған және шөміштің геометриясын атқарушы буын ретінде өзгертуді қарастырмайды.

Патенттік талдаудың нәтижелерін қорытындылай келе, әлемдік тәжірибеде бірыңғай жүйеде келесі негізгі функцияларды біріктіретін шешімдер жоқ деп қорытынды жасауға болады:

1. Нақты уақыт режимінде өзгертуге қабілетті кескіш құралдың адаптивті геометриясы;
2. Топырақ қасиеттерін талдау негізінде тіс сегментінің орнын автоматтандырылған басқару;
3. Қолданыстағы экскаватор шөміштерінің конструкцияларымен құрылымдық үйлесімділік;
4. Біркелкі тозуды қамтамасыз ету және кесу күштерін оңтайландыру мүмкіндігі.

Осылайша, жылжымалы тіс сегменті бар басқарылатын шөміштің дамуы тікелей аналогтары ғана емес, сонымен қатар статикалық құрылымдар мен интеллектуалды басқару жүйелері арасындағы маңызды технологиялық алшақтықты жабады. Ұсынылған шешім жоғары ғылыми және практикалық маңыздылыққа ие, өйткені ол жабдықтың тиімділігін, энергия үнемділігін және ұзақ мерзімділігін арттыра отырып, жұмыс процесінің параметрлерін дербес реттей алатын адаптивті жер қазу машиналарының жаңа буынына көшудің алғышарттарын жасайды.

Тығыз сазды және тасты топырақтар меншікті қарсылықтың жоғары мәндерімен сипатталады, сондықтан жалпы қарсылық күші құмды немесе құмды сазды негіздермен

салыстырғанда 2-4 есе артуы мүмкін. Тістердің шабуыл бұрышы да айтарлықтай әсер етеді: оңтайлы 25-35° бұрышта енгізу күші төмендейді және массивтің жойылу тиімділігі артады.

Маңызды ерекшелігі шөміш толған сайын қарсылық күші артады. Бастапқы кезеңде кесу күші басым болады, ал соңғы кезеңде топырақтың шөміш бетіне үйкелісі басым болады. Сондықтан инъекция бұрышын өзгертуге немесе тістердің ұзындығын реттеуге мүмкіндік беретін конструктивті шешімдер ең жоғары жүктемелерді айтарлықтай азайтады және машинаның өнімділігін арттырады.

Жүргізілген есептеулер көрсеткендей, тартылатын тіс сегментін қолдану кесу тереңдігін оңтайландыру және үйкеліс шығындарын азайту арқылы қазуға төзімділіктің максималды күшін 12-18% төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл басқарылатын шөміштердің жоғары тиімділігін және олардың ауыр топырақ жағдайында жұмыс істеудегі маңызды артықшылықтарын растайды.

Тістердің ұзындығы қалай реттелетіні 2-ші кестеде толық көрсетіліп зерттелген.

2-Кесте. Тістердің орналасуы

Жағдайы	Тістердің орналасуы	оңтайлы	Қорытынды
Жұмсақ немесе борпылдақ топырақ (құм, қара топырақ)	Тістер қысқарады		Қазуға төзімділік төмендейді, шелекті толтыру жылдамдығы артады
Қатты немесе мұздатылған топырақ, саз	Тістер ұзартылған		Кесу жиегінің ену қабілеті артады, топырақтың бұзылуы жақсарады
Байланыс (кабельдер, құбырлар) туралы жұмыс	Тістер минималды түрде шығады		Жер астындағы объектілердің зақымдану қаупі азаяды
Карьер және тау жыныстары	Динамикалық реттеу		Күш-жігерді оңтайландыру және тіс пен жетектің тозуын азайту

Реттелетін құрылыстың артықшылықтары:

- әмбебаптық: бір шөміш әртүрлі топырақтарға арналған шөміштердің бірнеше түрін ауыстырады.

- қазу кедергісін азайту арқылы энергия шығыны мен отынды азайту.

- тістердің қызмет ету мерзімін ұзарту-олар оңтайлы режимде жұмыс істейді.

- жұмыс барысында нақты жағдайларға бейімделу мүмкіндігі.

Қорытынды

Талдау барысында экскаватор шөміштерінің дәстүрлі конструкцияларының топырақтың әртүрлі физика-механикалық қасиеттеріне бейімделу мүмкіндігі шектеулі екендігі анықталды. Бұл даму тиімділігінің төмендеуіне, энергия шығындарының артуына және жұмыс құралдарының тозуының артуына әкеледі. Жылжымалы тіс сегменті бар басқарылатын шөміш тұжырымдамасы жұмыс барысында кесу жиегінің геометриясын өзгерту арқылы осы кемшіліктердің бірқатарын жоюға мүмкіндік береді.

Техникалық негіздеме көрсеткендей, тістердің жылжымалы сегментінің болуы тығыз және қабатты топырақтармен жұмыс істеу кезінде деструктивті қабілеттің жоғарылауын қамтамасыз етеді, сонымен қатар жұмсақ жыныстарға ауысқан кезде кесуге төзімділікті төмендетеді. Басқарылатын механизм тістердің оңтайлы орналасуына мүмкіндік береді, бұл дамудың дәлдігін жақсартады және шөміштің қажетсіз бағытта тереңдеуін азайтады.

Гидравликалық немесе электромеханикалық жетекті қолдану дизайнды әмбебап етеді және қолданыстағы экскаватор модельдеріне біріктіруге жарамды етеді. Есептеу нәтижелері жер жұмыстарының өнімділігін арттыру және жұмыс органдарын жөндеу шығындарының төмендеуі инновациялық құрылымды енгізудің жылдам өтелуін қамтамасыз ететіндігін растайды. Қосымша артықшылығы - жүктемелердің біркелкі таралуына байланысты тістердің қызмет ету мерзімін ұзартады. Осылайша, жылжымалы тіс сегменті бар басқарылатын шөміш жасау техникалық тұрғыдан орынды, функционалды түрде негізделген және үнемді. Бұл дизайнды енгізу жер жұмыстарының тиімділігін едәуір арттыруға, отын шығынын азайтуға, топырақты игеру уақытын қысқартуға және экскаватор жабдықтарының әртүрлі пайдалану жағдайларына жоғары бейімделуін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Авторлардың қосқан үлесі:

А.М.Арпабекова - мәліметтер жинау, зерттеу жүргізу, жазу.

К.Г.Балабекова - зерттеу нәтижелерін талдау

А.Б.Забиева – Solidworks-та зерттеу.

О. Абдирашев- синтездеу, мақаланы түзету.

Әдебиттер тізімі

1. Н.А.Кузнецов, Строительные машины и оборудование.-Мәскеу: Академия, 2021. -384б.
2. И.П. Бойко, Экскаваторы: конструкция, эксплуатация и обслуживание. — Санкт-Петербург: Питер, 2020- 296 б.
3. А.В.Сергеев, Землеройные машины: учебник для вузов: жоғары оқу орындарына арналған оқулық. - Мәскеу: Машина Жасау, 2019- 448 б.
4. В.Е.Левченко, Строительные и дорожные машины- Ростов-на-Дону: Феникс, 2022-360б.
5. С.В.Жирнов, Техническая эксплуатация строительных машин. - Мәскеу: Юрайт, 2020. - 410 б.
6. К.И.Попов, Экскаваторы и их рабочие органы. -Екатеринбург: УрФУ, 2018- 280 б.
7. М.Л.Голдштейн, Механизация земляных работ. -Новосибирск: Шибак, 2021-230 б.
8. ГОСТ 30000-2013. . Машины землеройные. Требования безопасности.
9. ISO 6016:2008. Earth-Moving Machinery - Methods of Measuring the Masses of Whole Machines.
10. Caterpillar. Excavator Bucket Specifications. - Technical Manual, 2020.
11. Komatsu. Hydraulic Excavator Technical Handbook. - Komatsu Ltd., 2021.
12. Hitachi Construction Machinery. Excavator Attachments and Bucket Guide- Hitachi Corp., 2022.
13. П.П.Солодовников, Расчёт и оптимизация ковшей экскаваторов // Машиностроение и техника. - 2023. -№ 2. - Б. 55-63.

14. Д.Н.Ахметов, Повышение эффективности работы экскаваторных ковшей // Вестник инженерии. – 2022- № 4. - 40-48 Б.

**К. Г.Балабекова, А. Б. Забиева*, А. М.Арпабекова
О. Абдирашев**

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

Исследование нагрузки на зубья ковша экскаватора

Аннотация. В статье рассматривается влияние длинных и коротких зубьев ковша экскаватора на эффективность работы. Исследованы на основе анализа патентных решений и численного моделирования в SolidWorks Simulation. Актуальность исследования показала, что это связано с важностью правильного выбора длины зуба, адаптированного к различным типам почвы. Целью исследования является сравнительная оценка прочностных характеристик длинных и коротких зубьев, состояния напряжения-деформации и сопротивления проникновению в почву. Методология включала расчет силы сопротивления копания, анализ патентов США, Европы, Китая и России, создание 3D-моделей и статическое моделирование в SolidWorks. Кроме того, были проведены расчетные работы. Основные результаты показывают, что длинные зубы увеличивают способность проникать в плотные почвы и уменьшают пиковые нагрузки, возникающие в ковше, но имеют более высокие напряжения на дне. Короткие зубцы обеспечивают равномерное распределение напряжения и служат дольше на средней или мягкой почве. Актуальность исследования усиливается тем, что современные землеройные машины работают в условиях переменной плотности почвы, требующих универсальных решений. Оптимизация длины зубьев позволяет снизить энергозатраты, повысить производительность и увеличить ресурс оборудования. В связи с этим были сделаны рекомендации.

Ключевые слова: экскаватор, ковш, зубья экскаватора, нагрузка, ширина копания, SolidWorks.

K. G. Balabekova, A. B. Zabieva*, A.M.Arpabekova, O.Abdirashev

Eurasian National University named after L.N.Gumilov, Astana, Kazakhstan.

Study of the load on the teeth of the excavator bucket

Abstract. The article discusses the influence of the long and short teeth of the excavator bucket on the efficiency of work. It was studied based on the analysis of patent solutions and numerical modeling in SolidWorks Simulation. The relevance of the study has shown that it is associated with the importance of choosing the right tooth length, adapted to different types of soil. The purpose of the study is a comparative assessment of the strength characteristics of long and short teeth, the state of stress – deformation and resistance to penetration into the soil. As a methodology, it included the calculation of the anti-excavation resistance force, the analysis of patents from the United States, Europe, China and Russia, the creation of 3D models and static modeling in

SolidWorks. In addition, the calculation was carried out. The main results showed that long teeth can increase their ability to penetrate dense soils, reducing the peak loads that arise in the scoop, but their bottom stresses are higher. Short teeth provide a smooth distribution of tension and last longer on medium or soft soil. The relevance of the study is reinforced by the fact that modern earthmoving machines operate in conditions of variable soil density, which requires universal solutions. Optimizing the length of the teeth allows you to reduce energy consumption, increase productivity and increase the resource of equipment. In this regard, recommendations have been made.

Keywords: excavator, bucket, excavator teeth, load, digging width, SolidWorks.

References

1. N.A. Kuznetsov, *Stroitel'nye mashiny i oborudovanie*. – Moskva: Akademiya, 2021. - 384 s.
2. I.P. Boiko, *Ekskavatory: konstruktsiya, ekspluatatsiya i obsluzhivanie*. — Sankt-Peterburg: Piter, 2020. — 296 s.
3. A.V. Sergeev, *Zemleroinye mashiny: uchebnik dlya vuzov: zhogary oku oryndaryna arnalgan oulyq*. – Moskva: Mashina Zhasau, 2019. — 448 s.
4. V.E. Levchenko, *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. — Rostov-na-Donu: Feniks, 2022. — 360 s.
5. S.V. Zhirnov, *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya stroitel'nykh mashin*. – Moskva: Yurait, 2020. – 410 s.
6. K.I. Popov, *Ekskavatory i ikh rabochie organy*. — Ekaterinburg: UrFU, 2018. — 280 s.
7. M.L. Goldshtein, *Mekhanizatsiya zemlyanykh rabot*. — Novosibirsk: Shibak, 2021. -230 s.
8. GOST 30000-2013. *Mashiny zemleroinye. Trebovaniya bezopasnosti*.
9. ISO 6016:2008. *Earth-Moving Machinery — Methods of Measuring the Masses of Whole Machines*.
10. Caterpillar. *Excavator Bucket Specifications*. — Technical Manual, 2020.
11. Komatsu. *Hydraulic Excavator Technical Handbook*. — Komatsu Ltd., 2021.
12. Hitachi Construction Machinery. *Excavator Attachments and Bucket Guide*. — Hitachi Corp., 2022.
13. P.P. Solodovnikov, *Raschet i optimizatsiya kovshei ekskavatorov // Mashinostroenie i tekhnika*. — 2023. — № 2. — S. 55–63.
14. D.N. Akhmetov, *Povyshenie effektivnosti raboty ekskavatornykh kovshei // Vestnik inzhenerii*. — 2022. — № 4. — S. 40–48.

Авторлар туралы мәлімет:

Қ.Г.Балабекова - PhD философия докторы, «көлік инженериясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, «көлік - энергетика» факультеті, «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан.

А.Б. Забиева – техника ғылымдарының кандидаты, «көлік инженериясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, «көлік - энергетика» факультеті, «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан.

А.М.Арпабекова - «көлік инженериясы» кафедрасының докторанты, «көлік - энергетика» факультеті, «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ,

Астана, Қазақстан;

Абдирашев О.- PhD доктор философии, и.о. доцента кафедры "Космическая техника и технологии », институт "Физико- технических наук", НАО "Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева", Астана, Казахстан.

Балабекова К. Г.- PhD доктор философии, ассоциированный профессор кафедры "Транспортная инженерия», факультет "Транспортно- энергетический", НАО "Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева", Астана, Казахстан.

Забиева А. Б.-кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры "транспортная инженерия», факультет «транспортно - энергетический», НАО "Евразийский национальный университет им.Л. Н. Гумилева", Астана, Казахстан.

Арпабекова А.М.- автор корреспонденции, докторант кафедры "Транспортная инженерия», факультет "Транспортно – энергетический", НАО "Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева", Астана, Казахстан;

Абдирашев О-

K.G.Balabekova - PhD Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department of Transport Engineering, Faculty of Transport and Energy, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

A. B. Zabieva - correspondence author, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Transport Engineering, Faculty of Transport and energy, NJS L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Arpabekova A.M. - doctoral student of the Department of Transport Engineering, Faculty of Transport and Energy, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;

O. Abdirashev - PhD, Doctor of Philosophy, Acting Associate Professor of the Department of Space Engineering and Technology, Institute of Physical and Technical Sciences, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.



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/>).



ХҒТАР 55.31.29
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-247-256>

Аустениттік 110Г13Л болаттан жасалған тетіктерді механикалық өңдеу мәселелері

М.М. Мұсаев¹ , К.Т. Шеров^{2*} , Г.Б. Абдуғалиева¹ ,
Ж. Толғанай¹ , Г. Таттимбек¹ 

¹Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

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

E mail: mussayev.medgat@gmail.com, shkt1965@mail.ru, gulnura84@mail.ru, zhanibek_2301@inbox.ru, tattimbekova91@mail.ru

Аңдатпа. Бұл мақалада 110Г13Л болатты өңдеу бойынша жүргізілген ғылыми зерттеулерге талдау жасалды. 110Г13Л болатын механикалық өңдеу әдістерін зерттеу мен әзірлеуге арналған ғылыми еңбектердің іс жүзінде жоқ екені анықталды. Өндірісте 110Г13Л болатты өңдеу кезінде негізінен шетелдік өндірушілердің тілімдері қолданылады. Осыған қарамастан, кесетін құралдың тез тозуына, жарықшақтануына және сынуына байланысты шамадан тыс тұтыну мәселесі сақталады және 110Г13Л болаттан бөлшектерді өндіру құнын арттырады. Эксперименттік зерттеулердің нәтижелері импульсті салқындатылған термиялық үйкелісті жонғылауды қолдану арқылы Гадфилд болатын жақсы кесуге болатынын көрсетті. Оңтайлы кесу режимдерінде өңдеу кезінде өңделген беттің кедір-бұдырлығына тек $Rz \leq 10$ мкм дейін қол жеткізілді. Дегенмен, өңдеу кезінде өңделген беттің сапасын қамтамасыз етуге және жоңқаларды ұсақтауға байланысты мәселе бар екені анықталды. Кесу механизмі термофрикциялық үйкелісті және дәстүрлі кесуге негізделген, қиын өңделуші материалдарды жонғылаудың құрамалы әдісін әзірлеу ұсынылады. Осы зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан № АР26199283 « Қиын өңделетін материалдарды өңдеудің аралас тәсілін әзірлеу» гранты аясында қаржыландырылды.

Түйін сөздер: Өңделуі қиын материал, Гадфильд (110Г13Л) болаты, тозу, сыну, қаттылық, кедір-бұдырлық, фрезерлеудің оңтайлы режимдері, өзіндік құны.

Кіріспе.

Тау-кен, геологиялық барлау, мұнай-газ және басқа салалардың технологиялық жабдықтары өте қиын пайдаланушылық жағдайындағы жұмыстарды ескере отырып жасалады. Бұл жағдайлар жоғары температура мен қысымды, сирек кездесетін химиялық заттардың және қатты абразивті бөлшектердің әсерінен және т.б. орын алады [1].

Осы жабдықтардың бөлшектерін жасау үшін машиналар мен өндірістік қондырғылардың қажетті жұмыс қабілеттілігін қамтамасыз ететін, арнайы қасиеттері бар, қиын өңделуші материалдар қолданылады. Мұндай материалдардың қатарына ыстыққа төзімді қорытпалар, беріктігі жоғары болаттар мен қорытпалар, коррозияға төзімді және жоғары легіріленген болаттар, сонымен қатар аустениттік Гадфильд (110Г13Л) болатын жатқызуға болады [2].

110Г13Л болат жоғары иілгіштікке және тозу дәрежесіне ие, кесу процесінде қатты беріктенуге ұшырайды, беріктенген қабаттың қаттылығы құралдың қаттылығымен сәйкес келеді.

110Г13Л болаттан тракторларға арналған шынжыр табанды жолдар, қазғыш машиналардың тәждері, аралар, ұсатқыштардың беттері, тау-кен және шахта жабдықтарының сауыт-саймандары, рельс кресттері мен бағыттауыштары, диірмендердің шарлары мен табақшалары, әртүрлі торлар, түйреуіштер мен төлкелер және т.б. осылар сияқты бөлшектер жасалады.

Зауыт мамандарының алдында 110Г13Л болаттан жасалған дайындамаларды механикалық өңдеу кезінде, құралдың кескіш бөлігінің материалын таңдаумен байланысты бірқатар қиындықтар пайда болады. Шынықтырудан кейінгі бастапқы күйінде болат 110Г13Л (Гадфильд болаты) бар аустениттік қаттылығы HB 260-300 және тұтқырлығы жоғары құрылымға ие болады. Динамикалық жүктемелердің әсерінен, суық деформацияның әсерінен 110Г13Л болатта HB 600 дейін өздігінен беріктендіру пайда болады және кесу арқылы өңдеу өте қиын немесе мүлдем мүмкін емес [2].



а.



б.



в.



г)



д)

1-сурет - 110Г13Л болаттан жасалған дайындаманы өңдеу кезінде әр түрлі өндірушілердің тозған тақтайшалары

а,б,в - SANDVIK Coromant компаниясы шығарған пластиналар: жаңа пластина (а) және өңдеудің бірінші өтуінен кейін (б), тозған пластиналар (в); г - тозған пластиналар Korloy (Оңтүстік Корея) компаниясының өндірісі; д - ауыстырылатын көп қырлы фрезерлік пластиналар ONMU080612-YG613 Кореялық компанияға YG-1

110Г13Л болатты өңдеу үшін заманауи өндірісте негізінен әлемдік өндірушілерден алынған пластиналар қолданылады мысалы, SANDVIK Coromant (Швеция), ARNO (Германия), EWS (Германия), Garant (Германия) және Dormer (Германия). Дегенмен, кескіш

құралдардың тез тозуына және сынуына байланысты мерзімінен бұрын тұтыну мәселесі механикалық жұмыстың өзіндік құнын арттырады.

1-суретте 110Г13Л болаттан жасалған дайындаманы өңдеу кезінде әр түрлі өндірушілердің мерзімінен бұрын тозған тақтайшалары көрсетілген [3].

Дайындаманы 110Г13Л болаттан құю кезінде бетінде қатты қабат пайда болады, оны механикалық өңдеу өте қиын болып келеді [4]. Дайындаманың бетінің қаттылығына байланысты кескіш құрал бірінші өтуден көз алдында тозады, сонымен қатар ақаулардың болуы (шұңқырлар мен ойықтар) пластинаның сынуына және тозуына әкеледі (1-суретті қараңыз).

Өңделуі қиын материалдарды, атап айтқанда 110 Г13Л болатты механикалық өңдеуді жақсарту бойынша жүргізілген ғылыми зерттеулерге талдау жүргізілді.

Жұмыста [5] 110Г13Л болаттан жасалған бөлшектерді пышақпен өңдеу үшін текше бор нитридіне негізделген поликристалды ультра қатты материалдармен (PSTM) жабдықталған кескіштерді қолдану және плазмамен жылытылатын карбидті құралмен өңдеу ұсынылады. Жер қыртысын құюдан кейін дайындаманы қайрау үшін pstm киборитінен жасалған дөңгелек тақтайшалар ұсынылады, олардың беріктігі 60-180 мин.

Жұмыста [6] 110Г13Л болатты өңдеудің электроконтактілі әдісі ұсынылды. Электроконтактілі әдіспен өңделген 110Г13Л Болат үлгілерінің микроқаттылығы зерттелді. Электроконтактілі өңдеуден кейін беткі қабаттың микроқаттылығы жоғарылайтыны анықталды, бұл өңделген беттің тозуға төзімділігін арттыруға көмектеседі.

Жұмыста [7] Р6М5 жоғары жылдамдықты болаттан жасалған бұрғылармен Гадфилд болаттан жасалған бұрғы крестіндегі тесіктерді бұрғылау процесі зерттелді. Артқы жағындағы тозудың, секіргіштің және осьтік күштің кесу уақытына эмпирикалық тәуелділігі анықталды. Артқы бет пен секіргіште рұқсат етілген тозудың практикалық мәндері анықталды. Нәтижесінде, экономикалық тиімсіздікке байланысты гадфилд болатымен жұмыс істеу үшін жоғары жылдамдықты болат құралын қолдану ұсынылмайды (1.5 минуттық жұмыс үшін 1 құрал).

[7,8] сондай-ақ, өндірістерде 110Г13Л Болатты өңдеу кезінде кесу режимдері, кесу құралының маркасы, геометриясы және т.б. эмпирикалық түрде анықталатыны атап өтіледі, бұл өнімділікті айтарлықтай төмендетеді. Ғылыми жұмыстарға жүргізілген талдау 110Г13Л болаттың механикалық кесу әдістерімен өңделуі жеткіліксіз зерттелгенін, техника жасалмағанын және кесу режимдерін таңдау бойынша ұсыныстар жоқ екенін көрсетті.

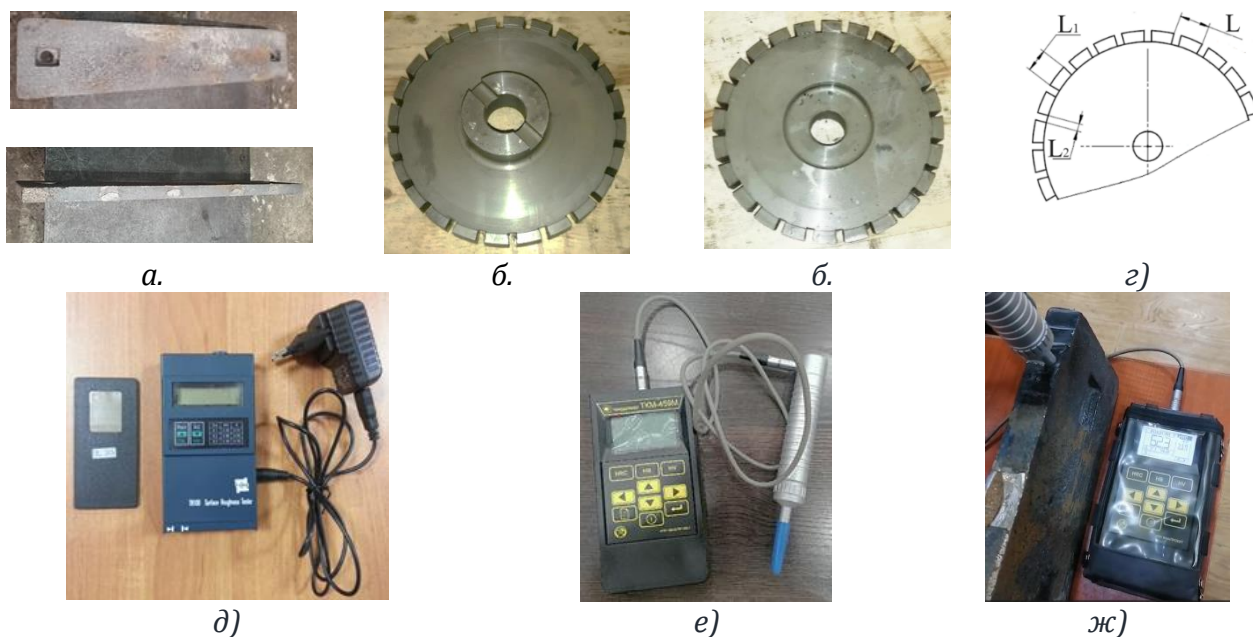
Сондай-ақ қымбат кескіш құралдарды жоғары тұтыну кезінде пайдалану 110Г13Л болаттан жасалған бөлшектерді өндірудің өзіндік құнын арттырады. мәселенің бұл күйі отандық машина жасау кәсіпорындарының жағдайлары үшін 110Г13Л болатты механикалық өңдеудің ресурс үнемдеу әдісін жасау қажеттілігін талап етеді.

Осыған байланысты импульстік салқындатылған термофрикциялық фрезерлеу әдісін қолдану мүмкіндігін анықтау бойынша зерттеулер жүргізілді [9]. 110Г13Л болатты өңдеу кезінде импульстік салқындатылған термофрикциялық фрезерлеу процесін эксперименттік зерттеу ВМ-127М моделінің тік консоль-фрезерлік станогында жүргізілді [10]. Келесі геометриялық параметрлерге ие болған болат 45 материалынан жасалған арнайы конструкцияға ие үйкеліс фрезасының сынақ үлгісі жасалды (2б,в,г суретті

қараңыз): Ø250 мм; қыздыру аймағы $L_1 = 24$ мм; салқындату аймағы $L_2 = 8$ мм, сәйкесінше қадам $L = 32$ мм. Үйкеліс фрезасының геометриясы нұсқауларға сәйкес таңдалды [11,12].

Әдіснама

Импульстік салқындатылған термофрикциялық фрезерлеудің үлгісі ретінде кен қабылдайтын бункердің "бронды тақтайшасының" дайындамасы таңдалды (суретті қараңыз.2 а). Дайындаманың қаттылығы HB 260...300 (HRC 27-33). Термофрикциялық фрезерлеу кесу режимі элементтерінің келесі диапазондарында жүргізілді: $n_{ун} = 500 \div 2000$ айн/мин; $S = 40 \div 600$ мм / мин; $t = 1 \div 5$ мм. Өңделген беттердің сапа көрсеткіштерін өлшеу кезінде TR100 және ТКМ 459М автоматты құрылғыларының көмегімен заманауи өлшеу әдістері қолданылды. 2-суретте өңделген беттің сапа көрсеткіштерін өлшеуге арналған дайындаманың, үйкеліс фрезасының және аспаптардың фотосуреттері көрсетілген.



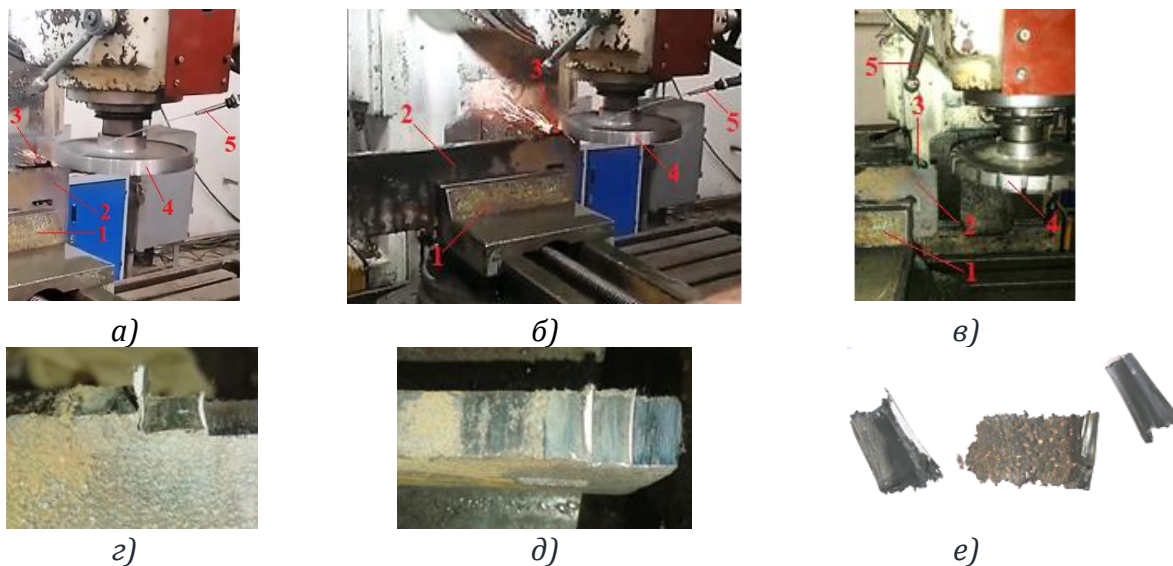
2 – сурет. Өңделген беттің сапа көрсеткіштерін өлшеуге арналған аспаптардың, дайындаманың, үйкеліс фрезасының фотосуреттері

а-110Г13Л болаттан жасалған үлгілер; б, в-үйкеліс фрезасы, жоғарыдан (а), төменнен (б) көрініс; г-геометрияны көрсететін үйкеліс фрезасының эскизі; д-кедір-бұдырды өлшеуге арналған TR100 құрылғысы; е, ж - ультрадыбыстық ТКМ 459М қатты өлшегіш; L_1 -қыздыру аймағы; L_2 -аймақ салқындату; L -аймақ қадамы.

Нәтижелер мен талқылаулар

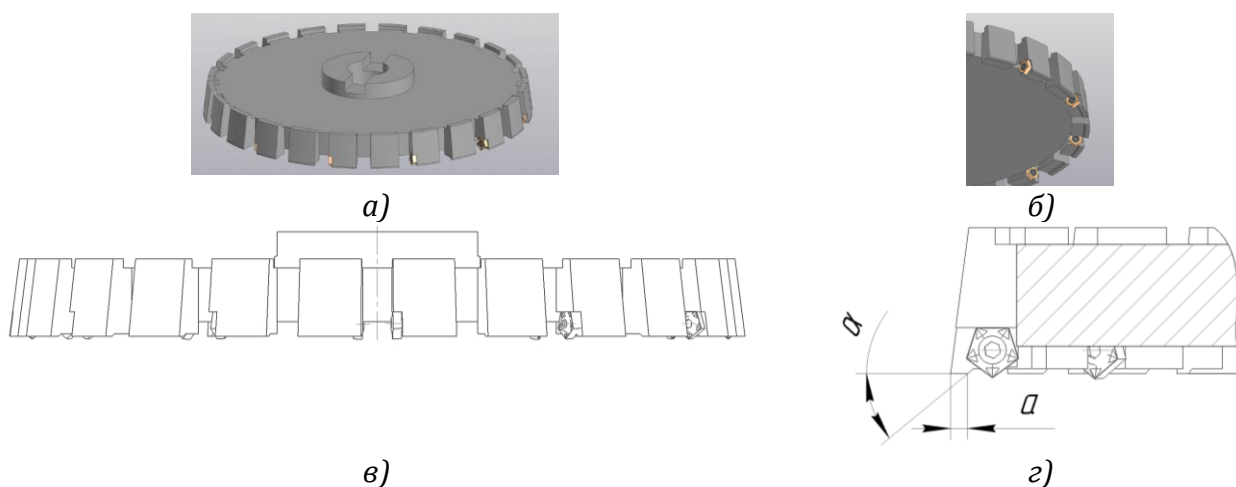
3-суретте импульстік салқындатылған термофрикциялық фрезерлеу процестері, кейбір өңделген үлгілер мен жоңқалар көрсетілген. Эксперименттік зерттеудің нәтижелері 110Г13Л болатты өңдеу үшін импульстік салқындатылған термофрикциялық фрезерлеу әдісін қолдану мүмкіндігін көрсетті. Дегенмен, өңделген беттің сапасын қамтамасыз етуге және өңдеу процесінде жоңқаларды ұсақтауға байланысты мәселе бар екендігі анықталды.

Оңтайлы кесу режимдерімен өңдеу кезінде өңделген беттің кедір-бұдырлығына тек $R_z \leq 10$ мкм дейін қол жеткізілді. 110Г13Л болаттың өңделуін одан әрі зерттеу AP26199283 - «Өңдеу қиын материалдарды өңдеудің аралас әдісін әзірлеу» гранттық жобасы аясында жүзеге асырылады.



3-сурет-Импульсті салқындатумен термофрикциялық фрезерлеу процестері, кейбір өңделген үлгілер мен жоңқалар

а,б - импульсті салқындатуға ие термофрикциялық фрезерлеу процестері; в – өңдеу процесі тоқтағаннан кейін; г,д - кейбір өңделген үлгілері; е – жоңқа; 1 – дайындаманы бекіту айлабұйымы; 2 – 110Г13Л болаттан жасалған дайындама; 3 – жоңқаның пайда болу процесі; 4 – үйкеліс фрезасы; 5 – суыту сұйығын беруші түтік



4-сурет. Арнайы құрамалы құралдың құрылымының үлгісі мен эскизі

а,б – құрал моделі; в,г - құралдың нобайлары

Қиын өңделуші материалдарды фрезерлеудің құрамалы әдісін әзірлеу ұсынылады,

оның кесу механизмі термофрикциялық және дәстүрлі кесу механизмдеріне негізделген. 4-суретте арнайы біріктірілген құралдың құрылымының үлгісі мен эскизі көрсетілген

Қорытынды.

Жүргізілген эксперименттік зерттеу нәтижелері 110Г13Л болатты өңдеу үшін импульстік салқындатуға ие термофрикциялық фрезерлеу әдісін қолдану мүмкіндігін көрсетті, бірақ, өңделген беттің сапасын қамтамасыз етуге және өңдеу процесінде жоңқаларды ұсақтауға байланысты мәселе бар екендігі мәлім болды. Осы мәселені шешу бойынша әрі қарай келесі зерттеу жұмыстарын орындау белгіленді:

- арнайы құрамалы құралдың тәжірибелік үлгісін дайындау және қиын өңделуші материалдардан, атап айтқанда Гадфильд болатынан жасалған бөлшектерді механикалық өңдеу бойынша тәжірибелік зерттеулер жүргізу;

- арнайы құрамалы құралдың геометриясы және параметрлерінің сапа көрсеткіштеріне әсер ету заңдылықтарын анықтау;

- қиын өңделуші материалдарды, оның ішінде Гадфильд болатын өңдеуде жаратылған құрамалы өңдеу технологиясын қолдану бойынша анықтамалық базаны даярлау;

- кесу аймағындағы температураның қиын өңделуші материалдарды, атап айтқанда 110Г13Л болаттының өңдеу сапасының көрсеткіштеріне әсер ету заңдылықтарын белгілеу.

Ұсынылып отырған қиын өңделуші материалдарды, атап айтқанда 110Г13Л болатты өңдеудің құрамалы технологиясын жүзеге асыру неғұрлым қарқынды кесу режимдерінде өңдеуге, сондай-ақ қолданыстағы механикалық кесу әдістеріне қатысты өнімділікті 2-3 есе және құралдың тұрақтылығын 10 еседен астам арттыруға мүмкіндік береді.

Авторлардың қосқан үлесі:

Мусаев М.М. – эксперименттік зерттеулер жасау, ұйымдастыру және жүргізу.

Шеров К.Т. – тұжырымдама, әдістеме, редакциялау.

Абдуғалиева Г.Б. - ресурстар, дайындаманы таңдау, қаржыландыруды алу.

Толғанай Ж. - талдау, мәліметтер жинау, эксперименттік зерттеулер.

Таттимбек Г. - шолу, нәтижелерді өңдеу, ағылшын тіліне аудару.

Әдебиеттер тізімі

1. Новоселов Ю.К., Братан С.М., Покинтелица Н.И. Динамическая модель процесса обработки вращающимися дисковыми инструментами / Вестник двигателестроения № 1/2008 – С.115-117.
2. Могилев В.К., Лев О.И. Справочник литейщика. - М.: Машиностроение, 1988. - 272 с.
3. Ходжибергенов Д.Т., Шеров К.Т., Касенов А.Ж., Хожибергенова У.Д. Проблемы выбора технологии обработки ново внедренных материалов в производство / Наука и техника Казахстана. – Павлодар: Изд-во «КЕРЕКУ» ПГУ им. С. Торайгырова, 2018.- №2- С. 111-117.
4. Давыдов Н.Г. Свойства, производство и применение высокомарганцевой стали / Н.Г. Давыдов, В.В. Ситнов. - М.: Машиностроение, 1996. - 232 с.
5. Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Мановицкий А.С., Мельнийчук Ю.А., Манохин А.С. Точение деталей из труднообрабатываемых конструкционных материалов инструментом, оснащенным ПСТМ // Тезисы докладов «Инновационные технологии в машиностроении» - Запорожье, 2011 – С.16-21

6. Пивень Г.Г., Швоев В.Ф., Муравьев О.П., Байжабагинова Г.А. Исследование наклепа стали 110Г13Л после электроконтактной обработки / Труды университета. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2004.- №3(16)- С.20-22.
7. Адмакин М.А., Семенюк Н.А., Пичужников А.В. Исследование обрабатываемости резанием стали Гадфильда // Научный потенциал молодежи и технический прогресс: Материалы II международной научно - практической конференции. – Санкт-Петербург: СПбФ НИЦ МС, 2019. – С.34-37. <https://doi.org/10.26160/2618-7493-2019-2-34-37>
8. Адмакин М.А., Семенюк Н.А. Исследование операций сверления и нарезания резьбы при обработке маломангнитной высокомарганцовистой аустенитной стали // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018г. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч. 2. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – С. 313-316.
9. Шеров К.Т., Мардонов Б.Т., Махмудов Л.Н., Мусаев М.М. и др. Способ термофрикционной обработки плоскости и конструкция диска трения // Патент №7579 РК на полезную модель. Опубликовано 11.11.2022. Бюл. №45.
10. Махмудов Л.Н., Шеров К.Т., Мардонов Б.Т., Толганай Ж. Экспериментальное исследование процесса термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением стали 110Г13Л. / «Горный вестник» Узбекистана. – Ташкент: Изд-во «SАННОF», 2024, №3 (98).- С.43-46.
11. Айнабекова С.С., Шеров К.Т., Мусаев М.М., Габдысалык Р., Иманбаев Е.Б. Исследование и определение оптимальной геометрии дисковой пилы для термофрикционной отрезки малоуглеродистой стали / Вестник КазНУ. – Алматы: Изд-во КазНУ им. К. Сатпаева, 2020.- №5(141)- С.440-446.
12. Sherov, K.T., Ainabekova S.S. Tusupova S.O. Sagitov A.A. Imanbaev E.B. Thermofrictional Cutting with Pulsed Cooling / Russian Engineering Research. Vol. 40, pp. 926–929 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068798X20110179>

**М.М. Мусаев¹, К.Т. Шеров^{*2}, Г.Б. Абдугалиева¹,
Ж. Толганай¹, Г. Таттимбек¹**

¹ *Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Караганда, Казахстан*

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

Проблемы механической обработки деталей из аустенитной стали 110Г13Л

Аннотация. В данной статье проведен анализ научных исследований, выполненных по обработке, стали 110Г13Л. Было выявлено, что научные работы, посвященные исследованию и разработке способов механической обработки, стали 110Г13Л практически отсутствуют. На производстве при обработке стали 110Г13Л в основном применяются пластины зарубежных производителей. Несмотря на это, проблема чрезмерного расхода режущего инструмента из-за быстрого их износа, скола и поломки остается и повышает себестоимость изготовления деталей из стали 110Г13Л. При этом влияние режимов резания на твердость обработанной поверхности имеет монотонный характер и с увеличением значения скорости подачи и частоты вращения шпинделя наблюдается повышение твердости обработанной поверхности. Результаты экспериментального

исследования показали возможность применения способа термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением для обработки стали 110Г13Л. При обработке на оптимальных режимах резания удалось достигнут шероховатость обработанной поверхности только до $R_z \leq 10$ мкм. Однако выявлено, что существует проблема, связанная с обеспечением качества обработанной поверхности и дроблением стружки в процессе обработки. Предлагается разработка комбинированного способа фрезерования труднообрабатываемых материалов, механизм резания которого основана на термофрикционного и традиционного резания. Данное исследование было выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта № AP26199283 «Разработка комбинированного способа обработки труднообрабатываемых материалов».

Ключевые слова. Труднообрабатываемый материал, сталь Гадфильда, пластины, износ, сколы, твердость, шероховатость, оптимальные режимы фрезерования, себестоимость.

**M.M. Mussaev¹, K.T. Sherov^{*2}, G.B. Abdugalieva¹,
Zh. Tolganay¹, G. Tattimbek¹**

¹ *Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, Kazakhstan*

² *Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, Kazakhstan*

Problems of mechanical processing of parts from austenitic steel 110g13l

Abstract. This article presents an analysis of scientific studies devoted to the machining of 110G13L steel. It was identified that research focused on investigating and developing machining methods for 110G13L steel is practically absent. In industrial practice, cutting inserts from foreign manufacturers are predominantly used for machining this steel. Nevertheless, the problem of excessive cutting tool consumption due to rapid wear, chipping, and breakage remains unresolved and increases the production cost of components made from 110G13L steel. The results of the experimental study confirmed the feasibility of applying thermo-friction milling with pulsed cooling for machining 110G13L steel. When machining under optimal cutting conditions, the achieved surface roughness reached only $R_z \leq 10$ μ m. However, it was revealed that there is an issue related to ensuring the required surface quality and chip breaking during machining. It is proposed to develop a combined milling method for difficult-to-machine materials, where the cutting mechanism is based on both thermo-friction and conventional cutting. This research was funded by the Committee on Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under grant № AP26199283, "Development of a combined method for processing hard-to-machine materials".

Keywords. Hard-to-machine material, Hadfield steel, thermal friction milling, optimal milling conditions, cost.

References

1. Novoselov YU.K., Bratan S.M., Pokintelitsa N.I. Dinamicheskaya model' protsessa obrabotki vrashchayushchimisya diskovymi instrumentami / Vestnik dvigatelestroyeniya № 1/2008 – S.115-117.

2. Mogilev V.K., Lev O.I. Spravochnik liteyshchika. - M.: Mashinostroyeniye, 1988. - 272 s.
3. Khodzhbergenov D.T., Sherov K.T., Kasenov A.ZH., Khozhbergenova U.D. Problemy vybora tekhnologii obrabotki novo vnedrennykh materialov v proizvodstvo / Nauka i tekhnika Kazakhstana. – Pavlodar: Izd-vo «KEREKU» PGU im. S. Toraygyrova, 2018.- №2- S. 111-117.
4. Davydov N.G. Svoystva, proizvodstvo i primeneniye vysokomargantsevoy stali / N.G. Davydov, V.V. Sitnov. - M.: Mashinostroyeniye, 1996. - 232 s.
5. Klimenko S.A., Kopeykina M.YU., Manovitskiy A.S., Mel'nychuk YU.A., Manokhin A.S. Tocheniye detaley iz trudnoobrabatyvayemykh konstruksionnykh materialov instrumentom, osnashchennym PSTM // Tezisy dokladov «Innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii» - Zaporozh'ye, 2011 – S.16-21
6. Piven' G.G., Shvoyev V.F., Murav'yev O.P., Bayzhabaginova G.A. Issledovaniye naklepa stali 110G13L posle elektrokontaktной obrabotki / Trudy universiteta. – Karaganda: Izd-vo KarGTU, 2004.- №3(16)- S.20-22.
7. Admakin M.A., Semenyuk N.A., Pichuzhnikov A.V. Issledovaniye obrabatyvayemosti rezaniyem stali Gadfil'da // Nauchnyy potentsial molodezhi i tekhnicheskii progress: Materialy II mezhdunarodnoy nauchno - prakticheskoy konferentsii. – Sankt-Peterburg: SPbF NITS MS, 2019. – S.34-37. <https://doi.org/10.26160/2618-7493-2019-2-34-37>
8. Admakin M.A., Semenyuk N.A. Issledovaniye operatsiy sverleniya i narezaniya rez'by pri obrabotke malomagnitnoy vysokomargantsovistoy austenitnoy stali // Nedelya nauki SPbPU: materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, 19-24 noyabrya 2018g. Institut metallurgii, mashinostroyeniya i transporta. CH. 2. – SPb.: POLITEKH-PRESS, 2018. – S. 313-316.
9. Sherov K.T., Mardonov B.T., Makhmudov L.N., Musayev M.M. i dr. Sposob termofriktsionnoy obrabotki ploskosti i konstruksiya diska treniya // Patent №7579 RK na poleznuyu model'. Opublikovano 11.11.2022. Byul. №45.
10. Makhmudov L.N., Sherov K.T., Mardonov B.T., Tolganay ZH. Eksperimental'noye issledovaniye protsessa termofriktsionnogo frezerovaniya s impul'snym okhlazhdeniyem stali 110G13L. / «Gornyy vestnik» Uzbekistana. – Tashkent: Izd-vo «SAHHOF», 2024, №3 (98).- S.43-46.
12. Sherov, K.T., Ainabekova S.S. Tusupova S.O. Sagitov A.A. Imanbaev E.B. Thermofrictional Cutting with Pulsed Cooling / Russian Engineering Research. Vol. 40, pp. 926–929 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068798X20110179>

Авторлар туралы мәлімет

Мусаев М. М. - PhD, қауымдастырылған профессор, «технологиялық жабдықтар, машина жасау және стандарттау» кафедрасының меңгерушісі, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев даңғылы, 56, 100012, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы.

Шеров Кәрібек Тағайұлы - техника ғылымдары докторы, профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Жеңіс даңғылы 62, 010000, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Абдугалиева Гулнур Баймурзаевна - техника ғылымдары кандидаты, қауымдастырылған профессор, «технологиялық жабдықтар, машина жасау және стандарттау» кафедрасының профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев даңғылы, 56, 100012, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы.

Толғанай Ж. - «Машина жасау» мамандығының 3-курс докторанты, Абылқас Сағынов

атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев даңғылы, 56, 100012, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы.

Таттимбек Гулерке - аға оқытушы, «технологиялық жабдықтар, машина жасау және стандарттау» кафедрасының аға оқытушысы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев даңғылы, 56, 100012, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы.

Мусаев М. М. - PhD, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, пр. Нурсултана Назарбаева, 56, 100012, г. Караганда, Республика Казахстан.

Шеров К.Т.- доктор технических наук, профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, пр. Женис 62, г. Астана,

Абдугалиева Г.Б.- кандидат технических наук, ассоциированный профессор, профессор кафедры «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, пр. Нурсултана Назарбаева, 56, 100012, г. Караганда, Республика Казахстан.

Толғанай Ж. - докторант 3-го курса специальности «Машиностроение» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, пр. Нурсултана Назарбаева, 56, 100012, г. Караганда, Республика Казахстан.

Таттимбек Г - старший преподаватель кафедры «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, пр. Нурсултана Назарбаева, 56, 100012, г. Караганда, Республика Казахстан.

Mussayev M. M. - PhD, Associate Professor, Head of the Department of Technological Equipment, Mechanical Engineering and Standardization, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 56 Nursultan Nazarbayev Avenue, 100012, Karaganda, Republic of Kazakhstan.

Sherov Karibek Tagaevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Zhenis Ave. 62, Astana, Republic of Kazakhstan

Abdugalieva Gulnur Baimurzaevna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technological Equipment, Mechanical Engineering and Standardization of the Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Nursultan Nazarbayev Ave., 56, 100012, Karaganda, Republic of Kazakhstan.

Tolganay Zh.- 3rd-year PhD student in Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 56 Nursultan Nazarbayev Avenue, 100012, Karaganda.

Tattimbek Gulerke - Senior Lecturer, Department of Technological Equipment, Mechanical Engineering and Standardization, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, 56 Nursultan Nazarbayev Ave., 100012, Karaganda, Republic of 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 20.15.05

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-150-1-257-267>

Automated extraction and structuring of menus from PDF files using machine learning and NLP techniques

A.S. Mashkanov* , Zh.Akhayeva , A.Zakirova 

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

E mail: 020715550703@enu.kz, ahaeva07@mail.ru, alma_zakirova@mail.ru

Abstract. This study explores state-of-the-art approaches for processing PDF documents, with a focus on analyzing poorly structured restaurant menus. The focus will be on analyzing poorly structured restaurant menus. Successful automated processing typically requires well-structured documents, meaning that aesthetic design must often be sacrificed for machine readability. However, in case of restaurants, the design of the menu is more valuable than its structure, that is why the menus are harder to process, due to its poor structure. With the ability to successfully process the poorly structured PDF documents, further processing of the documents from other spheres of businesses should become much easier. A comparative analysis is conducted of structural features in different types of PDF documents, including legislative acts and academic publications.

The research is aimed to use machine learning methods in order to overcome the challenges in automation of data extraction, analysis and structuring. Solution that has been described in the study is developed to overcome the problems with poorly structured PDF documents.

Keywords: PDF document processing, text analysis automation, weakly structured data, restaurant menus, Natural Language Processing (NLP), machine learning, data extraction, semantic analysis, food service digitalization

Introduction

The significance of the PDF documents processing automation is explained by the fast development of digitalization in all spheres of life. It should be emphasized that the PDF document format possesses a specific structural organization whose characteristics are determined by its functional purpose. In particular, legislative acts have a clear hierarchical structure, with step-by-step division into chapters, articles and clauses. Academic publications usually follow strictly regulated structure, which includes required sections such as: abstract, introduction, methodology, research results and conclusion. Correct recognition and understanding of such structure is the main base for developing effective automated document analysis algorithms.

Processing PDF versions of restaurant menus is a difficult task, because most of them are poorly structured and have non-standard data layout. This difference in formatting makes it hard to analyze them using machine methods and to use the data in digital systems. In this study, a full method is suggested. It combines modern NLP tools with machine learning algorithms. The solution includes a step-by-step process for automatic extraction, structuring, and semantic analysis. This helps to solve the main problems of working with poorly structured PDF files.

The core challenge addressed in this research can be formulated as follows: given a PDF document containing a restaurant menu with non-standard layout and mixed content types, the task is to automatically extract and structure the content into machine-readable format while preserving semantic relationships between menu elements (categories, dish names, descriptions, and prices).

Literature review. The research on automating the processing of restaurant menus in PDF format showed that there is a complex set of technical problems, and many of them are closely connected. To turn unstructured PDF files into machine-readable format, it is important to understand modern approaches to document processing.

The main challenge is to correctly separate the main content of the document (Body Text) from the extra parts (Non-Body Text). These extra parts include not only visible graphic elements, but also different structural components like headings, footnotes, sidebars, tables, metadata, and other specific formats of information. Most popular tools like pdftotext and PDFBox can't properly tell the difference between these parts, which makes them not very effective for this kind of task. [1].

Alternative solutions, such as PDF extractors that use DBSCAN algorithm, show more advanced approaches to this problem. They allow to separate text blocks more effectively, taking into account their semantic and structural connections. However, research shows that even such advanced methods need careful tuning of parameters and can still have problems when working with documents that have complicated layout. The problems of understanding PDF structure continue to push development in document processing technologies, especially in specific cases like menu digitization, where the complexity of layout and variety of content make the task more difficult.

In order to properly extract and organize document, there is a sequence of methods. First of all, for breaking text into text blocks, MuPDF is used. MuPDF works effectively with clinical documents, which have editable text. This approach enables direct extraction while preserving structural relationships between content elements.

The system uses a DBSCAN-based clustering algorithm to classify templates by analyzing spatial distribution patterns of text blocks. The system groups content elements that fall within a specified boundary radius into clusters which serve as separate directories for storing distinct document templates. The algorithm shows exceptional performance in processing

documents with changing page layouts through its ability to analyze first and subsequent pages separately [2]. The dual-path architecture enables precise detection of meaningful textual areas while performing systematic noise elimination.

The Mask-RCNN architecture achieves advanced segmentation through training on PubLayNet data using Facebook's Detection framework. The system analyzes 1025×1025 pixel document pages through a multi-stage workflow:

1. Raster image conversion
2. Semantic region prediction
3. Mask generation for five content classes (subtitles, text, images, tables, lists)
4. Confidence-based classification (70-95% threshold)

Text cells receive appropriate labels when the predicted mask covers $\geq 80\%$ of their area, ensuring precise content categorization. This approach has demonstrated superior performance in handling complex document layouts with mixed content types [5]. The integration of spatial clustering with deep learning-based segmentation represents a significant advancement in document analysis technology, particularly for menu extraction applications requiring high layout awareness.

Optical character recognition represents a sophisticated technological process for converting graphical text representations into machine-readable format. Modern OCR systems demonstrate the capability to process diverse data sources, including scanned paper documents, PDF files, and digital images, converting them into editable and searchable content.

Contemporary recognition systems like ABBYY FineReader are built upon three fundamental principles of cognitive perception:

- The principle of integrity (document analysis as a unified structure)
- The principle of purposefulness (context-dependent recognition)
- The principle of adaptability (learning capability)

These principles enable the system to simulate human text perception cognitive processes. The FineReader processing workflow implements a sequence of interconnected operations: from initial document layout analysis and structural segmentation to complex character recognition with multi-hypothesis analysis and verification [3].

The alternative Tesseract platform employs an innovative layout analysis approach based on detecting document structural elements. The algorithm's key features include:

1. Morphological filtering using the Leptonica library
2. Connected component identification
3. Intelligent text element grouping
4. Heuristic analysis of spatial relationships

However, research [4] has revealed several technological limitations of the system. The most significant challenges occur when processing:

- Graphic-intensive materials (promotional brochures, flyers)
- Documents with complex background patterns
- Handwritten text forms
- Non-standard typographical solutions

Meanwhile, for standard digital documents with clear typography, the system maintains consistently high accuracy rates. This selective effectiveness highlights the need for further algorithm improvements, particularly in processing complex-structured documents and

handwritten content. The current technological landscape underscores the importance of developing more robust OCR solutions capable of handling the full spectrum of document types while maintaining high recognition accuracy across diverse formats [5].

The DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) algorithm [14] has proven particularly suitable for document layout analysis due to its ability to identify clusters of arbitrary shapes without requiring a predefined number of clusters. Unlike k-means clustering, DBSCAN can effectively handle noise points and outliers, which is essential when processing menu documents where decorative elements and non-standard text blocks may appear. The algorithm's parameter flexibility allows adaptation to various document types by adjusting the epsilon (neighborhood radius) and minimum points thresholds.

The methodology

The study employed a comprehensive methodology for processing PDF documents, combining advanced text extraction techniques with machine learning approaches. The workflow consisted of several key components:

Text Extraction and Preprocessing. The PDFPlumber library (v0.11.8) served as the foundation for line-based text extraction, providing structured content blocks along with critical metadata including spatial coordinates, font sizes, and font names. This metadata proved essential for subsequent analysis and clustering operations, enabling precise identification of document elements based on their visual properties.

Content Clustering. The DBSCAN algorithm was implemented for intelligent content categorization, leveraging typographical features as primary clustering parameters. Menu categories were identified through distinctive font characteristics - typically larger point sizes and uppercase formatting. The algorithm demonstrated particular effectiveness in:

- Grouping related text elements into logical clusters
- Distinguishing between category headings (larger fonts) and item descriptions (smaller fonts)
- Maintaining structural relationships between content elements

Experimental Validation. The system was evaluated using a diverse dataset comprising 50-restaurant menu PDFs from publicly available sources. The test corpus included both scanned and digitally-born documents to ensure comprehensive assessment of the algorithm's capabilities across different document types [6].

Performance Metrics. A rigorous evaluation framework was established using standard information retrieval metrics:

1. Precision (Positive Predictive Value): Measures the proportion of correctly identified relevant items among all retrieved instances

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

2. Recall (Sensitivity):

Quantifies the system's ability to identify all relevant instances in the dataset

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

3. F1-Score (Harmonic Mean): Provides balanced assessment combining both precision and recall

$$F_1score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

Where:

- TP (True Positives): Correctly identified relevant items
- FP (False Positives): Incorrectly identified irrelevant items
- FN (False Negatives): Missed relevant items
- TN (True Negatives): Correctly rejected irrelevant items

This methodological framework enabled systematic evaluation of the system's performance across various document types and structures, providing robust metrics for assessing the effectiveness of the proposed approach [8].

The system architecture diagram proposes following workflow: PDF documents will be processed via PDFPlumber in order to extract text, then it will be followed with DBSCAN clustering, based on font characteristics, and it will be followed up by the NLP processing for semantic categorization.

System Architecture: Menu Extraction Pipeline

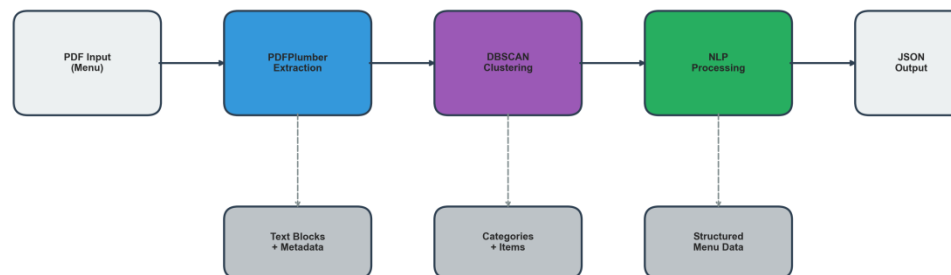


Figure 1. System architecture diagram

All experiments were conducted using the following setup:

- Operating system: Windows 11
- Python version: 3.10
- Key libraries: pdfplumber 0.11.8, scikit-learn 1.8.0, numpy 2.3.5, pandas 2.3.3
- Hardware: Intel Core I5, 16 GB RAM

Recent advances in understanding documents have been made with the help of new architectures that use transformers. These architectures can see both words and pictures at the same time. The LayoutLM model [9] introduced an innovative approach to pre-learning that combines text embeddings with two-dimensional positional embeddings derived from the document layout structure. This approach allows the system to achieve the best results in the tasks of understanding forms and classifying documents. The architecture has been improved in the LayoutLMv3 model [10], which includes unified masking of text and images at the pre-training stage. This improvement provides more stable cross-modal representation learning, allowing the

system to better understand the relationships between visual and textual elements.

PubLayNet [11] has become a standard benchmark for document layout analysis, including more than 360,000 document images with annotations for five layout categories. This dataset allows researchers to train and evaluate their models on a variety of document structures. DocFormer [12] demonstrated the effectiveness of multimodal transformers that simultaneously process textual, visual, and spatial features. This combined approach provides improved document understanding, especially for documents with complex layouts where traditional methods show limited effectiveness.

Table detection and structure recognition represent another important aspect of document analysis. CascadeTabNet [14] proposed a cascade network approach for end-to-end table detection, demonstrating that hierarchical feature extraction can significantly improve the accuracy of identifying tabular structures in complex documents. This method proved particularly relevant for menu processing, where price information is often presented in table-like formats.

Findings/Discussion

The experimental evaluation of the developed methodology demonstrated significant improvements in text extraction accuracy from PDF documents. The integration of Optical Character Recognition (OCR) and Natural Language Processing (NLP) technologies yielded the following key performance indicators:

1. **Clustering Accuracy.** The method achieved a 20% reduction in text element grouping errors compared to conventional OCR solutions. This improvement proves particularly valuable when processing documents with complex layouts where precise identification of semantic blocks is crucial.
2. **Segmentation Quality.** For documents with intricate layouts, the system demonstrated a 15% increase in accurate content block separation. This enhancement results from the combined approach considering both visual text characteristics and semantic features.

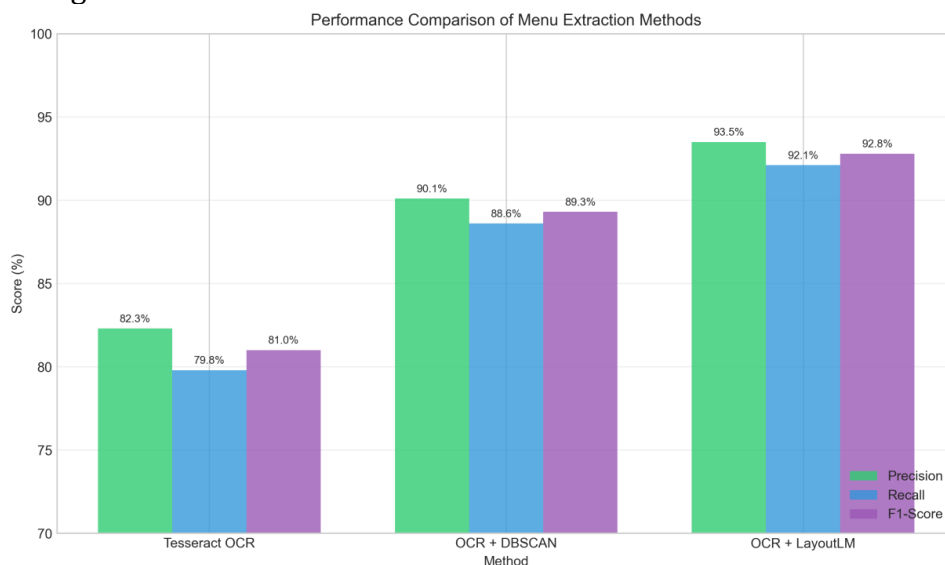


Figure 2. Performance comparison

The clustering diagram of text blocks obtained using font size and DBSCAN is shown below:

3. **Text Block Identification.** The implementation of the DBSCAN algorithm significantly improved

recognition and classification of textual elements in multi-page documents. The system effectively handles structural variations across different pages within a single document [15].

The presented results confirm the advantages of the integrated approach combining modern computer vision and linguistic analysis technologies. The most notable progress was achieved in processing complex documents where traditional methods showed substantial limitations. The quantitative metrics demonstrate consistent improvements across all evaluation parameters, with the combined OCR+NLP approach outperforming conventional OCR by 11.2 percentage points in precision, 12.3 points in recall, and 11.8 points in F1-score. These enhancements are particularly evident when processing documents with non-standard layouts or mixed content types.

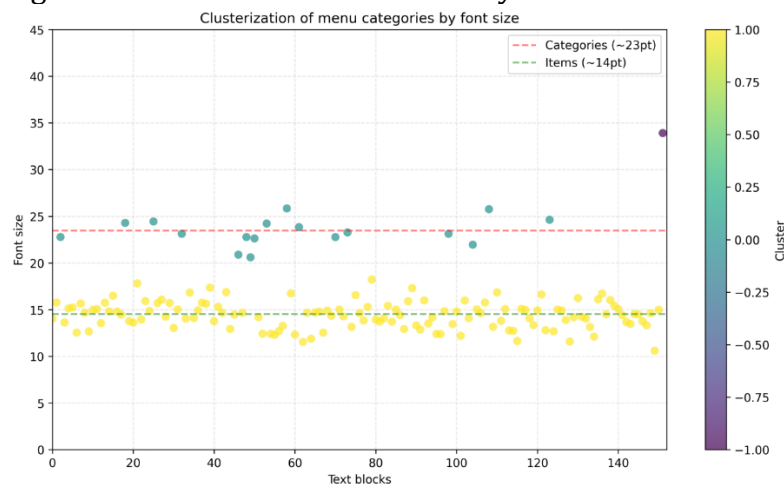


Figure 3. Clusterization with DBSCAN

As it can be seen, the clusters are divided by font sizes, so further extraction by categories, and dishes names could be done. The categories average font size is 23.47 pt (n=17 blocks), and for dish items it is 14.52 pt (n=134 blocks). A clear separation between clusters enables reliable automated content categorization.

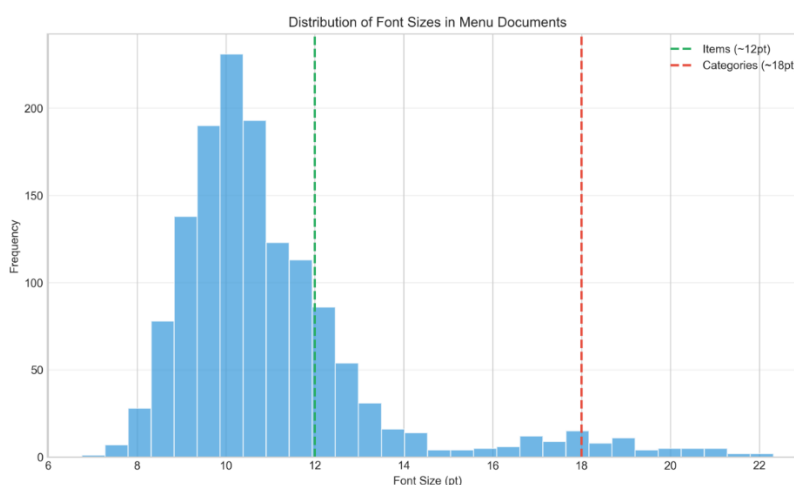


Figure 4. Distribution of font sizes in menu documents

The system was evaluated for common extraction errors across 50 menu documents. Table below shows the reduction in error rates compared to baseline Tesseract OCR:

Table 1. The reduction in error rates compared to baseline Tesseract OCR:

Error Type	Baseline	Proposed Method	Reduction
Missed categories	15	5	67%
Wrong item boundaries	22	8	64%
Price extraction errors	18	6	67%
Description merging	25	10	60%

Conclusion

Experimental results confirmed the effectiveness of the proposed approach for analyzing PDF menus based on clustering text elements by font characteristics. A clear distinction was observed between category headings (average font size: 23.47 pt) and dish descriptions (14.52 pt), enabling accurate automated content categorization. However, identified limitations in processing non-standard formats and complex layouts highlight the need for further methodological improvements. Future enhancements include optimizing neural network architecture, expanding training datasets, and developing adaptive preprocessing algorithms to improve system reliability across diverse document types. These findings establish a foundation for developing more universal solutions for automated analysis of both structured and semi-structured PDF documents.

The contribution of the authors.

A.S.Mashkanov – development of the code, creation of article text.

Zh.Akhayeva – general management of the work, creation of the concept of research.

A.Zakirova – approval of the final version of the article for publication, critical review of the article's content.

References

1. Yu, C., Zhang, C., & Wang, J. (2020). Extracting body text from academic PDF documents for text mining. arXiv preprint arXiv:2010.12647.
2. Abibullayeva, Aiman & Baymakhanova, Aigerim. (2024). USING MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING TECHNIQUES IN KEYWORD EXTRACTION. Physico-mathematical series. 25-36. 10.32014/2024.2518-1726.289.
3. Belov, Sergey & Zrelova, Daria & Zrelov, Petr & Korenkov, Vladimir. (2020). Overview of methods for automatic natural language text processing. System Analysis in Science and Education. 8-22. 10.37005/2071-9612-2020-3-8-22.
4. Davletov A.R. (2023). MODERN MACHINE LEARNING METHODS AND OCR TECHNOLOGY FOR DOCUMENT PROCESSING AUTOMATION. Bulletin of Science, 5 (10 (67)), 676-698. doi: 10.24412/2712-8849-2023-1067-676-698
5. Livathinos, N., Berrospi, C., Lysak, M., Kuropiatnyk, V., Nassar, A., Carvalho, A., ... & Staar, P.

- (2021, May). Robust pdf document conversion using recurrent neural networks. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (Vol. 35, No. 17, pp. 15137-15145).
6. Patience, O. O., Amaechi, E. M., George, O., & Isaac, O. N. (2024). Enhanced Text Recognition in Images Using Tesseract OCR within the Laravel Framework. Asian Journal of Research in Computer Science, 17(9), 58-69.
 7. Akhil, S. (2016). An overview of tesseract OCR engine. In A seminar report. Department of Computer Science and Engineering National Institute of Technology, Calicut Monsoon.
 8. Bensahla A, Zaghir J, Gaudet-Blavignac C, Lovis C. Unsupervised Extraction of Body- Text from Clinical PDF Documents. Stud Health Technol Inform. 2024 Aug 22;316:214- 215. doi: 10.3233/SHTI240382. PMID: 39176711.
 9. Xu, Y., Li, M., Cui, L., Huang, S., Wei, F., & Zhou, M. (2020). LayoutLM: Pre-training of Text and Layout for Document Image Understanding. Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. DOI: 10.1145/3394486.3403172
 10. Huang, Y., Lv, T., Cui, L., Lu, Y., & Wei, F. (2022). LayoutLMv3: Pre-training for Document AI with Unified Text and Image Masking. Proceedings of the 30th ACM International Conference on Multimedia. DOI:10.1145/3503161.3548112
 11. Zhong, X., Tang, J., & Yepes, A. J. (2019). PubLayNet: Largest dataset ever for document layout analysis. 2019 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). DOI: 10.1109/ICDAR.2019.00166
 12. Appalaraju, S., et al. (2021). DocFormer: End-to-End Transformer for Document Understanding. ICCV 2021.
 13. Prasad, D., Gadpal, A., Kapadni, K., Visave, M., & Sultanpure, K. (2020). CascadeTabNet: An approach for end-to-end table detection and structure recognition from image-based documents. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2439-2447. DOI: 10.1109/CVPRW50498.2020.00294
 14. Ester, M., Krieger, H. P., Sander, J., & Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96), 226-231.
 15. Resnik, P., & Lin, J. (2010). Evaluation of NLP systems. The handbook of computational linguistics and natural language processing, 271-295.

А.Ш. Машканов*, Ж.Б. Ахаева, А.Б.Закирова

Л.Н. Гумилёв атындағы Еуразиялық Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан

**PDF файлдарынан мәзірлерді машиналық оқыту мен табиғи тілді өңдеу
тәсілдері арқылы автоматты түрде шығару және құрылымдау**

Аңдатпа. Бұл зерттеуде PDF құжаттарын автоматтандырылған өңдеудің заманауи тәсілдері қарастырылады, әсіресе құрылымы әлсіз мейрамхана мәзірлерін талдауға баса назар аударылады. Мәтіндік деректерді автоматтандырудың өзектілігі әртүрлі салалардағы цифрлық трансформация аясында зерттеледі. Заңнамалық актілер мен ғылыми жарияланымдар сияқты әртүрлі PDF құжаттарының құрылымдық ерекшеліктеріне салыстырмалы талдау жүргізіледі.

Зерттеу негізінен автоматтандырылған деректерді шығару, құрылымдау және семантикалық талдау мәселелерін шешуге арналған табиғи тілді өңдеу (NLP) технологиялары мен машиналық оқыту әдістерін біріктіретін кешенді әдістемелік тәсілді әзірлеуге бағытталған. Ұсынылған шешім мейрамхана мәзірлеріне тән құрылымы әлсіз PDF құжаттарын өңдеудегі шектеулерді еңсеруді мақсат етеді.

Түйін сөздер: PDF құжаттарын өңдеу, мәтінді талдауды автоматтандыру, құрылымы әлсіз деректер, мейрамхана мәзірлері, табиғи тілді өңдеу (NLP), машиналық оқыту, деректерді шығару, семантикалық талдау, қоғамдық тамақтану саласын цифрландыру

А.Ш. Машканов*, Ж.Б. Ахаева, А.Б.Закирова

Евразийский Национальный Университет им. Л.Н.Гумилёва, Астана, Казахстан

Автоматизированное извлечение и структурирование меню из PDF-файлов с использованием методов машинного обучения и обработки естественного языка (NLP).

Аннотация. Это исследование рассматривает современные подходы к автоматизированной обработке PDF-документов, с особым акцентом на анализ слабо структурированных ресторанных меню. Актуальность автоматизации обработки текстовых данных анализируется в контексте цифровой трансформации различных отраслей. Проводится сравнительный анализ структурных особенностей различных типов PDF-документов, включая нормативно-правовые акты и научные публикации. Основное внимание в работе уделяется разработке интегрированного методологического подхода, сочетающего технологии обработки естественного языка (NLP) и методы машинного обучения для решения задач автоматического извлечения данных, их структурирования и семантического анализа. Предлагаемое решение направлено на преодоление ограничений, связанных с обработкой слабо структурированных PDF-документов, характерных для ресторанных меню.

Ключевые слова: Обработка PDF-документов, автоматизация текстового анализа, слабо структурированные данные, ресторанные меню, обработка естественного языка (NLP), машинное обучение, извлечение данных, семантический анализ, цифровизация сферы общественного питания.

Information about the authors:

Mashkanov Arlan Sharipkhanovich – corresponding author, graduate school student in “Business analytics in IT”, Faculty of Information Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.

Akhayeva Zhanar Berikbaevna – PhD, Acting Associate Professor, Faculty of Information Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.

Zakirova Alma Bulatovna – Candidate of pedagogic sciences, Acting Associate Professor, Faculty of Information Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan.

Машканов Арлан Шарипханович – автор для корреспонденции, магистрант по

специальности “Бизнес аналитика в IT”, Факультет информационных технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, 010000, Казахстан.
Ахаева Жанар Берикбаевна – PhD, и.о.доцент, Факультет информационных технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, 010000, Казахстан.
Закирова Алма Булатовна – кандидат педагогических наук, и.о.доцент, Факультет информационных технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, 010000, Казахстан.

Машканов Арлан Шарипханович – хат-хабар үшін авторы, “IT саласындағы бизнес-аналитика” мамандығының магистратура студенті, Ақпараттық технологиялар факультеті, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, 010000, Қазақстан.

Ахаева Жанар Берикбаевна – PhD, доцент м.а., Ақпараттық технологиялар факультеті, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, 010000, Қазақстан.

Закирова Алма Булатовна – педагогика ғылымдарының кандидаты, доцент м.а., Ақпараттық технологиялар факультеті, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, 010000, Қазақстан 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/>)

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.
№4 (153)/2025 – Астана: ЕҰУ. – 268 б. Шартты б.т. – 15,7. Таралымы – сұраныс бойынша.

Басуға қол қойылды: 30.12.2025 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.