

Регистрационный
№ KZ71VPY00092356

ISSN 1561-4212
ISSN 2789-8210 (Online)
№ 3(109), сентябрь, 2025

Ғылыми журнал

Д. Серікбаев атындағы
Шығыс Қазақстан
техникалық университетінің

ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК

Восточно-Казахстанского
технического университета
им. Д. Серикбаева

Научный журнал

BULLETIN

of D. Serikbayev
East Kazakhstan
technical university

Scientific journal



1999 жылдан бастап шығады
Издается с 1999 года
Founded in 1999



Жылына 4 рет шығады
Выходит 4 раза в год
Published 4 times a year

Өскемен, 2025
Усть-Каменогорск, 2025
Ust-Kamenogorsk, 2025

Бас редакторы

С.Ж. Рахметуллина

техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор

Редакция алқасы:

Бас редактордың орынбасары:

Н.Ф. Денисова, физика-математика ғылымдарының кандидаты,

Жауапты хатшы – О.Н. Николаенко

Алқа мүшелері:

У.Б. Абдикерова, Dr.PhD (Қазақстан)

Абрахам Атта Огву, профессор (Ұлыбритания)

Д.Л. Алонцева, ф.-м.ғ.к., профессор (Қазақстан)

Бешо Масахико, Dr.PhD, профессор (Жапония)

И.А. Бессмертный, т.ғ.д., профессор (Ресей)

Вальдемар Войчик, т.ғ.д. (Польша)

С.А. Выжва, г.ғ.д., профессор (Украина)

М.В. Дудкин, т.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Н.К. Ердыбаева, ф.-м.ғ.д. (Қазақстан)

В.А. Кескинов, т.ғ.к., доцент (Ресей)

Ю.В. Крак, т.ғ.д., профессор (Украина)

О.Н. Кузмина, Dr.PhD, қауымдастырылған профессор (Қазақстан)

Н.А. Куленова, т.ғ.к., профессор (Қазақстан)

В.И. Логанина, т.ғ.д., профессор (Ресей)

С.В. Мамяченков, т.ғ.д., профессор (Ресей)

Игнасио Менендес Пидаль де Наваскес, профессор (Испания)

М. Млынчак, Dr. hab, профессор (Польша)

А.Д. Погребняк, ф.-м.ғ.д., профессор (Украина)

Н.В. Прохоренкова, Dr.PhD (Қазақстан)

М.Д. Старостенков, ф.-м.ғ.д., (Ресей)

Я. Стрычек, Dr. hab, профессор (Польша)

А.С. Тулебекова (Қазақстан)

С.В. Хромых, г.-м.ғ.д. (Ресей)

Н.А. Чарыков, х.ғ.д., профессор (Ресей)

Ю.Н. Шапошник, т.ғ.д., профессор (Ресей)

© Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан
техникалық университеті, 2025

Главный редактор

С.Ж. Рахметуллина

кандидат технических наук, ассоциированный профессор

Редакционная коллегия:

Заместитель главного редактора:

Н.Ф. Денисова, кандидат физико-математических наук,

Ответственный секретарь – О.Н. Николаенко

Члены коллегии:

У.Б. Абдикерова, Dr.PhD (Казахстан)

Абрахам Атта Огву, профессор (Великобритания)

Д.Л. Алонцева, к.ф-м н., профессор (Казахстан)

Бешо Масахико, Dr.PhD, профессор (Япония)

И.А. Бессмертный, д.т.н., профессор (Россия)

Вальдемар Войчик, д.т.н. (Польша)

С.А. Выжва, д.г.н., профессор (Украина)

М.В. Дудкин, д.т.н., профессор (Казахстан)

Н.К. Ердыбаева, д.ф-м.н. (Казахстан)

В.А. Кескинов, к.т.н., доцент (Россия)

Ю.В. Крак, д.т.н., профессор (Украина)

О.Н. Кузьмина, доктор PhD, асс. профессор (Казахстан)

Н.А. Куленова, к.т.н., профессор (Казахстан)

В.И. Логанина, д.т.н., профессор (Россия)

С.В. Мамяченков, д.т.н., профессор (Россия)

Игнасио Менендес Пидаль де Наваскес, профессор (Испания)

М. Млынчак, Dr. hab, профессор (Польша)

А.Д. Погребняк, д.ф.м.н., профессор (Украина)

Н.В. Прохоренкова, Dr.PhD (Казахстан)

М.Д. Старостенков, д.ф-м.н., (Россия)

Я. Стрычек, Dr. hab, профессор (Польша)

А.С. Тулебекова (Казахстан)

С.В. Хромых, д.г.-м.н. (Россия)

Н.А. Чарыков, д.х.н., профессор (Россия)

Ю.Н. Шапошник, д.т.н., профессор (Россия)

Chief Editor

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor –
S. Rakhmetullina

Editorial Team:

Deputy Chief Editor

Natalya Denissova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Executive Secretary – Oksana Nikolaenko

Members of Team:

Uliya Abdikerova, Dr. PhD (Kazakhstan)
Abraham Atta Ogwu, professor (Great Britain)
Darya Alontseva, Candidate of Phys.-math. sciences, professor (Kazakhstan)
Masahiko Bessho, Dr.PhD, professor (Japan)
Igor Bessmertnyy, Dr. techn. sciences, professor (Russia)
Waldemar Wojcik, Dr. techn. sciences, professor (Poland)
Sergey Vyzhva, Geophysics Dr. geolog. sciences, professor (Ukraine)
Mikhail Dudkin, Dr. techn. sciences, Professor (Kazakhstan)
Nazgul Yerdybayeva, Dr. phys.-math. sciences, professor (Kazakhstan)
Viktor Keskinov, PhD in Chemistry sciences (Russia)
Yuri Krak, Dr. techn. sciences, Professor (Ukraine)
Oxana Kuzmina, Dr.PhD, Assistant professor (Kazakhstan)
Natalya Kulenova, Cand. techn. sciences, Professor (Kazakhstan)
Valentina Loganina, Dr. techn. sciences, Professor (Russia)
Sergey Myamyachenkov, Dr. techn. sciences (Russia)
Ignacio Menéndez-Pidal de Navascués, Professor (Spain)
Marek Mlyncek, Dr. hab, professor (Poland)
Aleksandr Pogrebnyak, Dr. phys.-math. sciences, professor (Ukraine)
Nadezhda Prokhorenkova, Dr.PhD (Kazakhstan)
Mikhail Starostenkov, Dr. phys.-math. sciences, professor (Russia)
Jaroslaw Strycek, Dr. hab, professor (Poland)
Assel Tulebekova (Kazakhstan)
Sergey Khromykh, Dr. geolog.-mineral. sciences (Russia)
Nikolay Charykov, Dr. of Chemistry (Russia)
Yuri Shaposhnik, Dr. techn. sciences, professor (Russia)



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_5
MPNТИ 55.57.99

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕССОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФИТОМИНЕРАЛЬНО-СОЛЕВЫХ БРИКЕТОВ-ЛИЗУНЦОВ ДЛЯ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА

ІРІ ҚАРА МАЛҒА АРНАЛҒАН ФИТО МИНЕРАЛДЫ-ТҰЗДЫ ЖАЛАУ БРИКЕТТЕРІН ЖАСАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА ПРЕСТЕУ ДІ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

OPTIMIZATION OF PRESSING IN THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING PHYTO-MINERAL-SALT BRIQUETTES FOR CATTLE

Е.А. Асанғалиев ¹, М.С. Данилов ¹, М.В. Дудкин ¹,
С.С. Лутай ^{1*}, Ж.С. Қалибек ¹

¹НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева»,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Лутай Сергей Сергеевич, e-mail: sslutai@mail.ru

Ключевые слова:

коровы, микроэлементы,
фитоминерально-солевые
брикеты-лизунцы,
давление, влажность,
плотность, прочность

АННОТАЦИЯ

В представленной статье раскрыты не только необходимые условия хранения, но и технология изготовления, параметры и состав минерально-витаминных солевых премиксов-лизунцов, длительное время не теряющих как своих полезных свойств, так и целостности формы и привлекательного внешнего вида. Цель исследования: определить оптимальное прессование в технологии изготовления фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов для крупного рогатого скота. Достоинством работы является использование в качестве фитодобавок почти бесплатного сырья, характерного для Восточного Казахстана, – хвои пихты сибирской, которой много остается после лесозаготовок и которая подлежит утилизации. Причин недолговечности формы брикетов-лизунцов несколько, и одной из них является величина дробления фракций фитодобавок, например хвои пихты сибирской, чрезмерное измельчение которых ведет к сокращению полезных веществ в них, но зато с такими добавками солевая смесь хорошо прессуется и держит форму. При увеличении фракций твердость брикета-лизунца, а соответственно, и сроки его хранения снижаются. Нахождению золотой середины параметров количества и качества добавок в солевую смесь при приготовлении солевых брикетов-лизунцов посвящена эта работа. Изучение технологии создания фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов показало, что оптимальным в процессе их изготовления является прессование при давлении 40 МПа, когда брикеты приобретают плотность $1,763 \pm 0,146$ г/см³ и прочность $6,68 \pm 0,56$ МПа. При длительном хранении плотность и прочность фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов меняются незначительно. Однако это не снижает их привлекательности для животных и соответственно слизываемости. Полученные фитоминерально-солевые брикеты-лизунцы, состоящие из кормовой соли с добавлением микроэlemen-



тов и хвой пихты сибирской, являются полезной для коров кормовой добавкой в виде брикетов-лизунцов.

Түйінді сөздер:

сиырлар,
микроэлементтер,
фитоминералды-тұзды
брикеттер-жалауыш,
қысым, ылғалдылық,
тығыздық, беріктік

ТҮЙІНДЕМЕ

Ұсынылған мақалада сақтаудың қажетті шарттары ғана емес, сонымен қатар минералды-дәруменді тұз премикстерінің-жалаудың параметрлері мен құрамы, ұзақ уақыт бойы өзінің пайдалы қасиеттерін де, пішінінің тұтастығы мен сыртқы түрінің тартымдылығын да жоғалтпайды. Зерттеудің мақсаты: ірі қара малға арналған фитоминералды-тұзды жалауыш брикеттерін жасау технологиясында оңтайлы пресстеуді анықтау. Жұмыстың басты ерекшелігі-Шығыс Қазақстанның жергілікті жағдайларына тән дерлік тегін шикізатты – ағаш кесуден кейін көп қалатын және кәдеге жаратуға жататын сібір майқарағайының жапырақты инелерін фито-қоспалар ретінде пайдалану. Брикет-лизунец формасының қысқа өмір сүруінің бірнеше себептері бар, олардың бірі-фито-қоспалардың фракцияларының ұсақталу мөлшері, мысалы, сібір майқарағайының жапырақты инелері, олардың шамадан тыс ұнтақталуы ондағы қоректік заттардың азаюына әкеледі, бірақ мұндай қоспалармен тұз қоспасы жақсы басылады және пішінін сақтайды. Фракциялардың ұлғаюымен брикет-лизунецтің қаттылығы және сәйкесінше оның сақтау мерзімі төмендейді. Бұл жұмыс тұзды жалауыш брикеттерін дайындауға арналған тұз қоспасындағы қоспалардың параметрлерінің, саны мен сапасының "алтын ортасын" табуға арналған. Фитоминералды-тұзды лизунц брикеттерін жасау технологиясын зерттеу оларды өндіру процесінде оңтайлы 40 МПа қысымда пресстеу болып табылатынын көрсетті, онда брикеттердің тығыздығы $1,763 \pm 0,146$ г/см³ және беріктігі $6,68 \pm 0,56$ МПа болады. Ұзақ мерзімді сақтау кезінде фитоминералды-тұзды жалауыш брикеттердің тығыздығы мен беріктігі аздап өзгереді. Алайда, бұл олардың жануарлардағы азықтық ретінде тартымдылығын және сәйкесінше жалауын төмендетпейді. Алынған фитоминералды-тұзды брикеттер-микроэлементтер мен сібір майқарағайының жапырақты инелері қосылған жемшөп тұзынан тұратын лизунцы-сиырлардың денесінің ағзалары үшін брикет-лизунец түрінде пайдалы азықтық қоспаларына жатады.

Keywords:

cows, microelements,
phyto-mineral-salt
briquettes, pressure,
humidity, density, strength

ABSTRACT

The presented article reveals the necessary conditions not only for storage, but also the manufacturing technology, parameters and composition of mineral-vitamin salt premixes, which for a long time do not lose their useful properties, as well as the integrity of their shape and attractive appearance. The purpose of the study: to determine the optimal pressing in the technology of manufacturing phytomineral salt briquettes for cattle. The highlight of the work is the use of almost free raw materials inherent in the local conditions of Eastern Kazakhstan as phyto-additives – Siberian fir needles, which remain a lot after logging, and which must be disposed of. There are several reasons for the fragility of the shape of briquettes, and one of them is the amount of crushing of fractions of phyto-additives, for example, Siberian fir needles, excessive crushing of which leads to a reduction in useful substances in it, but with such additives the salt mixture is well pressed and holds its shape. As the fractions increase, the hardness of the slime briquette and, consequently, its shelf life decrease. This work is devoted to finding the "golden mean"



of the parameters, quantity and quality of additives in the salt mixture for the preparation of salt briquettes. The study of the technology of creating phytomineral salt briquettes showed that pressing at a pressure of 40 MPa is optimal in the process of their manufacture, at which the briquettes acquire a density of $1,763 \pm 0.146$ g/cm³ and a strength of 6.68 ± 0.56 MPa. During long-term storage, the density and strength of phytomineral salt briquettes change slightly. However, this does not reduce their attractiveness in animals and, consequently, their licking ability. The obtained phytomineral-salt briquettes, consisting of feed salt with the addition of trace elements and needles of Siberian fir, are a feed additive useful for the body of cows in the form of briquettes.

ВВЕДЕНИЕ

Продуктивность сельскохозяйственных животных зависит как от обеспеченности животных достаточным количеством кормов, так и наличия в рационе физиологически необходимых для организма животных микро- и макроэлементов. Наиболее важное значение из числа последних имеет соединение натрия, наибольшее количество которого находится в поваренной соли. Вследствие этого сельскохозяйственным животным необходимо постоянно вводить в рацион поваренную соль, которая применяется в животноводстве в виде кормовой добавки в качестве соли-лизунца (Жазыбеков Н.А. и др., 2008; Петрухин И.В., 1989).

В технологическом процессе изготовления соли-лизунца имеется возможность обогащать соль различными микроэлементами и витаминами с последующим прессованием минерально-солевой смеси в брикеты-лизунцы. Полученные под определенным давлением брикеты являются удобными при хранении и физиологически оптимальными в применении для животных в виде лизунцов (Ахметова А.С. и др., 2015; Лыткина Л.И. и др., 2017).

Преимущество кормовых добавок в виде лизунцов с солью связано также с тем, что у крупного рогатого скота активная выработка слюны обеспечивается в процессе лизания соли определенной плотности. Обильная слюна размягчает корм уже на этапе его поступления в ротовую полость и облегчает его дальнейшее усвоение (Калашников А.П. и др., 2003; Кальницкий Б.Д., 1985; Mormall H., 1973).

При изучении минерального состава кормов для крупного рогатого скота в животноводческих хозяйствах Восточного Казахстана установлено, что в сене, силосе и соломе содержание калия, железа, меди и цинка снижено. В организмах коров (крови и волосе) также наблюдалась пониженная концентрация этих микроэлементов в сухостойный и лактационный периоды, что свидетельствует о развитии их дефицита в организме (Данилов М.С. и др., 2016).

Данные минеральные компоненты обеспечивают построение костной ткани, участвуют в пищеварительном процессе, поддерживают осмотическое давление и кислотно-щелочное равновесие в организме. Все клетки организма содержат минеральные вещества в виде растворов или в составе органических соединений. Синтез жиров, белков и углеводов, гормональное состояние организма, водный режим, кроветворение и другие физиологические процессы невозможны без участия указанных минеральных соединений (Казбулатов Г.М., 2006; Хохрин С.Н., 2007; Miller E.R., 1983; Simmerman A.N. et al., 1966).

Для устранения минеральной и витаминной недостаточности в организмах коров созданы фитоминерально-солевые брикеты-лизунцы с добавлением нужных микроэлементов и витаминов. Разработанные брикеты показали положительное воздействие на организмы коров и телят (Асангалиев Е.А. и др. 2023).



Вместе с тем при создании брикетов-лизунцов такого состава, при котором в единый комплекс введены соль, различные микроэлементы и растительные компоненты, необходимо оптимизировать величину давления в процессе их прессования для придания соответствующей формы. Это крайне важно, так как у брикетов должно быть такое физическое состояние, которое позволит осуществлять коровам их физиологическое лизание и соответственно усваивать соль и находящиеся в ней микроэлементы и витамины. Изучение процесса соединения соли, минеральных и растительных компонентов и состояния созданной кормовой добавки является крайне важным для практического применения ее в животноводстве.

Цель настоящей работы – определить оптимальное давление при прессовании в технологии изготовления фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов для крупного рогатого скота и изучить их свойства при длительном хранении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изготовления фитоминерально-солевых брикетов за основу взяли кормовую соль для введения в нее минеральных и витаминных компонентов. Вследствие того, что в организмах коров, которые содержатся в крестьянских хозяйствах Восточного Казахстана, наблюдается недостаточное содержание калия, железа, меди и цинка, в качестве минеральных элементов в состав солевых брикетов-лизунцов ввели сернокислое железо, углекислый цинк, йодистый калий и углекислую медь. В качестве источника витаминов растительного происхождения, богатого витамином С, взяли хвою пихты сибирской, которую предварительно измельчили до величины частиц 0,1-0,2 мм.

В состав одного брикета-лизунца вводили:

- сернокислое железо – 30 г;
- углекислый цинк – 46 г;
- йодистый калий – 3 г;
- углекислую медь – 3,6 г;
- хвою пихты сибирской – 50 г;
- соль кормовую – до 5000 г.

Данное количество и соотношение компонентов взято исходя из суточной потребности в указанных микроэлементах одной коровы. Средняя слизываемость соли из брикетов у коров, по нашим наблюдениям, составляет от 30 до 50 г в сутки. Последнее соответствует минимальной суточной потребности соли у коров. Солевые брикеты имеют вес 5 кг, что составляет 100 доз для крупного рогатого скота.

Хвоя пихты сибирской в сухом и измельченном состоянии является объемной и, распределяясь по всему солевому брикету, придает ему зеленый оттенок.

Смешивание всех составляющих компонентов осуществляли на смесителе сыпучих материалов ВПСМ-50 в емкости из нержавеющей стали.

При разработке технологического процесса для изготовления брикетов-лизунцов прессование осуществляли сухим методом на специализированном прессе для изготовления брикетов-лизунцов на предприятии ИП «Калиакпаров У», при давлении в камере 20, 30, 40, 50 и 60 МПа. Формовочная камера прессы изготовлена из толстостенной нержавеющей стали, способной выдержать высокое давление, которое создается с помощью гидравлической системы. Размеры камеры 15×15×15 см позволяют получать брикеты оптимальных размеров (рис. 1).

У полученных фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов определяли основные технологические показатели: внешний вид, массу, влажность, плотность и прочность. Массу определяли на электронных весах CAS SW-20, влажность с помощью контактного электрического влагомера МГ 4.



Рисунок 1. Пресс для изготовления брикетов-лизунцов

Примечание – составлено автором

Наиболее важными технологическими показателями кормовых добавок являются их плотность и прочность. От них зависит качество изделий, их структура, точность дозирования и биодоступность действующих веществ (Каширина Л.Г., 1984; Лыткина Л.И. и др., 2017).

Плотность рассчитывали по формуле

$$P=M/V \quad (1)$$

где: P – плотность вещества (брикетов);

M – масса брикета (г);

V – объём брикета (см³).

Прочность определяли на гидравлическом прессе (рис. 2).



Рисунок 2. Гидравлический пресс для определения прочности брикетов-лизунцов

Примечание – составлено автором

Указанные показатели исследовали у свежеприготовленных брикетов, а также через 6 и 12 месяцев хранения. Для хранения использовали брикеты-лизунцы, полученные при давлении 40 МПа. Хранение осуществляли в сухом, проветриваемом помещении при комнатной температуре.

Полученные данные анализировали методом математической статистики (Лакин Г.Ф., 1980).

Также крайне важным является изучение сохранности биологической привлекательности фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов для животных при хранении в течение 6 и 12 месяцев.

С этой целью на животноводческой ферме крестьянского хозяйства «Багратион» Уланского района Восточно-Казахстанской области в летний период 2023 г. было отобрано 48 коров лактационного периода, которых разделили на 4 группы по 12 голов (3 опытные и 1 контрольная). Животные опытных групп в течение 2 месяцев получали фитоминерально-солевые брикеты-лизунцы различного срока хранения: 1-й группы – свежеприготовленные, 2-й группы – брикеты-лизунцы, которые предварительно хранились 6 месяцев, 3-й группы – имеющие срок хранения 12 месяцев. Коровы в контрольной группе также в течение 2 месяцев получали солевые брикеты-лизунцы. Брикеты размещали в кормовой зоне коров. Суточный рацион у коров состоял из зеленой травы – вволю, а также 2-3 кг концентратов и составлял 12-14 к.е.

При этом учитывали привлекательность полученных брикетов для коров и интенсивность их лизания. За коровами осуществляли клинические наблюдения.

Наблюдения за животными проводили согласно Закона Республики Казахстан «О ветеринарии» (Закон Республики Казахстан «О ветеринарии» от 10 июля 2002 года № 339.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате прессования получали фитоминерально-солевые брикеты-лизунцы размером 15×15 см, высотой 12 см зеленого оттенка (рис. 3).



Рисунок 3. Брикеты-лизунцы для крупного-рогатого скота

Примечание – составлено автором

Средняя масса брикетов составляла $5000 \pm 0,086$ г. Показатели массы как фитоминеральных, так и солевых брикетов оставались постоянными при всех величинах давления. Влажность фитоминерально-солевых брикетов находилась в пределах $12,6 \pm 1,6$ % при всех показателях давления, у солевых брикетов этот показатель составлял $11,8 \pm 1,4$ %.

Высота брикетов в исходном состоянии находилась в пределах $15 \pm 0,5$ см, но в процессе прессования уменьшалась как у фитоминерально-солевых, так и у солевых



брикетов до $12,2 \pm 0,3$ см при давлении 40 МПа. Более высокое давление при прессовании статистически достоверного уменьшения высоты брикетов не оказывало (табл. 1). Соответственно объём брикетов-лизунцов в обоих случаях составил 2700 ± 32 см³.

Таблица 1. Некоторые физико-технологические показатели фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов при различном давлении при прессовании

№ образца	Давление при прессовании (МПа)	Высота брикета (см)		Плотность брикета (г/см ³)		Прочность брикета (МПа)	
		фито-минеральный	солевой	фито-минеральный	солевой	фито-минеральный	солевой
Исходное состояние		$15 \pm 0,5$	$15 \pm 0,5$				
1	10	$14,7 \pm 0,5$	$14,6 \pm 0,5$	$1,512 \pm 0,138$	$1,522 \pm 0,126$	$2,22 \pm 0,16$	$2,44 \pm 0,18$
2	20	$14,3 \pm 0,5$	$14,2 \pm 0,5$	$1,554 \pm 0,128$	$1,565 \pm 0,128$	$3,46 \pm 0,24$	$3,62 \pm 0,28$
3	30	$13,4 \pm 0,3$	$13,1 \pm 0,3$	$1,658 \pm 0,136$	$1,696 \pm 0,134$	$5,28 \pm 0,32$	$5,78 \pm 0,34$
4	40	$12,6 \pm 0,3$	$12,1 \pm 0,3$	$1,763 \pm 0,146$	$1,836 \pm 0,158$	$6,68 \pm 0,56$	$7,24 \pm 0,58$
5	50	$12,2 \pm 0,3$	$12,0 \pm 0,3$	$1,821 \pm 0,156$	$1,852 \pm 0,152$	$7,25 \pm 0,60$	$8,06 \pm 0,64$
6	60	$11,8 \pm 0,3$	$11,7 \pm 0,3$	$1,883 \pm 0,168$	$1,899 \pm 0,166$	$8,17 \pm 0,66$	$8,55 \pm 0,72$

Примечание: $n=8$; составлено автором

Проведенные исследования и математические расчеты показали, что исходная плотность у фитоминерально-солевых брикетов составляет $1,512 \pm 0,138$ г/см³, у солевых – $1,522 \pm 0,126$ г/см³. При повышении давления в процессе прессования до 40 МПа плотность фитоминерально-солевых брикетов повышалась до $1,763 \pm 0,146$ г/см³, у солевых брикетов этот показатель имел значение $1,836 \pm 0,148$ г/см³. В обоих случаях повышение плотности происходит на 12,1 % относительно исходного состояния и является достоверным ($P < 0,05$). При более высоком давлении плотность как фитоминеральных брикетов, так и солевых, увеличивается незначительно. Более низкая плотность фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов может быть связана с тем, что измельченная хвоя пихты и микроэлементы имеют несколько больший объём по сравнению с солью.

Прочность брикетов также достоверно возрастает в процессе прессования при давлении от 10 до 40 МПа и составляет у фитоминерально-солевых брикетов $6,68 \pm 0,56$ МПа, у солевых – $7,24 \pm 0,58$ МПа. В обоих случаях $P < 0,05$. При дальнейшем повышении давления в процессе прессования интенсивность увеличения прочности в брикетах замедляется, и она менее достоверна ($P < 0,5$).

Необходимо отметить, что брикеты, как фитоминеральные, так и солевые, полученные при давлении 20-30 МПа были менее плотными и прочными и рассыпались при незначительном физическом воздействии.

Далее были изучены указанные физико-технологические показатели фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов при длительном хранении. Для хранения использовали брикеты-лизунцы, полученные при давлении 40 МПа, обеспечивающем брикетам оптимальные технологические свойства. Установлено, что в процессе хранения происходит уменьшение массы фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов на 120 г и солевых брикетов на 160 г. В обоих случаях $P < 0,05$. Разница в снижении массы может быть связана с тем, что разнородность структуры фитоминерально-солевых брикетов сдерживает процесс потери влаги (табл. 2). Объём брикетов достоверно не изменялся.

Уменьшение массы связано со значительной потерей влаги в брикетах в процессе хранения. У фитоминерально-солевых брикетов влажность снижается до $3,8 \pm 0,4$ %, у



солевых до $3,4 \pm 0,4$ %. В обоих случаях также $P < 0,05$. Соответственно указанные изменения приводят к некоторому изменению плотности как у фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов, так и солевых. Однако эти изменения статистически недостоверны.

Таблица 2. Некоторые физико-технологические показатели фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов при длительном хранении

Показатели	Брикеты	Показатели брикетов		
		исходная	через 6 месяцев	через 12 месяцев
Масса (г)	фитоминерально-солевой	$5000 \pm 0,086$	$4930 \pm 0,085$	$4880 \pm 0,082$
	солевой	$5000 \pm 0,086$	$4910 \pm 0,082$	$4840 \pm 0,081$
Влажность (%)	фитоминерально-солевой	$12,6 \pm 1,1$	$6,6 \pm 0,6$	$3,8 \pm 0,4$
	солевой	$11,8 \pm 1,1$	$6,2 \pm 0,6$	$3,4 \pm 0,4$
Плотность (г/см ³)	фитоминерально-солевой	$1,763 \pm 0,146$	$1,825 \pm 0,138$	$1,807 \pm 0,134$
	солевой	$1,836 \pm 0,158$	$1,818 \pm 0,142$	$1,792 \pm 0,132$
Прочность (МПа)	фитоминерально-солевой	$6,68 \pm 0,56$	$9,46 \pm 0,60$	$10,24 \pm 0,64$
	солевой	$7,24 \pm 0,58$	$9,46 \pm 0,60$	$11,42 \pm 0,68$

Примечание: $n = 8$; составлено автором

В то же время при хранении происходит повышение показателей прочности как у фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов до $10,24 \pm 0,64$ МПа, так и у солевых – до $11,42 \pm 0,68$ МПа. Наиболее достоверно это наблюдается у брикетов в течение 12 месяцев хранения ($P < 0,05$).

При наблюдении за коровами, получающими разработанные брикеты-лизунцы, установлено, что фитоминерально-солевые брикеты, как и солевые, по вкусовым качествам являются привлекательными для коров. Во всех группах животные охотно лизали брикеты независимо от срока хранения. В течение суток коровы слизывали от 30 до 50 г фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов. Животные контрольной группы слизывали такой же объём соли.

Одновременно с солью происходит соответствующее поступление в организм недостающих микроэлементов калия, железа, меди и цинка, а также витаминов хвои пихты сибирской. Существующие плотность и прочность не позволяют брикетам разрушаться при их нахождении в кормовой зоне загона и в процессе лизания коровами. Полная слизываемость коровами как фитоминерально-солевых, так и солевых брикетов-лизунцов происходила в течение 8-9 дней.

Каких-либо патологических отклонений в физиологическом состоянии животных как в опытных группах, так и контрольной в период наблюдений не отмечено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, оптимальным в процессе изготовления фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов является их прессование при давлении 40 МПа, при котором брикеты приобретают плотность $1,763 \pm 0,146$ г/см³ и прочность $6,68 \pm 0,56$ МПа. Данные показатели при длительном хранении меняются незначительно, что сохраняет их привлекательность для животных и соответственно слизываемость. Состояние существующей плотности и прочности не позволяет брикетам разрушаться при их нахождении в кормовой зоне загона и в процессе лизания коровами.



Полученные фитоминерально-солевые брикеты-лизунцы, состоящие из кормовой соли с добавлением микроэлементов и хвои пихты сибирской, являются для организма коров полезной кормовой добавкой.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP19678322 «Разработка комплекса машин и технологии для производства минерально-витаминных премиксов-лизунцов для крупного рогатого скота».

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки Республики Казахстан за грантовое финансирование в рамках проекта AP19678322 «Разработка комплекса машин и технологии для производства минерально-витаминных премиксов-лизунцов для крупного рогатого скота».

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы научной статьи заявляют, что не использовали технологии искусственного интеллекта при написании статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асангалиев Е.А., Дудкин М.В., Данилов М.С., Воробьев А.Л., Лутай С.С. (2023). Минерально-солевые брикеты-лизунцы с хвоей пихты сибирской для крупного рогатого скота. Вестник ВКТУ, №4, 60-68. // Asangaliev E.A., Dudkin M.V., Danilov M.S., Vorobev A.L., Lutai S.S. (2023). Mineralno_solevie briketi-lizunci s hvoei pihti sibirskoi dlya krupnogo rogatogo skota. Vestnik VKTU, №4, 60-68.
- Ахметова А.С., Поезжаев В.М. (2015). Технология изготовления минерально-солевых брикетов с микроэлементами способом вибропрессования. Сб. науч. тр. Всероссийского НИИ овцеводства и козоводства. Т. 1., № 8, 15-18. // Ahmetova A.S., Poezjaev V.M. (2015). Tehnologiya izgotovleniya mineralno_solevih briketov s mikroelementami sposobom vibropressovaniya. Sb. nauch. tr. Vserossiiskogo NII ovcevodstva i kozovodstva. T. 1., № 8., 15-18.
- Данилов М.С., Воробьев А.Л. Асангалиев Е.А., Лутай С.С. (2016). Минеральное обеспечение коров в крестьянских хозяйствах Восточного Казахстана. Научный журнал Казахского Национального аграрного университета «Исследования, результаты». №3, 31-38. // Danilov M.S., Vorobev A.L. Asangaliev E.A., Lutai S.S. (2016). Mineralnoe obespechenie korov v krestyanskih hozyaistvah Vostochnogo Kazahstana. Nauchnii jurnal Kazahskogo Nacionalnogo agrarnogo universiteta «Issledovaniya_ rezultati». №3, 31-38.
- Закон Республики Казахстан «О ветеринарии» от 10 июля 2002 года № 339. // Zakon Respubliki Kazakhstan «O veterinarii» ot 10 iyulya 2002 goda № 339.
- Жазыбеков Н.А., Кинеев М.А. (2008). Кормление сельскохозяйственных животных, птицы и технология кормов в современных условиях. Справочное пособие. Алматы. Бастау, 436 с. // Jazibekov N.A., Kineev M.A. (2008). Kormlenie selskohozyaistvennihivotnih_ptici i tehnologiya kormov v sovremennih usloviyah. Spravochnoe posobie. Almati. Bastau, 436 s.
- Казбулатов Г.М. (2006). Научные аспекты минерального питания коров в Республике Башкортостан. //Автореф. дис. докт. с.-х.наук. – Уфа, 39 с. // Kazbulatov G.M. (2006). Nauchnie aspekti mineralnogo pitaniya korov v Respublike Bashkortostan. //Avtoref. dis. dokt. s.-h.nauk. – Ufa, 39 s.
- Калашников А.П., Клейменов Н.И., Баканов В.Н. (2003). Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. Справочное пособие. М., Агропромиздат, 432 с. // Kalashnikov A.P., Kleimenov N.I., Bakanov V.N. (2003) Normi i racioni kormleniya selskohozyaistvennihivotnih. Spravochnoe posobie. M.- Agropromizdat, 432 s.



- Кальницкий Б.Д. (1985). Минеральные вещества в кормлении животных. – М., Агропромиздат, 207 с. // Kalnickii B.D. (1985) Mineralnie veschestva v kormleniiivotnih. M.- Agropromizdat, 207 s.
- Каширина Л.Г. (1984). Физико-механические свойства брикетов и их влияние на пищеварение, обмен веществ и продуктивность коров. // Автореф. дис. канд. биол. наук.- Рязань, 24 с. // Kashirina L.G. (1984). Fiziko_mehanicheskie svoistva briketov i ih vliyanie na pischevarenie i obmen veschestv i produktivnost korov. // Avtoref. dis. kand. biol. nauk.- Ryazan, 24 s.
- Лакин Г.Ф. (1980). Биометрия. М. Высшая школа, 291 с. // Lakin G.F. (1980). Biometriya. M. Visshaya shkola, 291 s.
- Лыткина Л.И., Шенцова Е.С., Апалихина О.А., Переверзева С.А. (2017). Оптимизация технологии кормовых брикетов-лизунцов с применением парокompрессионного насоса. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. Т. 79., №2, 61-67. // Litkina L.I., Shencova E.S., Apalihina O.A., Pereverzeva S.A. (2017). Optimizaciya tehnologii kormovih briketov_lizuncov s primeneniem parokompresionnogo nasosa. Vestnik Voronejskogo gosudarstvennogo universiteta injenernih tehnologii. T .79., №2, 61-67.
- Петрухин И.В. (1989). Корма и кормовые добавки. Справочник. – М., Росагропромиздат., 526 с. // Petruhin I.V. (1989). Korma i kormovie dobavki. Spravochnik. – M. Rosagropromizdat., 526 s.
- Хохрин С.Н. (2007). Кормление сельскохозяйственных животных. Учебное пособие. М., Колос., 692 с. // Hohrin S.N. (2007). Kormlenie selskohozyaistvennihivotnih. Uchebnoe posobie. M.- Kolos., 692 s.
- Miller E.R. (1983). Techniques for determining bioavailability of trace elements. //Ann.Internat. Minerals Conf. Florida., 23-40.
- Mormall H. (1973). Effects of cations on the activation of salivary amylase. – J. Dent. Res., V. 52, №5, 186 – 198.
- Simmerman A.N., Hulsann W.C. (1966). Paradoxical influence of calcium ions on the permeability of the cell membranes of the isolated rat heart. Nature., V. 211, №49., 646-647.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Асанғалиев Елибек Атрауович – а/ш. ғ.к., «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ қауымдастырылған профессоры, Өскемен қ., Қазақстан
Асанғалиев Елибек Атрауович – к.с/х.н., ассоциированный профессор НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева», г. Усть-Каменогорск, Казахстан
Asangaliyev Yelibek Atraovich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the NAO "D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University", Kazakhstan
e-mail: elibek60@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9007-3689>



Данилов Михаил Сергеевич – в. ф. к., "Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті" КЕАҚ қауымдастырылған профессоры

Данилов Михаил Сергеевич – к.в.н., ассоциированный профессор НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева»

Danilov Mikhail Sergeevich – Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor of the NAO "D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University"

e-mail: danilov-ms@yandex.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2826-8007>



Дудкин Михаил Васильевич – т. ф. д., профессор, «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ профессоры

Дудкин Михаил Васильевич – д.т.н., профессор, профессор НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева»

Dudkin Mikhail Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the NAO «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University»

e-mail: vas_dud@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5732-0724>



Лутай Сергей Сергеевич – ауыл шаруашылығы ғылымдарының магистрі, «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ аға оқытушысы

Лутай Сергей Сергеевич – магистр сельскохозяйственных наук, старший преподаватель НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева»

Lutai Sergey Sergeevich – Master of Agricultural Sciences, Senior lecturer at the D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University

e-mail: sslutai@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2238-9083>



Қалибек Жадыра Серікқызы – «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ 8D07102 – Машина жасау мамандығының 1 курс докторанты

Қалибек Жадыра Серікқызы – докторант 1 курса специальности 8D07102 – Машиностроение НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева»

Kalibek Zhadyra Serikovna – 1st year doctoral student of the specialty 8D07102 – Mechanical Engineering of the East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev

e-mail: jadyrakalibekova@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8322-1894>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_16

FTAXP 622.276.52

СУЫҚ КЛИМАТ ЖАҒДАЙЫНДА ҚЫСЫМЫ ТӨМЕН ІЛЕСПЕ МҰНАЙ ГАЗЫН БҰРАНДАЛЫ КОМПРЕССОРЛАРМЕН СЫҒУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПРИМИРОВАНИЯ НИЗКОНАПОРНОГО ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА ВИНТОВЫМИ КОМПРЕССОРАМИ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

OPTIMIZATION OF COMPRESSION OF LOW-PRESSURE ASSOCIATED PETROLEUM GAS BY SCREW COMPRESSORS IN COLD CLIMATE CONDITIONS

Д.Ж. Басқанбаева ¹, К.К. Елемесов ¹, Л.Б. Сабирова ¹, Д.М. Мырзабекова ^{2*}

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Мырзабекова Динара Мырзабекқызы, DMyrzabekova@ektu.kz

Түйінді сөздер:

бұрандалы компрессор,
ілеспе мұнай газы, қысу,
төмен қысым, жоғары
тығыздық, суық климат,
жетілдіру, сенімділік.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыста Қарашығанақ кен орны мысалында суық климат жағдайында маймен толтырылған бұрандалы компрессорлармен тығыздығы жоғары қысымы төмен ілеспе мұнай газын сығу ерекшеліктері қарастырылады. Сығу компрессорлық қондырғыларын пайдалану тәжірибесін талдау барысында май жүйесінен майдың шығуына, компрессордың жұмыс ұяшығында конденсаттың түзілуіне және төмен температурада май айналымының бұзылуына байланысты бірқатар мәселелер анықталды. Осы мәселелерді шешу үшін жабдықты жаңарту және жұмыс режимдерін оңтайландыруды қамтитын кешенді тәсіл ұсынылды. Атап айтқанда, майдың шығып кетуін болдырмас үшін серіппелі тоқтатқышы бар жылдам әсер ететін кіріс клапандары әзірленді және енгізілді, конденсатты азайту үшін май мен газдың жұмыс температурасы көтерілді, сондай-ақ теріс температурада май айналымын жақсарту үшін жылу алмасу жүйесі жаңартылды. Зерттеу нәтижелері ұсынылған шешімдерді енгізгеннен кейін компрессорлық қондырғылардың сенімділігі мен тиімділігінің айтарлықтай жақсарғанын көрсетті, бұл кәдеге жаратылатын төмен қысымды ілеспе мұнай газының көлемін ұлғайтуға және қоршаған ортаға тигізетін теріс әсерін азайтуға мүмкіндік береді.

Ключевые слова:

Винтовой компрессор,
попутный нефтяной газ,
компримирование, низкое
давление, высокая плот-
ность, холодный климат,
модернизация, надежность.

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматриваются особенности компримирования низконапорного попутного нефтяного газа высокой плотности винтовыми маслозаполненными компрессорами в условиях холодного климата на примере Карачаганакского месторождения. Анализ опыта эксплуатации дожимных компрессорных установок выявил ряд проблем, связанных с выбросом масла из маслосистемы, образованием конденсата в рабочих ячейках компрессора и нарушением



циркуляции масла при низких температурах. Для решения этих проблем предложен комплексный подход, включающий модернизацию оборудования и оптимизацию рабочих режимов. В частности, разработаны и внедрены быстродействующие входные клапаны отсекающими для предотвращения выбросов масла, повышены рабочие температуры масла и газа для снижения конденсации, а также модернизирована система теплообмена для улучшения циркуляции масла при отрицательных температурах. Результаты исследований показали значительное повышение надежности и эффективности работы компрессорных установок после внедрения предложенных решений, что позволяет увеличить объемы утилизируемого попутного нефтяного газа и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Keywords:

Screw compressor,
associated petroleum gas,
compression, low pressure,
high density, cold climate,
modernization, reliability.

ABSTRACT

This paper examines the features of compression of low-pressure high-density associated petroleum gas by screw oil-filled compressors in a cold climate using the example of the Karachaganak field. An analysis of the operating experience of booster compressor units revealed a number of problems related to oil release from the oil system, condensation formation in the compressor's working cells and oil circulation disruption at low temperatures. To solve these problems, a comprehensive approach has been proposed, including equipment modernization and optimization of operating modes. In particular, high-speed inlet shut-off valves have been developed and implemented to prevent oil emissions, the operating temperatures of oil and gas have been increased to reduce condensation, and the heat exchange system has been upgraded to improve oil circulation at subzero temperatures. The research results have shown a significant increase in the reliability and efficiency of compressor units after the implementation of the proposed solutions, which makes it possible to increase the volume of recycled associated petroleum gas and reduce the negative impact on the environment.

КІРІСПЕ

Ілеспе мұнай газын тиімді басқару және пайдалану қазіргі заманғы мұнай-газ саласының маңызды міндеттерінің бірі болып табылады. Бүкіл әлемде өндірілетін ілеспе мұнай газының көлемі жоғары және ол өсу үстінде, бұл оны кәдеге жарату және қайта өңдеу мәселесін экономикалық және экологиялық тұрғыдан өте өзекті етеді. Тарихи тұрғыдан кең таралған тәжірибе болып табылатын ілеспе мұнай газын алауларда жай ғана жағу құнды шикізаттың айтарлықтай жойылуына, атмосфераның ластануына және климатқа кері әсерін тигізуге әкеліп соғады. Бұл ілеспе мұнай газын жинау, дайындау және тасымалдау үшін тиімді технологиялар мен инженерлік шешімдерді енгізу қажеттілігін көрсетеді (Li, Zhao, Liu, Wang, Shen, Guo, 2025; Aydın, Engin, Kovacevic, 2025; Braga et.al. 2024).

Ілеспе мұнай газын кәдеге жарату мәселесін шешудің бірнеше жолы бар, олардың әрқайсысының өзіндік артықшылықтары мен кемшіліктері бар. Ең көп таралғандардың бірі – электр энергиясын өндіру үшін ілеспе мұнай газын пайдалану. Ілеспе мұнай газымен жұмыс істейтін электр станцияларының құрылысы мұнай өндіретін кәсіпорындарды да, жақын маңдағы елді мекендерді де энергиямен қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Алайда, бұл нұсқа айтарлықтай инвестициялар мен инфрақұрылымды қажет етеді. Тағы бір тәсіл – ілеспе мұнай газын сұйытылған көмірсутек газы, бензин және басқалар сияқты құнды химиялық өнімдерге қайта өңдеу (Sun, Wu, Li, Wang, Xing, 2022). Бұл тәсіл жоғары қосымша құн алуға мүмкіндік береді, бірақ күрделі технологиялық процестерді және дамыған химия өнеркәсібінің болуын талап етеді. Үшінші тәсіл – қойнауқат қысымын ұстап



тұру және мұнай өндіруді арттыру үшін ілеспе мұнай газын қайтадан қойнауқатқа айдау. Бұл тәсіл белгілі бір геологиялық жағдайларда тиімді болуы мүмкін, бірақ мұқият талдау мен модельдеуді қажет етеді. Аталған тәсілдердің логистикаға, инвестицияларға және экологиялық аспектілерге қатысты шектеулері бар (ГОСТ Р 7.0.100-2018, 2018; Husak, Kovacevic, Karabegovic, 2019; O'Neill, 1993; Yin et al., 2017).

Осы баламалардың аясында ілеспе мұнай газын сығу, оны кейіннен құбырлар арқылы тасымалдау, әсіресе ірі тұтынушылар мен өңдеу кәсіпорындарынан алыс орналасқан кен орындары үшін болашағы зор және экономикалық тұрғыдан тиімді шешімдердің бірі болып табылады. Сығу газдың тығыздығын арттыруға мүмкіндік береді, бұл тасымалдау шығындарын айтарлықтай төмендетеді және қолданыстағы газ тасымалдау жүйелеріне ілеспе мұнай газын беру мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Осы ретте, әсіресе кен орындарын игерудің кейінгі сатыларында өндірілетін, төмен қысымды ілеспе мұнай газын сығу ерекше техникалық міндет болып табылады. Газдың төмен қысымы күрделі жұмыс жағдайында тиімді сығуды және тұрақты жұмысты қамтамасыз етуге қабілетті мамандандырылған компрессорлық жабдықты қолдануды талап етеді (Карачаганак Петролеум Оперейтинг Б.В. Официальный сайт. URL: <https://www.kpo.kz/> дата обращения: 15.11.2024; Tian, Lu, Shen, Wu, Xing, 2018). Осыған байланысты, маймен толтырылған бұрандалы компрессорларды қолдану олардың ықшамдылығына, сенімділігіне және айнымалы құрамды газбен, сондай-ақ қоспалармен жұмыс істеу қабілетіне байланысты тартымды шешім болып табылады. Алайда, қысымы төмен, тығыздығы жоғары ілеспе мұнай газын сығу үшін маймен толтырылған бұрандалы компрессорларды, әсіресе суық климатты жағдайларда пайдалану терең зерттеуді және инженерлік шешімдерді қажет ететін бірқатар ерекше мәселелермен байланысты. Мұндай мәселелерге май жүйесінен майдың шығуы, компрессордың жұмыс ұяшығында конденсаттың пайда болуы және төмен температурада май айналымының бұзылуы жатады. Бұл мәселелерді сәтті шешу компрессорлық қондырғылардың сенімді және тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз етуге және кәдеге жаратылатын ілеспе мұнай газының көлемін ұлғайтуға мүмкіндік береді (Kovačević, Stošić, Smith, 2004; Spille-Kohoff, Hesse, El Shorbagy, 2015).

Жоғарыда айтылғандарға байланысты, қысымы төмен, тығыздығы жоғары ілеспе мұнай газын май толтырылған бұрандалы компрессорлармен сығу ерекшеліктерін зерттеудің өзектілігі мен маңыздылығы күмән тудырмайды. Күрделі пайдалану жағдайларында компрессорлық қондырғылар жұмысының тиімділігі мен сенімділігін арттыруға бағытталған техникалық шешімдерді әзірлеу және енгізу ілеспе мұнай газын кәдеге жарату көлемін ұлғайту, қоршаған ортаға тигізетін теріс әсерін азайту және мұнай-газ саласының экономикалық тиімділігін арттыру жолындағы маңызды қадам болып табылады (<https://neftegaz.ru/science/transportation/331783-osobennosti-komprimirovaniya-nizkonapornogo-oputnogo-gaza-vysokoy-plotnosti-vintovymi-maslozapolnen/> дата обращения: 15.11.2024; Rane, Kovačević, Stošić, Smith, 2021; Wang, Xing, Chen, Sun, He, 2019).

Бұл жұмыстың мақсаты Қарашығанақ мұнай кен орнында сығу компрессорлық қондырғыларын пайдалану тәжірибесін талдау, суық климат жағдайында маймен толтырылған бұрандалы компрессорлармен қысымы төмен, тығыздығы жоғары ілеспе мұнай газын сығу кезінде туындайтын проблемаларды анықтау және олардың жұмысының сенімділігі мен тиімділігін арттыруға бағытталған инженерлік шешімдерді ұсыну болып табылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Ұсынылған жұмыс аясында Қарашығанақ мұнай кен орнында пайдаланылатын EGSI-S-650/1500WA типті Enterproject сығу компрессорлық қондырғыларының жұмысын оңтайландыруға бағытталған эксперименттік және талдамалы зерттеулер кешені жүргізілді. Зерттеулер қысымы төмен, тығыздығы жоғары ілеспе мұнай газын сығу кезінде туындайтын



проблемаларды анықтау және оларды жою мақсатында нақты пайдалану жағдайында қолданыстағы қондырғыларда жүргізілді. Эксперименттік жұмыстарға сығу компрессорлық қондырғылардың жұмыс параметрлерін бақылау, ілеспе мұнай газының құрамы мен қасиеттерін талдау, сондай-ақ жабдықтың жаңартылған элементтерін сынау кірді.

Зерттеу барысында қолданылған негізгі жабдық бес Enterproject EGSi-S-650/1500WA сығу компрессорлық қондырғысы болды. Әрбір қондырғы май толтырылған бұрандалы компрессордан, май бөлгіштен, ауамен салқындату аппаратынан, автоматты басқару жүйесінен және қосалқы жабдықтан тұрады. Компрессорлар кіріс қысымы 0,01 МПа және шығыс қысымы 1,7 МПа болғанда 7000 м³/сағ өнімділікті қамтамасыз етеді. Қондырғыларды пайдалану барысында келесі параметрлер: компрессордың кірісі мен шығысындағы газдың қысымы мен температурасы, май бөлгіш пен ауамен салқындату аппаратының кірісі мен шығысындағы май температурасы, май шығыны, компрессордың дірілі, сондай-ақ ілеспе мұнай газының құрамы өлшенді.

Сығу компрессорлық қондырғыларын апаттық тоқтату кезінде май жүйесінен майдың шығып кетуін болдырмау үшін кіріс клапандарының жүйесі жаңғыртылды. Газдың кіре берісіне серіппелі кескішпен жабдықталған жылдам әсер ететін электромеханикалық жетекті клапандар орнатылды. Төтенше жағдайда клапанның сенімді жабылуын қамтамасыз ету үшін шамамен 3000 Н•м күш жасайтын екі серіппелі электр жетегі жасалды. Жаңартылған клапандар жұмысының тиімділігі кіріс сүзгі-скрубберге майдың шығып кетпеуін бақылау және сығу компрессорлық қондырғыларын сериялық апаттық тоқтату арқылы бағаланды.

Компрессордың жұмыс ұяшықтарында конденсаттың түзілуін болдырмау үшін мұнай мен газ температурасының ілеспе мұнай газын сығу процесіне тигізетін әсері жөнінде есептік және эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Алынған мәліметтер негізінде жұмыс температурасының жаңа мәндері негізделді: май температурасы 75°C дейін, газ температурасы 105°C дейін көтерілді. Жоғары температурада компрессорлардың тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін Mobil Glycoil MG11 майын тұтқырлық индексі жоғары MG22 майына ауыстырылды.

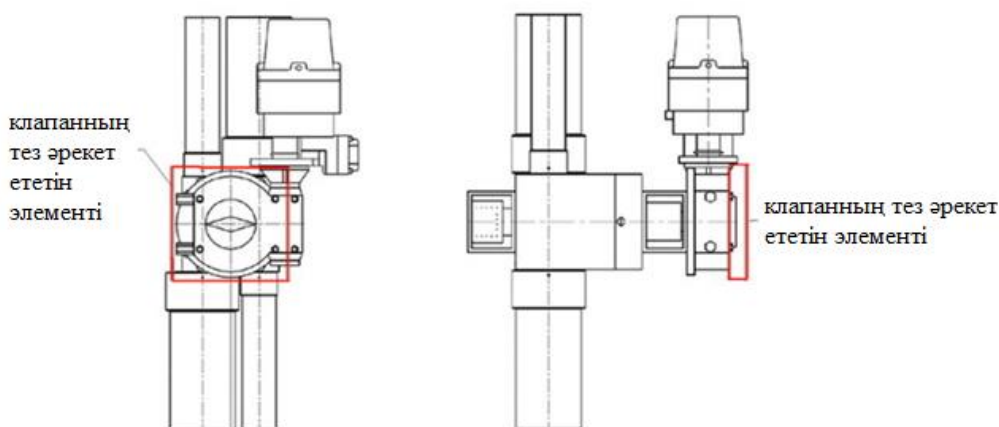
Май жүйесіндегі май айналымын теріс температурада жақсарту үшін жылу алмасу жүйесі жаңғыртылды. Жүйеге май бағына арналған сұйықтықты жылу алмастырғыш, сұйықтық айналымына арналған сорғы, ауамен салқындату аппаратын жылытуға арналған сұйықтықты радиатор, ауаны мәжбүрлеп айдайтын желдеткіш және ауа өткізгіш қосылды. Жылу тасымалдағыш ретінде -45°C дейінгі температурада қатпауын қамтамасыз ететін гликоль ерітіндісі қолданылды. Жаңартылған жылу алмасу жүйесінің тиімділігі сығу қондырғысы теріс температурада ұзақ тоқтап тұрғаннан кейін іске қосылған кезінде ауамен салқындату аппаратындағы майдың температурасын бақылау арқылы бағаланды.

Ілеспе мұнай газының термодинамикалық сипаттамаларын және сығу параметрлерін есептеу үшін Aspen HYSYS бағдарламалық ортасында іске асырылған нақты газ күйінің Peng–Robinson моделі қолданылды. Компрессордың индикаторлық диаграммаларын есептеу газдың нақты құрамы мен оның әртүрлі температура мен қысым кезіндегі қасиеттерін ескере отырып, қозғалыс теңдеулері негізінде жүргізілді. Май жүйесіндегі жылу процестерін модельдеу үшін ауыр көмірсутектердің фазалық ауысулары ескеріле отырып, жеңілдетілген жылу алмасу схемалары қолданылды. Әр түрлі температурадағы майдың тұтқырлығын есептеу Mobil Glycol гликоль майларына арналған эмпирикалық түзетулермен нақтыланған Walther моделін қолдану арқылы жүргізілді. Сондай-ақ жергілікті қызып кетуді және ауамен салқындату құрылғысы мен май бағының ішіндегі ағындардың таралуын бағалау үшін CFD модельдеу (ANSYS Fluent платформасында) жүргізілді. Бұл жылу алмасу мен май айналымын жақсартуды қажет ететін аймақтарды дәлірек анықтауға мүмкіндік берді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Қарашығанақ мұнай кен орнында жүргізілген кешенді зерттеулер Enterproject EGSI-S-650/1500WA маймен толтырылған бұрандалы компрессорлық қондырғыларды пайдалана отырып, қысымы төмен, тығыздығы жоғары ілеспе мұнай газын сығу процесін оңтайландыруға бағытталған. Жағдайлары ұқсас көптеген басқа да газ конденсатты кен орындары сияқты, пайдаланудың бастапқы кезеңінде газдың нақты құрамы, жұмыс режимі және қолайсыз климаттық факторлармен байланысты бірқатар проблемалар анықталды. Атап айтқанда, майдың бақылаусыз шығарылуы, компрессор ішінде конденсаттың түзілуі және қоршаған ортаның төмен температураларында майлау майының қалыпты айналымын қамтамасыз етуде қиындықтар байқалды. Бұл мәселелерді тиімді шешу үшін жабдықты физикалық тұрғыдан жаңғыртуды, жұмыс режимдерін дәл реттеуді және озық технологиялық шешімдерді енгізуді қамтитын көпжақты тәсіл әзірленіп, іске асырылды.

Басты міндет компрессор қондырғысының апатты тоқтауы кезінде май жүйесінен майдың шығып кетуін жою болды. Жұмыс кенеттен тоқтаған кезде пайда болған вакуум салдарынан кіреберісте орналасқан сүзгі-скрубберге майдың ағуып кетуі орын алды. Бұл жағдайды болдырмау үшін кіріс клапандарының жүйесі айтарлықтай жаңартылды (1-сурет). Компрессорға ілеспе мұнай газын жеткізетін газ желісіне серіппелі кескіштермен жабдықталған жылдам әрекет ететін электромеханикалық клапандар орнатылды.



1-сурет. Серіппелі кескішпен жабдықталған кіріс клапанының
электромеханикалық жетегі

Ескерту: авторлармен құрастырылған

Клапанның құрылысы сығу компрессорлық қондырғысының блок-модулінің ішіндегі өте шектеулі бос орын ескеріле отырып жасалған. Бастапқыда қажетті жабылу күшін қамтамасыз ету үшін бір қуатты серіппені пайдалану ұсынылды, бірақ мұндай шешімнің габариттері орналастыру тұрғысынан қолайсыз болып шықты. Соңында, қажетті жабылу күшін (шамамен 3000 Н·м, серіппелердің тозуын өтеу үшін $\pm 5\%$ рұқсатпен) екі кішігірім серіппеге бөлу туралы шешім қабылданды, бұл электр жетегінің габариттерін едәуір азайтып, оны қолданыстағы жүйеге сәтті енгізуге мүмкіндік берді. Мұқият жүргізілген сынақтар компрессордың апаттық тоқтауы кезінде майдың шығып кетуінің толық тоқтатылғанын растады. Бұл жаңғырту енгізілгенге дейін, май шығыны әрбір апаттық тоқтау кезінде орта есеппен 6 литрге дейін жетті (компрессордың жұмыс ұзақтығы мен май температурасына байланысты 5-тен 7 литрге дейін ауытқыды), бұл техникалық қызмет көрсету шығындарын арттырып, жүйені тазалау үшін орта есеппен 4-6 сағатқа



жабдықтың мәжбүрлі тоқтап қалуына әкелді. Жаңғыртылған клапан жүйесі енгізілгеннен кейін, бұл мәселе толығымен шешілді, бұл газды қысу қондырғысының жалпы жұмыс сенімділігін едәуір арттыруға және пайдалану шығындарын (май мен персоналдың еңбекақысына кететін шығындарды азайту есебінен шамамен 15-20%-ға) айтарлықтай қысқартуға мүмкіндік берді.

Зерттеудің екінші кезеңі бұрандалы компрессордың жұмыс ұяшықтарында конденсаттың түзілу мәселесіне бағытталған. Қарашығанақ кен орнындағы ілеспе мұнай газының тығыздығы жоғары (1,32 кг/м³, фракциялық құрамына байланысты ±0,03 кг/м³ ауытқуы мүмкін) және құрамында ауыр көмірсутектер көп (массасы бойынша шамамен 15-20%), бұл оның компрессор майындағы ерігіштігін айтарлықтай арттырады. 1,7 МПа жоғары қысыммен жұмыс істейтін май бөлгіште (±0,05 МПа рұқсат етілген ауытқулармен) газ компоненттерінің көп бөлігі майда ериді, ол кейін тікелей компрессордың жұмыс ұяшықтарына беріледі. Қысым мен температура одан әрі төмендеген кезде жұмыс ұяшықтары ішіндегі майдан газ бөлініп, ауыр фракциялардың конденсациялану процесі жүреді. Түзілетін конденсат көлемі аз болғандықтан, қысымның төмендеуіне және соның салдарынан компрессор сипаттамаларының нашарлауына әкеледі (өнімділігі 8-10%-ға төмендеп, энергия тұтынуы 5-7%-ға артады). Бұл жағымсыз құбылыстың алдын алу үшін мұнай мен келіп түсетін газдың жұмыс температурасын жоғарылату туралы шешім ұсынылды. Бастапқыда майдың температурасы 55°C (±2°C), ал газдың температурасы 85°C (±3°C) деңгейінде сақталды. Алайда, термодинамикалық модельдерді қолдана отырып жүргізілген есептеулер мен эксперименттік зерттеулердің нәтижелері ауыр көмірсутектердің конденсациясын болдырмау үшін майдың температурасын 75°C (±2°C) дейін, ал газдың температурасын 105°C (±3°C) дейін арттырудың қажет екенін көрсетті. Бұл тұжырымдарды растау үшін температураның майдың тұтқырлығына және оның газды еріту қабілетіне тигізетін әсерін зерттейтін қосымша зерттеулер жүргізілді. Атап айтқанда, температураның жоғарылауы майдың тұтқырлығының төмендеуіне (температураны 20 °C арттырғанда шамамен 10-12 %-ға) және оның ауыр көмірсутектерді еріту қабілетінің төмендеуіне (дәл осындай жағдайларда шамамен 8-10%-ға) әкелетіні анықталды, бұл өз кезегінде конденсат түзілу қаупін азайтады. Жоғары температурада компрессорлық қондырғының тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін Mobil Glycoil MG11 компрессорлық майын тұтқырлық индексі жоғары (ИВ=170, MG11-де ИВ=150). Mobil Glycoil MG22 майына ауыстырылды. Бұл шешімді енгізу компрессордың жұмыс ұяшықтарында конденсат түзілуін айтарлықтай азайтты, ал бұл өз кезегінде газды қысу қондырғысының өнімділігін арттыруға және электр энергиясын тұтынуды азайтуға (меншікті энергия тұтынуы шамамен 4-6 %-ға төмендеді) әкелді.

Сығу процесінің тиімділігін сандық бағалау үшін изоэнтроптық және нақты сығу бойынша меншікті жұмыс есептелді. Меншікті изоэнтроптық сығу жұмысының формуласы:

$$L_s = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1)$$

мұндағы: k – адиабата көрсеткіші (ілеспе мұнай газы үшін ≈ 1.31), R – масса бірлігіне келетін әмбебап газ тұрақтысы (ілеспе мұнай газы үшін ≈ 519 Дж/(кг·К), T_1 – газдың бастапқы температурасы (К), p_1 , p_2 – бастапқы және аяққы қысым.

$T_1 = 358\text{K}$, $p_1 = 0,01\text{МПа}$, $p_2 = 1,7\text{ МПа}$ жағдайында:

$$L_s = \frac{1.31}{0.31} \cdot 519 \cdot 358 \cdot \left[\left(\frac{1.7}{0.01} \right)^{\frac{0.31}{1.31}} - 1 \right] \approx 521 \cdot 358 \cdot (7.04 - 1) \approx 1.09 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$



Осылайша, изоэнтропты жұмыс шамамен 1090 кДж/кг құрайды. Компрессордың пайдалы әсер коэффициентін 0,78 ескергенде нақты меншікті жұмыс:

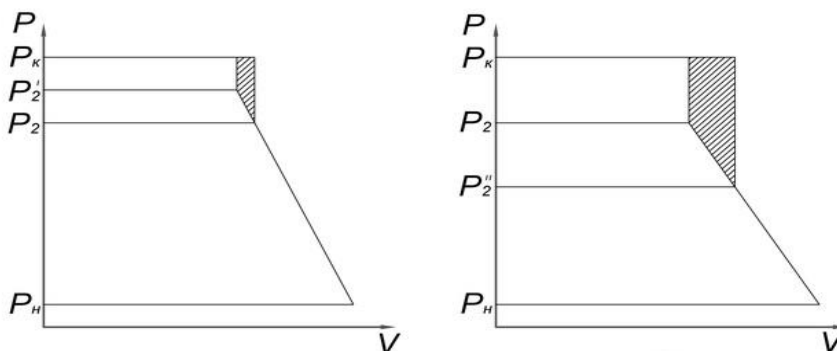
$$L_d = \frac{L_s}{\eta} \quad (2)$$

$$L_d = \frac{1.09 \cdot 10^6}{0.78} \approx 1.40 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

Сығудың термодинамикалық тиімділігін бағалау үшін төмендегі формула бойынша қысудың меншікті жұмысын есептеу жүргізілді:

$$L = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

мұндағы V_1 және V_2 – индикаторлық диаграмма параметрлері негізінде анықталған газдың бастапқы және соңғы көлемі. Есептеулер көрсеткендей, газ температурасының 85°C-тан 105°C-қа дейін көтерілуі конденсация дәрежесін 48-52% төмендетеді, бұл индикаторлық диаграмма профилінің өзгеруімен расталады (2-сурет).



2-сурет. Май толтырылған бұрандалы компрессордың теориялық индикаторлық диаграммалары, А – газ конденсациясы жоқ және Б – газ конденсациясы кезінде
Ескерту – авторлармен құрастырылған

Бұл жағдайда компрессордың пайдалы әсер коэффициенті 78 %-дан 84 %-ға дейін өсті. Меншікті энергия тиімділігін есептеу 1 м³ сығылған газға энергия тұтынудың 0,097 кВт·сағ-тан 0,088 кВт·сағ-қа дейін төмендегенін көрсетті. Бұл ұсынылған жаңғыртудың экономикалық тұрғыдан орындылығын растайды.

Келесі шешімді қажет ететін мәселе – қоршаған ортаның төмен температурасында (-10 °C-тан төмен, тіркелген ең төменгі мәндер -35°C-қа дейін) май жүйесіндегі майлау майының қалыпты айналымының бұзылуы болды. Компрессор майын MG11-ден MG22-ге ауыстыру конденсат түзілу мәселесін сәтті шешкенімен, майлау майының төмен температурадағы тұтқырлығын арттырды (MG22 майының -20 °C температурадағы тұтқырлығы сол температурадағы MG11 майынан шамамен 25-30% жоғары), бұл оның айналымын, әсіресе ұзақ тоқтап тұрғаннан кейін компрессорды іске қосқанда айтарлықтай қиындатты.

Майдың тұтқырлығын есептеу үшін түрлендірілген формула қолданылды:

$$\log_{10}(\log_{10}(v + 0.8)) = A - B \cdot \log_{10}(T) \quad (3)$$

мұндағы: v – кинематикалық тұтқырлық, сСт;

T – температура, К;

A, B – эмпирикалық коэффициенттер (MG22 үшін: $A = 0,65, B = 0,075$).

$T = 253\text{K}$ (-20°C) температурада:

$$\log_{10}(\log_{10}(v + 0.8)) = 0.65 - 0.075 \cdot \log_{10}(253) \approx 0.65 - 0.075 \cdot 2.40 = 0.47$$



Кері есептеу арқылы аламыз:

$$\log_{10}(v + 0.8) = 10^{0.47} \approx 2.95 \Rightarrow v \approx 10^{2.95} - 0.8 \approx 891 - 0.8 = 890,2 \text{ сСт}$$

Осылайша, MG22 майының -20°C температурадағы тұтқырлығы 890 сСт-тан асады, бұл іске қоспас бұрын майды 10°C-тан жоғары температураға дейін мәжбүрлі түрде қыздыру қажеттілігін растайды.

Бұл мәселені шешу үшін жылу алмасудың жаңғыртылған жүйесі әзірленіп, енгізілді. Қосымша май бағына арналған сұйықтықты жылу алмастырғыш, сұйықтықты мәжбүрлеп айналдыруға арналған сорғы, ауамен салқындату аппаратын тиімді жылытуға арналған сұйықтықты радиатор, ауаны мәжбүрлеп айдауды қамтамасыз ететін желдеткіш және жылы ауа ағынын бағыттауға арналған ауа өткізгіш орнатылды. Салқындатқыш ретінде – 45 °C дейінгі температурада қатып қалудан қорғауға кепілдік беретін гликоль ерітіндісі (50% гликоль және 50 % су концентрациясы) қолданылды. Компрессорды іске қосу процесі барысында газ сығылған кезде пайда болатын жылу сұйықтықты жылу алмастырғыштағы гликоль ерітіндісімен тиімді түрде алынады және ауа ағынымен мәжбүрлі түрде үрленетін сұйықтықты радиаторға жіберіледі. Осылайша қыздырылған ауа ауамен салқындату аппаратына жіберіледі, онда ол майды компрессордың қалыпты жұмысын бастау үшін қажетті температураға дейін қыздырады (қалыпты айналым үшін майдың минималды температурасы шамамен +10°C). Бұл жүйені енгізу тіпті өте төмен температураларда да газды сығу қондырғысын сенімді іске қосуды қамтамасыз етті және майлаудың жеткіліксіздігіне қарамастан жабдықтың ықтимал зақымдануын болдырмады. Төмен температура жағдайында ұзақ тоқтап тұрғаннан кейін компрессорлық қондырғының жұмыс режиміне шығу уақыты 60-80 минуттан 30-40 минутқа дейін қысқарды, бұл газды сығу қондырғысының пайдалану сенімділігін айтарлықтай арттырып, апаттық тоқтаулардың туындау қаупін азайтты (1-кесте).

1-кесте. Конденсацияны болдырмау жүйесін жаңғыртқанға дейінгі және кейінгі қондырғы сипаттамаларын өлшеу нәтижелері

Көрсеткіш	Жаңғыртуға дейін (55 °C май, 85 °C газ)	Жаңғыртудан кейін (75 °C май, 105 °C газ)	Өзгеруі, %	Ескерту
Кіріс кезіндегі қысым, МПа	0.01 (±0.001)	0.01 (±0.001)	0 %	Тұрақты деңгейде сақталады
Шығыс кезіндегі қысым, МПа	1.7 (±0.02)	1.7 (±0.02)	0 %	Тұрақты деңгейде сақталады
Шығыс кезіндегі газдың температурасы, °C	90 (±2)	110 (±2)	+22.2 %	
Газдың шығыны, м³/сағ.	6700 (±100)	7000 (±100)	+4.5 %	Өнімділік артады
Май бөлгіштегі конденсат деңгейі, л/сағ.	2.5 (±0.2)	1.0 (±0.2)	-60 %	Конденсат түзілуінің айтарлықтай төмендеуі
Майдың кинематикалық тұтқырлығы, сСт	15 (±0.5)	13 (±0.5)	-13.3 %	Температураның тұтқырлыққа тигізетін әсері
Тұтынылатын қуат, кВт	650 (±10)	620 (±10)	-4.6 %	Өнімділікті арттыру кезінде қуатты тұтыну азайды
Ескерту – авторлармен құрастырылған				



Газдың конденсациялану дәрежесін сандық бағалау үшін келесі теңдеу қолданылады:

$$C = \frac{m_{\text{конденсат}}}{m_{\text{барлық газ}}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

7000 м³/сағ түскен кезде және тығыздығы 1,32 кг/м³ болғанда, газдың массасы:

$$m_{\text{газ}} = 7000 \cdot 1,32 = 9240 \frac{\text{кг}}{\text{сағ.}}$$

Конденсаттың массасы 1,0 л/сағ ≈ 0,75 кг/сағ. болғанда (тығыздығы 0,75 кг/л), сонда:

$$C = \frac{0,75}{9240} \cdot 100\% \approx 0,0081\%$$

Жаңғыртуға дейін:

$$C = \frac{2,5 \cdot 0,75}{9240} \cdot 100\% \approx 0,0203\%$$

Осылайша, конденсация деңгейі 60 %-дан астам төмендеді.

Қарашығанақ кен орнында сығу компрессорлық қондырғыларының жұмысын одан әрі оңтайландыру үшін сығу процесінің тиімділігін арттыруға және операциялық шығындарды азайтуға бағытталған бірқатар қосымша эксперименттік зерттеулер жүргізудің болашағы бар деп есептеледі. Негізгі бағыттардың бірі - бұрандалы компрессор роторларының геометриясының қондырғының жалпы тиімділігіне әсерін зерттеу болып табылады. Роторлардың пішіні мен өлшемдерін өзгерту арқылы компрессордың өнімділігі мен оның тұтынатын қуаты арасындағы оңтайлы арақатынасқа қол жеткізуге болады. Мысалы, роторлардың профилін оңтайландыру кезінде сығу қуыстары арасынан газдың шығып кетуін азайтуға болады, бұл энергия тұтынуды өзгертпей, өнімділікті 2-3 %-ға арттыруға мүмкіндік береді. Мұндай зерттеулерді жүзеге асыру үшін бұрандалы компрессордағы газды сығу процесін модельдеу үшін заманауи бағдарламалық жасақтамаларды пайдалану қажет, мысалы, Ansys CFX немесе COMSOL Multiphysics. Тағы бір маңызды бағыт - үйкеліске жұмсалатын энергияны азайту мақсатында бұрандалы компрессорларға арналған жаңа майлау схемаларын әзірлеу және талдау. Тұтқырлық-температуралық сипаттамалары жақсартылған синтетикалық майлау материалдарын пайдалану (мысалы, полиальфаолефиндер) және май беру жүйесін оңтайландыру (мысалы, ең көп үйкеліс аймақтарына майды дәл жеткізу үшін микродозаторларды пайдалану) үйкеліске жұмсалатын энергияны айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді (5-7 %-ға) және компрессордың қызмет ету мерзімін ұзартады (10-15 %-ға). Сондай-ақ, маңызды бағыт – гидродинамикалық есептеу әдістерін (CFD) қолдана отырып, бұрандалы компрессордың ішінде жүретін жылу процес-терін егжей-тегжейлі модельдеу. Компрессорда жылу алмасудың нақты моделін құру салқындату жүйесін оңтайландыруға және жабдықтың жергілікті қызып кетуіне жол бермейді, бұл өз кезегінде компрессордың сенімділігі мен қызмет ету мерзімін арттырады. Ол үшін заманауи бағдарламалық жасақтаманы (мысалы, ANSYS Fluent немесе OpenFOAM) пайдалану және компрессордың әртүрлі нүктелерінде орнатылған термопаралар мен қысым датчиктерін қолдану арқылы алынған эксперименттік мәліметтер негізінде модельді тексеру қажет.

Есептік және эксперименттік деректер арасындағы жоғары сәйкестікке қарамастан, болжау қателеріне талдау жүргізілді. Май температурасын модельдеу кезінде қондырғыны іске қосқанда ең үлкен айырмашылықтар байқалды: есептелген және өлшенген температура арасындағы орташа квадраттық ауытқу 3,8 °C құрады. Бұл жылу алмасу жүйесінің инерциясымен және ескерілмеген құрылымдық элементтер арқылы болатын жылу шығындарымен байланысты. Майдың тұтқырлығын анықтау қателігі -15 °C-тан төмен температурада ±6% дейін болды, бұл Walther моделіндегі эмпирикалық коэффициенттердің



спектеулі дәлдігімен түсіндіріледі. Бұл қателерді азайту үшін іріктеу жылдамдығы жоғары эксперименттік деректерді автоматты түрде жинауды енгізу және жаңа деректердегі калибрлеуді ескере отырып модельдерді жаңарту жоспарлануда.

Алынған нәтижелерді басқа ұқсас зерттеулерде келтірілген мәліметтермен салыстыру жоғары тығыздықпен сипатталатын қысымы төмен ілеспе мұнай газын сығу үшін қолданылатын бұрандалы компрессорларды пайдалану кезінде туындайтын проблемалар көптеген мұнай-газ кен орындарына, әсіресе климаты қатал аймақтарда орналасқандарға тән екенін растайды (Huagen, Chang, Xing, 2001; Череповицын, Жарова, 2011). Мысалы, Батыс Сібірдің кен орындарында, сондай-ақ Арктикадағы қайраңды жобаларында конденсаттың түзілуімен және төмен температурада май айналымының бұзылумен байланысты проблемалар жиі кездеседі. Алайда, осы жұмыс аясында ұсынылған және сәтті іске асырылған шешімдер өздерінің тиімділігін дәлелдеді және басқа да ұқсас нысандарда қолданылуы мүмкін. Атап айтқанда, кіріс клапандары жүйесін жаңғырту, май мен газ жұмысының атап айтқанда, кіріс клапандары жүйесін жаңғырту, май мен газдың жұмыс температуралық режимдерін оңтайландыру, сондай-ақ заманауи жылу алмасу жүйелерін енгізу компрессорлық жабдықтың жұмыс сенімділігін айтарлықтай арттыруға және пайдалану шығындарын азайтуға мүмкіндік береді, бұл Қарашығанақ кен орнында тиімді пайдалану тәжірибесімен расталады.

Талдау негізінде жабдықты жаңартуды, жұмыс режимдерін оңтайландыруды және заманауи технологияларды енгізуді қамтитын кешенді тәсіл жоғары тығыздықпен сипатталатын қысымы төмен ілеспе мұнай газын сығу үшін бұрандалы компрессорларды пайдалану кезінде туындайтын мәселелерді шешудің ең тиімді әдісі болып табылады деген қорытынды жасауға болады. Роторлардың геометриясын оңтайландыруға, майлаудың жаңа, тиімдірек схемаларын әзірлеуге және жылу процестерін егжей-тегжейлі модельдеуге бағытталған келешектегі зерттеулер мен әзірлемелер болашақта компрессорлық жабдықтың тиімділігі мен сенімділігін одан әрі арттыруға, сондай-ақ операциялық шығындарды айтарлықтай азайтуға мүмкіндік береді. Осы зерттеу шеңберінде алынған нәтижелер мен ұсынылған техникалық шешімдер жалпы мұнай-газ саласы үшін үлкен тәжірибелік құндылыққа ие және компрессорлық жабдықтың жұмыс тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін басқа да осыған ұқсас кен орындарында қолданылуы мүмкін.

ҚОРЫТЫНДЫ

Мақалада Қарашығанақ кен орнында, әсіресе суық климат жағдайында тығыздығы жоғары қысымы төмен ілеспе мұнай газын сығу үшін май толтырылған бұрандалы компрессорларды пайдалану кезінде туындайтын проблемалар қарастырылды.

Жұмыстың мақсаты – сығу компрессорлық қондырғыларын пайдалану тәжірибесін талдау, проблемаларды анықтау және олардың жұмыс сенімділігі мен тиімділігін арттыру үшін инженерлік шешімдерді ұсыну болып табылады. Зерттеулер тікелей қолданыстағы қондырғыларда жүргізілді және жұмыс параметрлерінің мониторингін, ілеспе мұнай газының құрамын талдауды, жаңартылған жабдықты сынауды қамтыды. Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде майдың шығуын болдырмау, компрессордың жұмыс ұяшықтарында конденсаттың түзілуін болдырмау және төмен температурада май айналымын жақсарту бойынша шешімдер ұсынылып, іске асырылды.

1. Сығу компрессорлық қондырғыларының апаттық тоқтап қалуы кезінде майдың шығуын болдырмау үшін серіппелі кескіштері бар жылдам әсер ететін электромеханикалық клапандарды орнату арқылы кіріс клапандарының жүйесі жаңартылды. Бұл майдың шығып кетуін толығымен болдырмауға және қондырғының сенімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік берді.

2. Компрессордың жұмыс ұяшықтарында конденсаттың түзілуін болдырмау үшін май мен газдың жұмыс температурасы сәйкесінше 75°C және 105°C дейін көтерілді,



сонымен қатар Mobil Glycoil MG11 майын тұтқырлық индексі жоғары MG22-ге ауыстырды. Бұл конденсаттың төмендеуіне, сығу компрессорлық қондырғыларының өнімділігінің жоғарылауына және электр энергиясын тұтынудың төмендеуіне әкелді.

3. Төмен температурада май айналымын жақсарту үшін сұйықтықты жылу алмастырғышты, сұйықтық айналымы сорғысын, сұйықтықты радиаторды және мәжбүрлі ауа айналымы желдеткішін қосу арқылы жылу алмасу жүйесі жаңартылды. Бұл экстремалды төмен температурада да сығу компрессорлық қондырғыларының сенімді іске қосылуын қамтамасыз етті және майлау жеткіліксіз болған жағдайда жабдықтың зақымдануын болдырмады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің қаржылық қолдауымен № BR24992956-ОТ-24. «Газды сығымдау үшін инновациялық жабдықтар мен технологияларды әзірлеу және құру» тақырыбы аясында жүзеге асырылды.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Ғылыми мақалалардың авторлары өз еңбектерін дайындау барысында жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын қолданбады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Aydın A., Engin T., Kovacevic A. (2025). Design optimisation of a screw compressor with a focus on rotor depth: a computational fluid dynamics approach. *International Journal of Refrigeration*, 170, 385–397. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.12.001>
- Braga, V., Silva, E., Dutra, T., Caetano, A., Silva, O., & Andreazza, A. (2024). Numerical Investigation of Pressure Pulsation in Oil-Free Twin Screw Compressor Discharge Systems Adopted to Oil and Gas Industry. In *Proceedings of the 27th International Compressor Engineering Conference at Purdue* (Conference No. 2836). Purdue University. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3895&context=icec>
- Huagen, W. U., Chang, Y., & Xing, Z. (2001). Study of leakage characteristics in twin-screw compressor with refrigerant R134a. *Refrigeration Science and Technology Proceedings*. Retrieved February 20, 2025, from https://www.zhangqiaokeyan.com/academic-conference-foreign_meeting-266134_thesis/0705011998092.html
- Husak, E., Kovacevic, A., & Karabegovic, I. (2019). Calculation of clearances in twin screw compressors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 604(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/604/1/012001>
- Kovačević, A., Stošić, N., & Smith, I. K. (2004). A numerical study of fluid–solid interaction in screw compressors. *International Journal on Computer Applications in Technology*, 21(4), 148–158. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2004.006651>
- Li Y., Zhao X., Liu S., Wang C., Shen S., Guo Y. (2025). Review and Prospects of Numerical Simulation Research on Internal Flow and Performance Optimization of Twin-Screw Compressors. *Energies*, 18(10), 2608. <https://doi.org/10.3390/en18102608>
- O'Neill, P. (1993). *Industrial Compressors: Theory and Equipment* (pp.31–3253). Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science & Technology Books. Available online: <https://www.ebay.com/p/935293>
- Rane, S., Kovačević, A., Stošić, N., & Smith, I. K. (2021). Bi-directional system coupling for conjugate heat transfer and variable leakage gap CFD analysis of twin-screw compressors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1180(1), Article 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1180/1/012001>



- Spille-Kohoff, A., Hesse, J., & El Shorbagy, A. (2015). CFD simulation of a screw compressor including leakage flows and rotor heating. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 90(1), Article 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/90/1/012009>
- Sun, S., Wu, X., Li, D., Wang, C., & Xing, Z. (2022). Study on suction pressure loss near suction end and stagnant pressure rise in p- θ diagram of twin-screw refrigeration compressor for chiller. Thermal Science & Engineering Progress, 34, 101410. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101410>
- Tian, Y., Lu, J., Shen, J., Wu, H., & Xing, Z. (2018). Optimization on shaft seals for a twin-screw steam compressor based on a novel uniform property region (UPR) model on discharge end-face. International Journal of Refrigeration, 91, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.05.009>
- Wang, C., Xing, Z., Chen, W., Sun, S., & He, Z. (2019). Analysis of the leakage in a water-lubricated twin-screw air compressor. Applied Thermal Engineering, 155, 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.085>
- Yin, X., Cao, F., Pan, S., Song, Y., Fei, J., & Wang, X. (2017). Numerical investigation on screw rotor deformation and influence on volumetric efficiency of the twin-screw multiphase pump. Applied Thermal Engineering, 111, 1111–1118. https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/26572/1/Nausheen%20Basha_Numerical%20analysis%20of%20oil%20injection%20in%20twin-screw%20compressors.pdf
- Курбанкулов С.Р., Фахрундинов Р.З., Ибрагимов Р.К., Зиннурова О.В., Ибрагимова Д.А. (2016). Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа на нефтяных промыслах. Вестник технологического университета, Т. 19(12), 55–59. <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-ispolzovaniya-poputnogo-neftyanogo-gaza-na-neftyanyh-promyslah-1/viewer>
- // Kurbankulov S.R., Fakhrutdinov R.Z., Ibragimov R.K., Zinnurova O.V., Ibragimova D.A. (2016). Problemy i perspektivy ispol'zovaniya poputnogo neftyanogo gaza na neftyanykh promyslakh [Problems and prospects of associated petroleum gas utilization at oil fields]. Vestnik tekhnologicheskogo universiteta, 19(12), 55–59. (In Russ.)
- Карачаганак Петролеум Оперейтинг Б.В. Официальный сайт. URL: <https://www.kpo.kz/> (дата обращения: 15.11.2024). // Karachaganak Petroleum Operating B.V. Ofitsialnyy sayt [Official website]. URL: <https://www.kpo.kz/> (data obrashcheniya: 15.11.2024). (In Russ.)
- Нефтегаз.ру. Особенности компримирования низконапорного попутного газа высокой плотности винтовыми маслозаполненными компрессорами. URL: <https://neftegaz.ru/science/transportation/331783-osobennosti-komprimirovaniya-nizkonapornogo-poputnogo-gaza-vysokoy-plotnosti-vintovymi-maslozapolnen/> (дата обращения: 15.11.2024). // Neftegaz.ru. Osobennosti komprimirovaniya nizkonapornogo poputnogo gaza vysokoy plotnosti vintovymi maslozapolnennymi kompressorami. URL: <https://neftegaz.ru/science/transportation/331783-osobennosti-komprimirovaniya-nizkonapornogo-poputnogo-gaza-vysokoy-plotnosti-vintovymi-maslozapolnen/> (data obrashcheniya: 15.11.2024). (In Russ.)
- Череповицын А.Е., Жарова Т.Ю. (2011). Анализ экономической эффективности технологий по утилизации попутного нефтяного газа. Записки Горного института, 191, 316–321. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ekonomicheskoy-effektivnosti-tehnologiy-po-utilizatsii-poputnogo-neftyanogo-gaza-v-usloviyah-tomskoy-oblasti/viewer>
- // Cherepovitsyn A.E., Zharova T.Yu. (2011). Analiz ekonomicheskoi effektivnosti tekhnologii po utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza [Analysis of economic efficiency of technologies for associated petroleum gas utilization]. Zapiski Gornogo instituta, 191, 316–321. (In Russ.)



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Басқанбаева Динара Жумабаевна – PhD, қауымдастырылған профессор, Сатпаев университеті, Алматы қ., Қазақстан

Басқанбаева Динара Жумабаевна – PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, г.Алматы, Казахстан

Baskanbayeva Dinara Zhumabaevna – PhD, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>



Елемесов Касым Коптлеуевич – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Сатпаев университеті, Алматы қ., Қазақстан

Елемесов Касым Коптлеуевич – кандидат технических наук, профессор, Satbayev University, г.Алматы, Казахстан

Yelemesov Kasym Koptleevich – candidate of technical sciences, Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
e-mail: k.yelemesov@satbayev.university,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>



Сабинова Ляйла Бахтияровна – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Сатпаев университеті, Алматы қ., Қазақстан

Сабинова Ляйла Бахтияровна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Satbayev University, г.Алматы, Казахстан

Sabirova Layla Bakhtiyarovna – candidate of technical sciences, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: l.sabirova@satbayev.university,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8231-9944>



Мырзабекова Динара Мырзабекқызы – PhD, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университет, Өскемен қ., Қазақстан

Мырзабекова Динара Мырзабекқызы – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

Myrzabekova Dinara Myrzabekkyzy – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: DMyrzabekova@ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4493-6102>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_29
MPNTHI 61.63.00, 87.53.00, 55.09.43

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ КАРБОНИЗАТА РИСОВОЙ ШЕЛУХИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЕГО С КАУЧУКОВОЙ МАТРИЦЕЙ

КҮРІШ ҚАБЫҒЫ КАРБОНИЗАТЫН РЕЗЕҢКЕ МАТРИЦАСЫМЕН ӨРЕКЕТТЕСУІН ЖАҚСARTU ҮШІН ФИЗИКАЛЫҚ МОДИФИКАЦИЯЛАУ

PHYSICAL MODIFICATION OF RICE HULL CARBONIZATE TO IMPROVE ITS INTERACTION WITH RUBBER MATRIX

В.В. Боброва¹, А.В. Касперович¹, С.В. Нечипуренко^{2*}, С.А. Ефремов²,
П.Т. Ахметова³

¹Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

³АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, г. Алматы, Казахстан

*Авторы-корреспонденты: Нечипуренко Сергей Витальевич, e-mail: nechipurenkos@mail.ru

Ключевые слова:

карбонизат рисовой
шелухи, модификация,
эластомер, содержание
связанного каучука,
эффект Пейна.

АННОТАЦИЯ

В данной работе изучено влияние различных видов модификации инновационного наполнителя из карбонизата рисовой шелухи (КРШ) на межфазные и межагрегатные взаимодействия в объемах каучуковых матриц. Карбонизат рисовой шелухи подвергался модификации ионизирующим излучением (γ -квантами) с использованием междозового интервала 10 кГр, а также в планетарной шаровой мельнице в сухой и жидких средах (этанол и вода) с различным временем воздействия ударных сил. Модифицированные образцы карбонизата рисовой шелухи были охарактеризованы с помощью метода дифракции лазерного излучения и адсорбции газов с помощью многоточечных определений (метод БЭТ). Изготовление модельных эластомерных композиций на основе каучуков специального (БНКС-18АМН) и общего (СКИ-3) назначения, содержащих модифицированный карбонизат осуществляли на лабораторных вальцах согласно стандартизированной методике с полной заменой малоусиливающего технического углерода марки N772. Для исследования взаимодействий между КРШ и каучуковой матрицей определяли содержание связанного каучука и качество диспергирования компонентов в объеме резиновой смеси. Было установлено, что облучение КРШ ионизирующим излучением и измельчение его в водной среде приводят к ухудшению физико-химических характеристик поверхности КРШ и снижению его взаимодействия с каучуковой матрицей. В то же время было выявлено, что модификация КРШ на планетарной мельнице в сухой среде с интервалами на охлаждение образца внутри помольного стакана от 6 до 15 минут, а также в среде этанола в течение 30 минут способствует увеличению межфазного взаимодействия и снижению эффекта Пейна за счет увеличения удельной поверхности и снижению размера частиц исследуемого материала по сравнению с КРШ без обработки.



Түйінді сөздер:

күріш қабығы
көміртекті шайыр,
модификация,
эластомер, байланған
резеңке құрамы, Пейн
эффектісі.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыста резеңке матрицалардың көлемдеріндегі күріш қабығындағы көміртекті карбонизаттың (ҚКК) модификациясының әртүрлі түрлерінің фазааралық және агрегатаралық әрекеттесулеріне әсері зерттелді. Күріш қабығы карбонизаты 10 кГр дозааралық аралықды пайдаланып, иондаушы сәулелену (γ -кванттар) арқылы, сондай-ақ соққы күштерінің әсер ету уақыты әртүрлі құрғақ және сұйық ортадағы (этанол және су) планеталық шар диірменінде модификацияланды. Модификацияланған күріш қабығының көміртекті үлгілері лазерлік дифракция және газды адсорбциялау көп нүктелі анықтаулармен сипатталды (БЭТ әдісі). Құрамында модификацияланған карбонизаты бар арнайы мақсаттағы (БНКС-18АМН) және әмбебап (СКИ-3) каучуктар негізінде модельдік эластомерлік композицияларды өндіру N772 техникалық көміртегі төмен арматураланған маркасын толық ауыстырумен стандартталған әдіс бойынша зертханалық диірмендерде жүргізілді. ҚКК мен резеңке матрицаның өзара әрекеттесуін зерттеу үшін байланысқан каучуктың құрамы және резеңке қоспасы көлеміндегі компоненттердің дисперсия сапасы анықталды. ҚКК -ны иондаушы сәулеленумен сәулелендіру және оны сулы ортада ұнтақтау ҚКК бетінің физика-химиялық сипаттамаларының нашарлауына және оның резеңке матрицамен әрекеттесуінің төмендеуіне әкелетіні анықталды. Сонымен қатар, құрғақ ортада «тынығу» аралықтарымен 6-дан 15 минутқа дейін, сондай-ақ этанол ортасында 30 минутқа дейін планетарлық диірменде ҚКК модификациясы зерттелетін материалдың ҚКК өңделмегенімен салыстырғанда меншікті бетінің ұлаюы мен бөлшектер мөлшерінің төмендеуіне байланысты фазааралық әрекеттесудің жоғарылауына және Пейн әсерінің төмендеуіне ықпал ететіні анықталды.

Keywords:

rice husk carbonizate,
modification, elastomer,
bound rubber content,
Payne effect.

ABSTRACT

In this work, the effect of different types of modifications of rice husk carbonizate (RHC) on interphase and interaggregate interactions in the volumes of rubber matrices was studied. RHC was modified by ionizing radiation (γ -quanta) using an interdose interval of 10 kGy, as well as in a planetary ball mill in dry and liquid environment (ethanol and water) with different exposure times of impact forces. Modified RHC samples were characterized using method of laser diffraction and gas adsorption with multipoint determinations (BET method). The production of model elastomer compositions based on special (BNKS-18AMN) and general (SKI-3) destination rubbers containing modified carbonizate was carried out on laboratory mills according to a standardized method with a complete replacement of low-reinforcing technical carbon of the N772 brand. To study the interactions between the RHC and the rubber matrix, the content of bound rubber and the quality of dispersion of the components in the volume of the rubber mixture were determined. It was found that irradiation of the RHC with ionizing radiation and its grinding in an aqueous medium, leads to deterioration of the physicochemical characteristics of the RHC's surface and a decrease in its interaction with the rubber matrix. At the same time, it was found that modification of RHC on a planetary mill in a dry environment with cooling intervals from 6 to 15 minutes, as well as in an ethanol environment for 30 minutes, contributes to an increase in interphase interaction and a decrease in the Payne effect due to an increase in the specific surface area and a decrease in the particle size of the studied material compared to RHC without treatment.



ВВЕДЕНИЕ

Отходы сельского хозяйства могут служить сырьевым источником для производства зольных материалов на основе переработки биомассы. Исследования, проведенные в широком географическом диапазоне, показывают, что многие виды отходов сельского хозяйства, в том числе шелуха риса, кукурузы и овса, косточки плодовых деревьев (Savova et al., 2001), косточки оливок, солону, виноградные косточки и др. (Mo et al., 2016; Vassilev et al., 2017; Yahya et al., 2015), а также миндаль, скорлупа подсолнечника и др. (Ahmedna et al., 2000; Aygün et al., 2003; Haykiri-Acma et al., 2003), могут быть использованы в целях получения материалов для применения их в различных отраслях промышленности (Das et al., 2021; Petroudy et al., 2017).

Сообщения мировой литературы в области материалов, содержащих растительные биодобавки, обычно включают композиты на основе термопластов и реактопластов (Faruk et al., 2013). Важным фактором, определяющим свойства композиций, является выбор соответствующих натуральных материалов в качестве армирующего материала. Свойства натуральных волокон могут значительно отличаться от обычных углеродных, стеклянных или арамидных волокон (Khalf et al., 2010). Их характеристики зависят от возраста растения, места происхождения (Bourmaud et al., 2018) или начальной подготовки (Cruz et al., 2016). Эти факторы определяют и химический состав натуральных материалов (Komuraiah et al., 2014).

Одним из методов улучшения характеристик наполнителей композитных эластомеров может быть их модификация различными способами (Sokolova et al., 2018; Marzec et al., 2012; Stöckelhuber et al., 2011). Модификация наполнителей из биологических масс осуществляется для установления связи армирующего материала с матрицей, что способствует увеличению совместимости рецептурообразующих компонентов композиции (Miedzianowska et al., 2023; Mohanty et al., 2018; Miedzianowska et al., 2023).

Методы модификации, по сути, можно классифицировать на физические и химические (Gholampour et al., 2020). Обработка или модификация свойств поверхности натуральных материалов обычно повышает их адгезионные свойства, но при этом влияет на физико-механические свойства полимерных композитов. Предыдущие исследования (La Mantia et al., 2011; Li et al., 2007; Vijay et al., 2020) показали, что химическая обработка считается одним из наиболее часто используемых методов обработки поверхности сельскохозяйственных материалов. Однако следует отметить, что химическая модификация наполнителей имеет недостатки, в том числе технологические. В случае химической активации требуемое количество активирующего агента обычно превышает в несколько раз по массе обрабатываемый материал (Guo et al., 2002; Елецкий и др., 2008).

Основным преимуществом физической модификации, по сравнению с химической, является направленное изменение физических свойств поверхности наполнителя путем преобразования их надмолекулярной структуры при различных физических воздействиях, таких как механоактивация поверхности, измельчение в различных жидких средах, термообработка (Rong et al., 2001), радиационная (di Benedetto et al., 2015), ультразвуковая и плазменная обработка (Marais et al., 2005) и другое, без изменения их химического строения (Kolosov et al., 2019).

Ранее проведенные нами исследования (Bobrova et al., 2024) были направлены на снижение размера частиц карбонизата рисовой шелухи путем измельчения его на вибрационной и планетарной мельницах в сухой среде с различным временем воздействия ударных и истирающих сил. Было определено, что обработка натурального наполнителя в планетарной мельнице приводит к улучшению его поверхностных характеристик. Это, в свою очередь, усиливает адгезию наполнителя к каучуку и приводит к росту показателя вязкости по Муни для резиновых композиций, повышению стойкости резин к



преждевременной подвулканизации и получению вулканизатов с более высокими упруго-прочностными показателями. Однако представляло интерес дальнейшее исследование различных методов модификации карбонизата рисовой шелухи с целью смещения значений размера частиц в диапазон более низких показателей, а также для расширения распределения частиц по размерам. Кроме того, в работе проиллюстрированы зависимости изменения межфазных и межагрегатных взаимодействий в объеме эластомерных матриц, содержащих модифицированный натуральный материал, что будет способствовать оценке армирующей способности карбонизата рисовой шелухи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При получении резиновых смесей применялись каучук изопреновый СКИ-3 и бутадиен-нитрильный синтетический каучук БНКС-18АМН, который является сополимером нитрила акриловой кислоты (17-20 %) и бутадиена-1,3, (производитель каучуков компания «Сибур», Российская Федерация) (Резниченко и др., 2012). Исследования проводились на модельных резиновых смесях с целью установления прямого влияния вида модификации карбонизата рисовой шелухи на взаимодействия с каучуковой матрицей без влияния других видов ингредиентов. Модельные рецептуры смесей отражены в табл. 1.

Таблица 1. Рецептуры модельных резиновых смесей

Наименование ингредиентов	Ингредиенты резиновой смеси, мас. ч.	
	БНКС-18АМН	СКИ-3
Синтетический каучук изопреновый	–	100,0
Синтетический каучук бутадиен-нитрильный	100,0	–
Молотая сера	1,7	1,0
Альтакс	–	0,6
Цинковые белила	3,0	5,0
Гуанидин Ф	–	3,0
Сульфенамид Ц	1,0	–
Карбонизат рисовой шелухи	40,0	40,0
Примечание: составлено автором на основе данных (ГОСТ 14925–79 и ТУ 38.30313–2006)		

Вулканизирующая группа – сера молотая, ускорители вулканизации альтакс, гуанидин Ф и сульфенамид Ц и активатор вулканизации – белила цинковые (производитель ингредиентов – Российская Федерация).

Наполнителем в исследуемых рецептурах резиновых смесей выступал карбонизат рисовой шелухи, который применялся для полной замены синтетического малоусиливающего технического углерода N772. Карбонизат рисовой шелухи (инновационный наполнитель) производится в ТОО «NeoCarbon» (г. Алматы, Республика Казахстан). Инновационный наполнитель получен в процессе пиролиза в печи в бескислородной среде при температуре до 600 °С с последующим измельчением до фракции минус 10,0 мкм. Анализ распределения частиц показал, что размеры частиц относительно однородны. Наиболее распространены частицы от 5 до 20 мкм. В частности, фракция 5-10 мкм составляет в среднем 30-36 % от общего количества, а фракция 10-20 мкм – 42-47 %.

Метод адсорбции азота при 77 К охарактеризовал исследуемый материал в соответствии с классификацией (Sing et al., 1985) как мезопористый (поры от 2 до 50 нм).



Проведенный рентгенофазовый анализ на рентгеновском дифрактометре D8 Advance Bruker AXS (Германия) показал, что кремний в инновационном наполнителе присутствует в аморфном состоянии.

Химический состав инновационного наполнителя, определенный с помощью рентгеноспектрального анализа, приведен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав инновационного наполнителя

Химический состав	Содержание, %
SiO ₂	50,5
Углерод (C)	47,3
CaO	0,3
K ₂ O	1,7
Na ₂ O	0,1
MgO	0,2
Содержание P ₂ O ₅ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MnO, Fe ₂ O ₃ составляет менее 0,1 %	
Примечание: составлено авторами	

Анализ данных, представленных в табл. 2, свидетельствует о том, что инновационный наполнитель характеризуется наличием углеродсодержащей и минеральной фаз. Содержание компонентов в обеих фазах позволяет рассматривать данный наполнитель как перспективный объект для исследований, направленных на выделение диоксида кремния из минеральной составляющей и последующую активацию углеродной составляющей с целью получения активированного углеродного материала.

Основные физико-химические характеристики инновационного наполнителя представлены в работе (Антипов и др., 2023).

Для достижения более высокой удельной поверхности инновационного наполнителя и усиления его прочностных характеристик в композициях эластомеров первоначальный материал подвергали разнообразным поверхностным модификациям (Боброва и др., 2024):

- облучение на гамма-установке "Исследователь", оснащенной источником ⁶⁰Co. Эксперимент предусматривал поэтапное увеличение дозы с шагом в 10 кГр, в результате чего были получены 5 образцов с суммарными дозами от 10 кГр до 50 кГр (инновационный наполнитель на основе карбонизата рисовой шелухи КРШ_{10-⁶⁰Co}; КРШ_{20-⁶⁰Co}; КРШ_{30-⁶⁰Co}; КРШ_{40-⁶⁰Co}; КРШ_{50-⁶⁰Co}). Мощность экспозиционной дозы составляет 3,7 кГр/час;

- обработка по сухому на планетарной мельнице 3-15 минут. Процесс включал 3-минутные перерывы для охлаждения, после чего мельница меняла направление вращения при частоте в 400 оборотов в минуту – КРШ_{3П}, КРШ_{6П}, КРШ_{9П}, КРШ_{12П} и КРШ_{15П}.

- обработка в среде C₂H₅ОН на планетарной мельнице 10-30 минут. Процесс включал 10-минутные перерывы для охлаждения, после чего мельница меняла направление вращения при частоте в 400 оборотов в минуту – КРШ_{10-этанол}, КРШ_{20-этанол}, КРШ_{30-этанол};

- обработка в среде H₂O на планетарной мельнице 10-30 минут. Процесс включал 10-минутные перерывы для охлаждения, после чего мельница меняла направление вращения при частоте в 400 оборотов в минуту – КРШ_{10-H₂O}, КРШ_{20-H₂O}, КРШ_{30-H₂O}.

Для физической модификации инновационного наполнителя использовали планетарную шаровую мельницу марки РМ100. Для этого в тару объемом 500 мл загружали измельчающие элементы – шарики диаметром 3 мм из ZrO₂ – и заполняли его на треть объема новым наполнителем. При проведении процесса с использованием жидкофазной среды пропорция наполнителя бралась из расчёта 0,1 кг на 0,05 л жидкой



фазы. После завершения измельчения в присутствии жидкости наполнитель подвергался термической обработке – сушке при 105 °С в течение одних суток.

С целью снижения температуры, вызванной нагревом стакана при длительном измельчении, и предотвращения агломерации частиц наполнителя процесс обработки периодически останавливали для охлаждения.

Резиновые смеси изготавливались на лабораторных вальцах Rubicon RC-WW 150/330 немецкого производителя. Процесс включал диспергирование наполнителя и гомогенизацию всех ингредиентов. Смеси на основе СКИ-3 изготавливали в течение 13 минут при температуре валков 75 °С с погрешностью ± 5 °С. Смеси на основе БНКС-18АМН требовали 25 минут при температуре 50 °С с погрешностью ± 5 °С. Вальцы работали с фрикцией 1 к 3 и скоростью переднего вала в 20 оборотов в минуту.

Для определения удельной поверхности наполнителя применялся многоточечный БЭТ метод адсорбции азота. Размер частиц модифицированного наполнителя анализировался с использованием лазерного анализатора Analizette 22 MicroTec (Fritsch GmbH, немецкого производителя), охватывающего диапазон от 0,1 до 600 мкм.

Исследование межфазного взаимодействия каучуков общего и специального назначения с наполнителем проводилось путем определения содержания связанного каучука. В модельных резиновых смесях этот показатель определялся методом экстракции. Невулканизованную резиновую смесь (1,0 $\pm$ 0,25 г) помещали в бюксы с толуолом и экстрагировали в течение 24 часов при комнатной температуре. Затем полученный раствор фильтровали, а остаток высушивали в термошкафу при 60 °С с погрешностью ± 1 °С на протяжении 24 часов для полного удаления толуола. После взвешивания высушенного образца рассчитывали количество связанного каучука. Связанный каучук определяется как нерастворимая фракция, образующаяся после 1-2 суток обработки невулканизованной смеси (Аверко-Антонович и др., 2002).

Для оценки равномерности распределения инновационного наполнителя в объеме эластомерной матрицы был рассчитан комплексный динамический модуль, который количественно характеризует эффект Пейна и служит индикатором качества дисперсии наполнителя (Гамлицкий, 2011; Шашок, 2020). Исследования проводились с использованием прибора RPA 2000 в течение 3 минут с температурой в 100 °С, при этом варьировалась частота деформации по требованиям стандарта ASTM D6601-02 (2008). Данный метод испытаний измеряет динамические свойства вулканизата при температурах значительно ниже температуры вулканизации. Эти измерения при более низких температурах необходимы для эффективного сопоставления с условиями эксплуатации резиновых изделий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Распределение частиц по размерам. Анализ распределения частиц по размерам показал, что после обработки инновационного наполнителя γ -квантами в разных концентрациях доля частиц размером 20-50 мкм увеличилась и превысила 50 % (рис. 1, а). Это указывает на то, что частицы агломерируют под действием тепловой энергии, выделяющейся при воздействии облучения.

Диспергирование наполнителя в среде C_2H_5OH при 20 и 30 минутах (рис. 1, в) охарактеризовано смещением гранулометрического состава в сторону более мелких фракций размером 5-10 мкм.

В противоположность этому, диспергирование наполнителя в среде H_2O (рис. 1, г) привело к агломерации частиц наполнителя. Вероятно, избыточное время измельчения в шаровой мельнице в водной среде создает вторичную агрегацию наполнителя после первого этапа измельчения.



Согласно рис. 1, б, для измельчения инновационного наполнителя по сухому на планетарной мельнице оптимальное время помола составляет 9 минут (КРШ_{9П}), т.к. при таком режиме обработки процентное содержание частиц крупного размера снижается в 1,5-2,0 раза по сравнению с немодифицированным наполнителем.

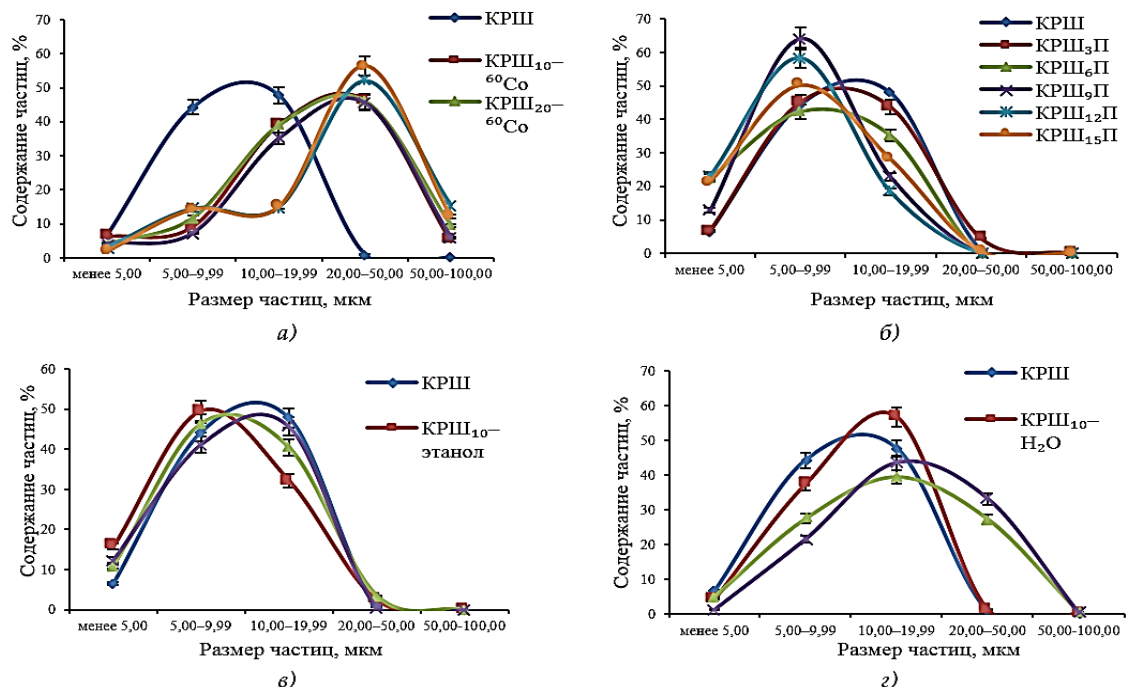


Рисунок 1. Зависимость распределения частиц инновационного наполнителя по размерам от вида модифицирования: а) на γ -установке; б) по сухому на планетарной мельнице; в) в жидкофазной среде C_2H_5OH на планетарной мельнице; г) в среде H_2O на планетарной мельнице

Примечание: составлено авторами

2. Физико-химические характеристики поверхности инновационного наполнителя.

Изменение свойств инновационного наполнителя в зависимости от вида модификации охарактеризовывали по изменению его физико-химических характеристик поверхности (табл. 3).

Таблица 3. Показатели удельной поверхности и сорбционного объема инновационного наполнителя

Наименование образца	Удельная поверхность, м ² /г	Сорбционный объем, см ³ /г
Инновационный наполнитель	16,0	0,0125
КРШ _{10-60Co}	12,0	0,0091
КРШ _{20-60Co}	7,0	0,0045
КРШ _{30-60Co}	12,0	0,0091
КРШ _{40-60Co}	11,0	0,0071
КРШ _{50-60Co}	13,0	0,0113
КРШ _{3П}	21,0	0,0181
КРШ _{6П}	35,0	0,0211
КРШ _{9П}	24,0	0,0181
КРШ _{12П}	29,0	0,0264



Окончание таблицы 3.

Наименование образца	Удельная поверхность, м ² /г	Сорбционный объем, м ³ /г
КРШ _{15П}	41,0	0,0296
КРШ _{10-этанол}	20,0	0,0171
КРШ _{20-этанол}	22,0	0,0191
КРШ _{30-этанол}	29,0	0,0296
КРШ _{10-H₂O}	23,0	0,0191
КРШ _{20-H₂O}	17,0	0,0185
КРШ _{30-H₂O}	12,0	0,0095
Примечание: составлено авторами		

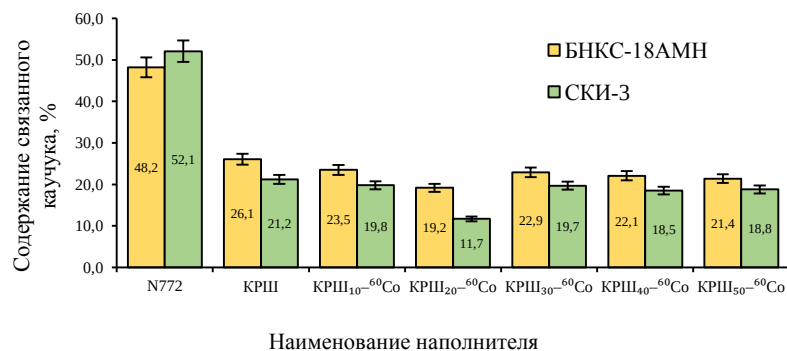
Результаты полученных данных, представленных в табл. 3, демонстрируют, что γ -облучение инновационного наполнителя приводит к снижению удельной поверхности в 1,5-2,3 раза. Данный эффект, предположительно, связан с агрегацией частиц под совместным воздействием радиации и индукции, что вызывает увеличение их среднего диаметра. При этом механическая активация инновационного наполнителя посредством помола в планетарной мельнице, как по сухому, так и в жидкофазных дисперсионных средах, способствует увеличению удельной поверхности. Так модификация в среде C_2H_5OH приводит к увеличению удельной поверхности в 1,3-1,8 раза, в то время как использование H_2O среды вызывает увеличение до 1,4 раза, за исключением образца КРШ_{30-H₂O}, для которого зафиксировано снижение в 1,3 раза (Кулеш и др., 2024).

3. Межфазные взаимодействия каучука с инновационным наполнителем в эластомерных композициях. В данной работе представляло интерес оценить влияние вида модификации инновационного наполнителя на содержание связанного каучука в сравнении с малоактивной маркой технического углерода для композиций с каучуками различного назначения (рис. 2).

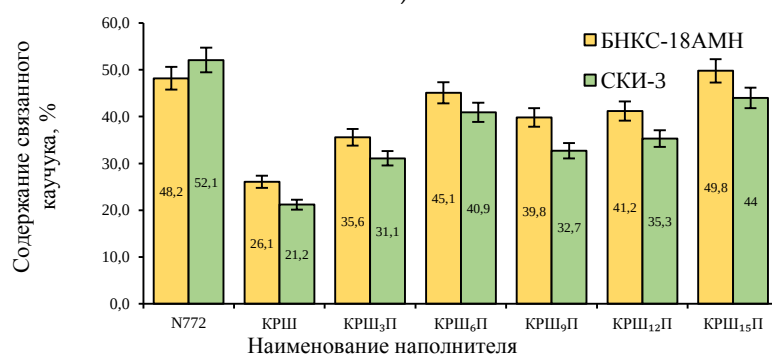
Выявлено, что в резиновых смесях на основе каучуков общего и специального назначения применение инновационного наполнителя, модифицированного γ -квантами при разных дозировках (рис. 2, а), приводит к снижению содержания связанного каучука в сравнении с немодифицированным наполнителем в 1,3 раза для резин с БНКС-18АМН, а для резин с СКИ-3 – до 1,8 раза. При сравнении с маркой малоусиливающего технического углерода наблюдается значительное уменьшение данного показателя: до 60,2 % с БНКС-18АМН и до 77,5 % с СКИ-3.

Модификация инновационного наполнителя в среде этанола в течение 30 минут (рис. 2, в) позволила получить резиновые смеси на основе БНКС-18АМН, значения связанного каучука которых фактически достигают аналогичных значений резиновой смеси, содержащей технический углерод марки N772 (значение содержания связанного каучука резин с N772 составляет 48,2 %, а с инновационным наполнителем – 47,9 %). В то же время модификация КРШ в водной среде (рис. 2, г) позволяет увеличить содержание связанного каучука в композициях различного назначения только по сравнению с наполнителем без модификации. Так, содержание связанного каучука в резине на основе БНКС-18АМН с исходным наполнителем составляет 26,1 %, для СКИ-3 – 21,2 %, в то время как аналогичный показатель резин с наполнителем, модифицированным в водной среде, находится в диапазоне 22,8-39,1 % для БНКС-18АМН и 17,8-32,4 % для СКИ-3.

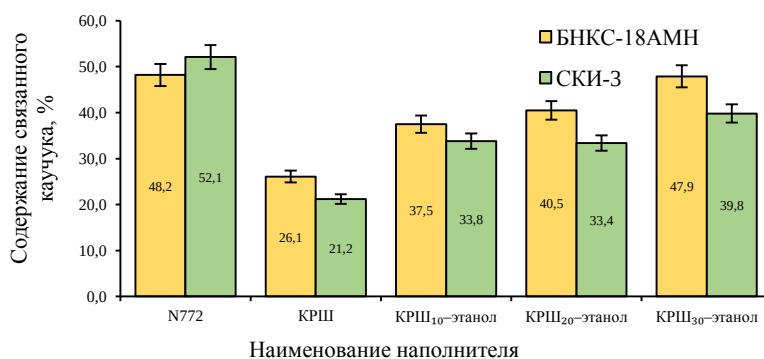
Введение в эластомерные композиции инновационного наполнителя, модифицированного в сухой среде с различным временем обработки (рис. 2, б), способствует повышению площади его контакта с полимером, а это оказывает положительное воздействие на связанный каучук, что наиболее заметно в композициях с БНКС-18АМН (Шашок, 2020).



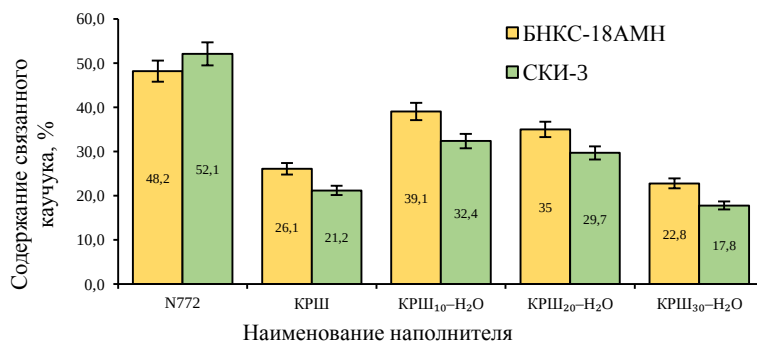
а)



б)



в)



г)

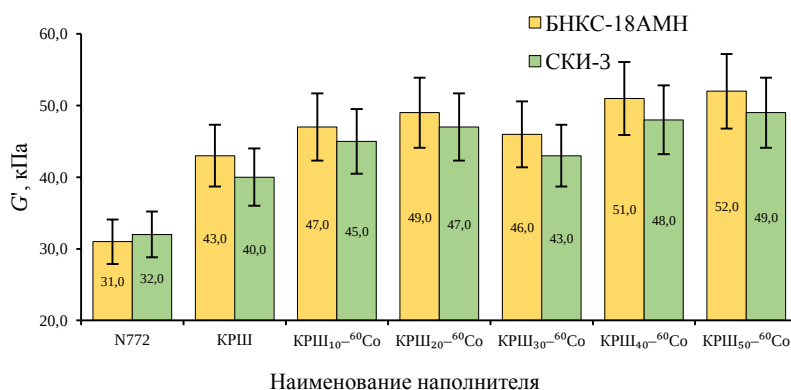
Рисунок 2. Зависимости изменения содержания связанного каучука резине различного назначения от вида модифицирования: а) на γ -установке; б) по сухому на планетарной мельнице; в) в жидкофазной среде C_2H_5OH на планетарной мельнице; г) в среде H_2O на планетарной мельнице

Примечание: составлено авторами

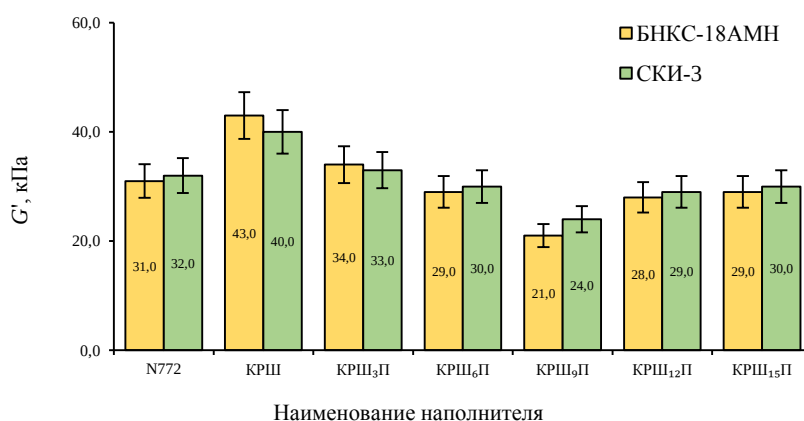
Из полученных результатов видно, что с инновационным наполнителем, модифицированным в течение 15 минут (КРШ_{15П}), содержание связанного каучука в эластомерных композициях с каучуком специального назначения БНКС-18АМН превышает соответствующие значения для резин с техническим углеродом N772.

4. Межагрегатные взаимодействия инновационного наполнителя в объеме эластомерной матрицы. Диспергирование наполнителей и компонентов в резиновой смеси имеет решающее значение и часто является проблемой для производителей. Измерение эффекта Пейна резиновых смесей можно использовать как для контроля качества диспергирования, так и для оценки уровня сетчатой структуры наполнителя в объеме эластомерной матрицы (рис. 3).

Результаты исследований показывают, что применение модифицированного γ -квантами инновационного наполнителя в резиновых композициях на основе каучуков различного назначения приводит к снижению показателя распределения компонентов смеси в сравнении с использованием технического углерода N772. Так, модификация инновационного наполнителя потоком γ -квантов (рис. 3, а) способствует увеличению эффекта Пейна до 1,7 раза для композиций с БНКС-18АМН и до 1,5 раза для композиций с СКИ-3 по сравнению с композицией, содержащей технический углерод.

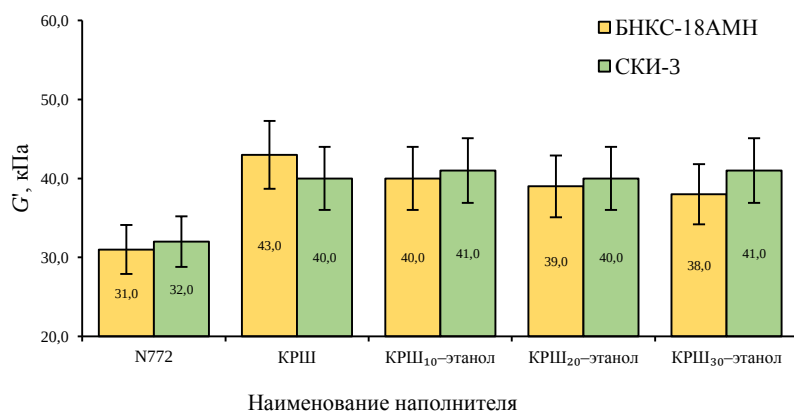


а)

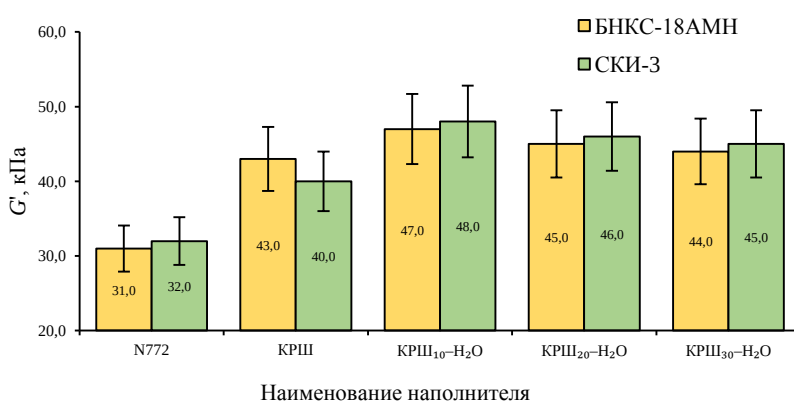


б)

Рисунок 3. Изменение качественных показателей диспергирования инновационного наполнителя в зависимости от вида модифицирования: а) на γ -установке; б) по сухому на планетарной мельнице; в) в жидкофазной среде C_2H_5OH на планетарной мельнице; г) в среде H_2O на планетарной мельнице



в)



г)

Рисунок 3 (продолжение).

Примечание: составлено авторами

Модификация инновационного наполнителя в жидких фазах существенно влияет на динамические свойства резин. Модификация инновационного наполнителя в C_2H_5OH (рис. 3, в) способствует увеличению комплексного динамического модуля резин со специальным каучуком до 1,4 раза, а резин с каучуком общего назначения – до 1,3 раза при сравнении с N772. Большой эффект оказывает среда H_2O (рис. 3, г): применение модифицированного наполнителя приводит к увеличению комплексного динамического модуля до 1,5 раза в композициях с каучуками общего и специального назначения.

Стоит отметить, что измельчение инновационного наполнителя с интервалами на охлаждение от 6 до 15 мин (рис. 3, б) приводит к незначительному снижению значений эффекта Пэйна в резиновых композициях с БНКС-18АМН при сравнении с техническим углеродом малой активности, содержащих наполнитель, модифицированный в течение 6, 12 и 15 мин. В случае применения КРШ_{12п} данный показатель снижается в 1,5 раза. Для резиновых смесей с синтетическим полиизопреновым каучуком характерно аналогичное изменение межагрегатного взаимодействия. Такой характер варьирования комплексного динамического модуля связан со снижением взаимодействия в системе наполнителей, что способствует лучшему распределению наполнителей в каучуковой матрице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований установлено, что модификация инновационного наполнителя на измельчительном оборудовании по сухому и в



жидкофазной среде C_2H_5OH позволяет обеспечить получение материала, обладающего повышенными показателями удельной поверхности, распределения частиц по размерам и сорбционного объема за счет увеличения активности поверхности при сравнении с наполнителем без аналогичной модификации, что способствует достижению значений параметров, таких как диспергирование компонентов в резиновой смеси и содержание связанного каучука, между наполнителем и каучуками общего и специального назначения на уровне малоусиливающего технического углерода марки N772. Дальнейшие исследования по данной тематике будут направлены на изучение влияния различных видов модификации инновационного наполнителя на основные физико-механические и эксплуатационные характеристики промышленных эластомерных композиций.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках исследования, профинансированного Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP19679452 и № BR21882289).

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы не использовали генеративный ИИ при написании данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Savova D., Apak E., Ekinci E., Yardim F., Petrov N., Budinova T., Minkova V. (2001). Biomass conversion to carbon adsorbents and gas. *Biomass and Bioenergy*, 21(2), 133–142, [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00027-7)
- Mo K.H., Alengaram U.J., Jumaat M.Z., Yap S.P., Lee S.C. (2016). Green concrete partially comprised of farming waste residues: A review. *Journal of Cleaner Production*, 117, 122–138, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.022>
- Vassilev S.V., Vassileva C.G., Song Y.C., Li W.Y., Feng J. (2017). Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. *Fuel*, 208, 377–409, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.036>
- Yahya M.A., Al-Qodah Z., Ngah C.W.Z. (2015). Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 218–235, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051>
- Ahmedna M., Marshall W.E. Rao R.M. (2000). Production of granular activated carbons from select agricultural by-products and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. *Bioresource Technology*, 71, 113–123, [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00070-X)
- Aygün A., Yenisoğlu-Karakaş S., Duman I. (2003). Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. *Microporous and Mesoporous Materials*, 66, 189–195, <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2003.08.028>
- Haykiri-Acma H., Yaman S., Kucukbayrak S. (2006). Gasification of biomass chars in steam–nitrogen mixture. *Energy Conversion and Management*, 47, 1004–1013, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.06.003>
- Das P.P., Chaudhary V. (2021). Moving towards the era of bio fibre based polymer composites. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100182, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100182>
- Petroudy S.D. (2017). Physical and mechanical properties of natural fibers. In *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*. Woodhead Publishing: Cambridge, 59–83, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0>
- Faruk O., Bledzki A.K., Fink H.P., Sain M. (2013). Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(1), 9–26, <https://doi.org/10.1002/mame.201300008>



- Khalf A.I., Ward A.A. (2010). Use of rice husks as potential filler in styrene butadiene rubber/linear low density polyethylene blends in the presence of maleic anhydride. *Materials & Design*, 31, 2414–2421, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.056>
- Bourmaud A., Beaugrand J., Shah D.U., Placet V., Baley C. (2018). Towards the design of high-performance plant fibre composites. *Progress in Materials Science*, 97, 347–408, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.005>
- Cruz J., Figueiro R. (2016). Surface Modification of Natural Fibers: A Review. *Procedia Engineering*, 155, 285–288, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.030>
- Komuraiah A., Kumar N.S., Prasad B.D. (2014). Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on their Mechanical Properties. *Mechanics of Composite Materials*, 50(3), 359–376, <https://doi.org/10.1007/s11029-014-9422-2>
- Sokolova M.D., Davydova M.L., Shadrinov N.V. (2018). The Modification of Surface of Dispersed Fillers for Their Application in Polymer–Elastomer Composites. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 54(5), 845–852, <https://doi.org/10.1134/S2070205118040147>
- Marzec A., Zaborski M. (2012). Pigment and Dye Modified Fillers as Elastomeric Additives. *Advanced Elastomers - Technology, Properties and Applications*, <https://doi.org/10.5772/50735>
- Stöckelhuber K.W., Svistkov A.S., Pelevin A.G., Heinrich G. (2011). Impact of Filler Surface Modification on Large Scale Mechanics of Styrene Butadiene/Silica Rubber Composites. *Macromolecules*, 44(11), 4366–4381, <https://doi.org/10.1021/ma1026077>
- Miedzianowska J., Masłowski M., Rybiński P., Strzelec K. (2021). Modified Nanoclays/Straw Fillers as Functional Additives of Natural Rubber Bio-composites. *Polymers*, 13, 5(799), <https://doi.org/10.3390/polym13050799>
- A.K. Mohanty et al. (2018). Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations. *Science*, 362, 536–542, <https://doi.org/10.1126/science.aat9072>
- Miedzianowska J., Masłowski M., Strzelec K. (2023). Improving performance of natural rubber composites by the application of functional biofiller: horsetail modified with silane coupling agents. *Cellulose*, 30, 10175–10198, <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05505-0>
- Gholampour A., Ozbakkaloglu T. (2020). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *The Journal of Materials Science*, 55, 829–892, <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- La Mantia F.P., Morreale M. (2011). Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(6), 579–588, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.017>
- Li X., Tabil L.G., Panigrahi S. (2007). Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), 25–33, <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>
- Vijay R., Vinod A., Singaravelu D.L., Sanjay M.R., Siengchin S. (2020). Characterization of Chemical Treated and Untreated natural fibers from Pennisetum orientale grass – A potential reinforcement for lightweight polymeric applications. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(1), 43–49, <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.06.008>
- Y. Guo, S. Yang, K. Yu, J. Zhao, Z. Wang, H. Xu. (2002). The preparation and mechanism studies of rice husk based porous carbon. *Materials Chemistry and Physics*, 74(3), 320–323, [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(01\)00473-4](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00473-4)
- Елецкий П.М., Яковлев В.А., Фенелонов В.Б., Пармон В.Н. (2008). Текстурные и адсорбционные свойства микропористых аморфных углеродных материалов, полученных методом химической активации карбонизированной высокозольной



- биомассы. Кинетика и катализ, 49(5), 741-753, <https://elibrary.ru/item.asp?id=11480314>
// Eleckij P.M., YAkovlev V.A., Fenelonov V.B., Parmon V.N. (2008). Teksturnye i adsorbcionnye svoystva mikroporistykh amorfnyyh uglerodnykh materialov, poluchennykh metodom himicheskoy aktivacii karbonizirovannoy vysokozol'noj biomassy. Kinetika i kataliz, 49(5), 741-753, <https://elibrary.ru/item.asp?id=11480314>
- Rong M.Z., Zhang M.Q., Liu Y., Yang G.C., Zeng H.M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 61(10), 1437-1447, [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00046-X)
- R. di Benedetto, M. Gelfuso, D. Thomazini. (2015). Influence of UV radiation on the physical-chemical and mechanical properties of banana fiber. *Materials Research*, 18, 265-272, <https://doi.org/10.1590/1516-1439.371414>
- S. Marais, F. Gouanvé, A. Bonnesoeur, J. Grenet, F. Poncin-Epaillard, C. Morvan, M. Métayer. (2005). Unsaturated polyester composites reinforced with flax fibers: effect of cold plasma and autoclave treatments on mechanical and permeation properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(7), 975-986, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.11.008>
- A.E. Kolosov, V.I. Sivetskii, E.P. Kolosova, V.V. Vanin, A.V. Gondlyakh, D.E. Sidorov, I.I. Ivitskiy, V.P. Symoniuk. (2019). Use of Physicochemical Modification Methods for Producing Traditional and Nanomodified Polymeric Composites with Improved Operational Properties. *International Journal of Polymer Science*, 1(1258727), <https://doi.org/10.1155/2019/1258727>
- V. Bobrova, A. Kasperovich, S. Efremov, S. Nechipurenko, S. Lezhnev, E. Panin. (2024). Effect of mechanical activation of natural filler on the properties of elastomeric composites. *Polymers and Polymer Composite*, 32, 1-11, <https://doi.org/10.1177/09673911241287860>
- Резниченко С.В. Морозова Ю.Л. (2012). Большой справочник резинщика, М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», Т.1: Каучуки и ингредиенты, 735 с. // Reznichenko S.V. Morozova Yu.L. (2012). Bol'shoj spravochnik rezinshchika, М.: ООО «Izdatel'skij centr «Tekhinform» MAI», Т.1: Kauchuki i ingredienty, 735 s.
- ГОСТ 14925-79. (1979). Каучук синтетический цис-изопреновый. Технические условия, М.: Изд-во стандартов, 29 с. // GOST 14925-79. (1979). Kauchuk sinteticheskij cis-izoprenovy., Tekhnicheskie usloviya, М.: Izd-vo standartov, 29 s.
- TU 38.30313-2006. (2007). Синтетические каучуки БНКС, Красноярск: Изд-во Краснояр. з-да синтетич. каучука, 35 с. // TU 38.30313-2006. (2007). Sinteticheskie kauchuki BNKS, Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyar. z-da sintetich. kauchuka, 35 s.
- Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniowska T. (1985). Reporting physisorption data for gas / solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity // *Pure and Applied Chemistry*, V. 57, P. 603-619. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
- Антипов А.Ф., Ефремов С.А., Нечипуренко С.В., Бектемисов Б.Н., Касперович А.В. (2023). Применение углерод-кремнистого композита в качестве наполнителя. Евразийский патент № 045499, 2023.11.29, Бюллетень № 11. // Antipov A.F., Efremov S.A., Nechipurenko S.V., Bektemisov B.N., Kasperovich A.V. (2023). Primenenie uglerod-kremnistogo kompozita v kachestve napolnitelya. Evrazijskij patent № 045499, 2023.11.29, Byulleten' № 11.
- Боброва В.В., Касперович А.В., Ефемов С.А., Нечипуренко С.В., Вернигоров К.Б., Казаков Ю.М., Стоянов О.В. (2024). Физическая модификация карбонизата рисовой шелухи для уменьшения его дисперсности. Нефтегазохимия – 2024: материалы VII Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск : БГТУ, С. 93-96. // Bobrova V.V., Kasperovich A.V., Efemov S.A., Nechipurenko S.V., Vernigorov K.B., Kazakov YU.M., Stoyanov O.V. (2024).



- Fizicheskaya modifikaciya karbonizata risovoj sheluhi dlya umen'sheniya ego dispersnosti. Neftegazohimiya – 2024 : materialy VII Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma po himicheskim tekhnologiyam i neftegazopererabotke, Minsk : BGTU, 2024, S. 93-96.
- Аверко-Антонович И.Ю., Бикмуллин Р.Т. (2002). Методы исследования свойств полимеров: Уч. пособие, Казань: КГТУ, 604 с. // Averko-Antonovich I.YU., Bikmullin R.T. (2002). Metody issledovaniya svojstv polimerov: Uch. posobie, Kazan': KGTU, 604 s.
- Гамлицкий Ю.А. (2011). Структурно-молекулярное описание явления усиления наполненных эластомеров. Проблемы шин и резинокордных композитов: материалы XXII симпозиума, М.: НИИШП, 13–31. // Gamlickij Yu.A. (2011). Strukturno-molekulyarnoe opisanie yavleniya usileniya napolnennyh elastomerov. Problemy shin i rezinokordnyh kompozitov: materialy XXII simpoziuma, M.: NIISHP, 13–31.
- Шашок Ж.С. (2020). Модифицирование эластомерных композиций углеродными наноструктурными материалами. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: специальность 05.17.06 Технология и переработка полимеров и композитов. Минск, 327 с. // Shashok Zh.S. (2020). Modificirovanie elastomernyh kompozicij uglerodnymi nanostrukturnymi materialami. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: special'nost' 05.17.06 Tekhnologiya i pererabotka polimerov i kompozitov. Minsk, 327 s.
- ASTM D6601–02. (2008). Standard test method for rubber properties – measurement of cure and after-cure dynamic properties using a rotorless shear rheometer, <https://store.astm.org/d6601-02r08.html>
- Кулеш В. В., Боброва В.В., Касперович А.В. (2024). Исследование свойств эластомерных композиций с наполнителем на основе растительного сырья. Актуальные проблемы науки о полимерах: материалы IV Всероссийской научной конференции (с международным участием) преподавателей и студентов вузов, Казань : КНИТУ, С. 78-80. // Kulesh V. V., Bobrova V.V., Kasperovich A.V. (2024). Issledovanie svojstv elastomernyh kompozicij s napolnitelem na osnove rastitel'nogo syr'ya. Aktual'nye problemy nauki o polimerah: materialy IV Vserossijskoj nauchnoj konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem) prepodavatelej i studentov vuzov, Kazan': KNITU, S. 78-80.

Информация об авторах
Авторлар туралы мәліметтер
Information about authors



Боброва Валерия Владимировна – кандидат технических наук, научный сотрудник, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

Боброва Валерия Владимировна – техника ғылымдарының кандидаты, ғылыми қызметкер, Беларусь мемлекеттік технологиялық университеті, Минск, Беларусь

Bobrova Valeria Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Research Fellow, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus,

e-mail: lerik_bobrik94@belstu.by

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7417-194X>



Касперович Андрей Викторович – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

Касперович Андрей Викторович – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Беларусь мемлекеттік технологиялық университеті, Минск, Беларусь

Kasperovich Andrey Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus,

e-mail: andkasp@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4403-6235>



Нечипуренко Сергей Витальевич – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Нечипуренко Сергей Витальевич – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Nechipurenko Sergey Vitalievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: nechipurenkos@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7463-1679>



Ефремов Сергей Анатольевич – доктор химических наук, профессор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Ефремов Сергей Анатольевич – химия ғылымдарының докторы, профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Efremov Sergey Anatolyevich – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: efremosa@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3542-4140>



Ахметова Патам Тургановна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан,

Ахметова Патам Тургановна – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, АЛТ Мұхамеджан Тынышпаев атындағы университеті, Алматы, Қазақстан

Akhmetova Patam Turganovna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshpayev, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: patam67@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3788-3671>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_45
MPNТИ 68.43.29

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗЕРНОВОГО ЭКСТРУДЕРА ОТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ШНЕКОВОЙ ГРУППЫ

АСТЫҚ ЭКСТРУДЕРІНІҢ ЖҰМЫС ТИІМДІЛІГІНІҢ БҰРАНДАЛЫ ТОП БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНЕ ТӘУЕЛДІЛІГІ

THE DEPENDENCE OF THE EFFICIENCY OF THE GRAIN EXTRUDER ON THE PARAMETERS OF THE SCREW GROUP PARTS

А.В. Вавилов ¹, Г.А. Гурьянов ², М.В. Дудкин ², А.И. Ким ³, В.С. Яковлев ²

¹ТОО «НПО ИННОТЕХ», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

²Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

⁴Университет «МИРАС», г. Шымкент, Казахстан

Ключевые слова:

экструдер, затвор,
компрессионные
кольца, противоток
материала,
производительность
экструдера, головка
фильеры

АННОТАЦИЯ

Данные исследования направлены на обоснование и подтверждение эффективности рабочего процесса зернового экструдера при варьировании его эксплуатационными параметрами при работе с зерновой смесью, дополненной до трети объема отходами растениеводства и лесозаготовок. Серийные экструдеры уже настроены для работы с определенными зерновыми смесями, и добавление в их состав каких-либо иных включений может привести к нарушению рабочего процесса или к поломке шнековой группы экструдера. Чтобы рабочий процесс экструдера был надежен и экономически выгоден, приходится иногда конструктивно менять некоторые детали или узлы шнековой группы, чему и посвящено данное научное исследование. В эксперименте использовали кормовую зерновую смесь, состоящую из 85-87 % зерновой насыпки, 10-13 % отходов уборки подсолнечника и до 3 % добавок пихтовой хвои, насыщенных витаминами. Полученные результаты позволили заключить, что любые отходы растениеводства, если они предварительно были измельчены, могут добавляться в зерновые смеси для экструдирования. Мощности экструдера и запаса надежности его шнековой группы достаточно для переработки отходов уборки подсолнечника с добавлением хвои пихты сибирской.

Түйінді сөздер:

экструдер, ысырма,
қысу сақиналары,
материалға қарсы
ағын, экструдердің
өнімділігі, сүзгі
басы

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл зерттеулер астық экструдерінің жұмыс процесінің тиімділігін негіздеуге және растауға бағытталған, оның пайдалану параметрлері толықтырылған астық қоспасымен, көлемнің үштен біріне дейін, Өсімдік шаруашылығы мен ағаш кесу қалдықтарымен жұмыс істеу кезінде өзгереді. Сериялық экструдерлер қазірдің өзінде белгілі бір астық қоспаларымен жұмыс істеуге бейімделген және олардың құрамына басқа қоспалар қосу жұмыс процесінің бұзылуына немесе экструдер бұрандалы тобының бұзылуына әкелуі мүмкін. Экструдердің жұмыс процесі сенімді және үнемді болуы үшін кейде осы ғылыми зерттеуге арналған бұрандалы топтың кейбір бөлшектерін немесе түйіндерін сындарлы түрде өзгерту керек. Тәжірибеде 85-87 % астық үйіндісінен, 10-13 % құнбағыс жинау қалдықтарынан және



3 % дейін дәрумендермен қаныққан шырша инелерінен тұратын жемдік астық қоспасы қолданылды. Нәтижелер өсімдік шаруашылығының кез келген қалдықтары, егер алдын ала ұсақталған болса, экструдтау үшін астық қоспаларына қосылуы мүмкін деген қорытындыға келді. Экструдердің қуаты және оның бұрандалы тобының сенімділік қоры сібір шыршасының инелерін қосып, күнбағыс жинау қалдықтарын өңдеуге жеткілікті.

Keywords:

Extruder, gate, compression rings, material counterflow, extruder performance, die head

ABSTRACT

These studies are aimed at substantiating and confirming the efficiency of the working process of a grain extruder when varying its operational parameters when working with a grain mixture supplemented, up to a third of the volume, with crop production and logging waste. Serial extruders are already configured to work with certain grain mixtures, and the addition of any other inclusions to their composition may lead to disruption of the workflow or damage to the screw group of the extruder. In order for the working process of the extruder to be reliable and economically profitable, it is sometimes necessary to constructively change some parts or assemblies of the screw group, which is the subject of this scientific study. The experiment used a feed grain mixture consisting of 85-87% of grain bulk, 10-13% of sunflower harvest waste and up to 3% of fir needles saturated with vitamins. The results obtained allowed us to conclude that any crop production waste, if it was previously crushed, can be added to grain mixtures for extrusion. The capacity of the extruder and the reliability reserve of its screw group are sufficient for processing sunflower harvesting waste with the addition of Siberian fir needles.

ВВЕДЕНИЕ

Можно ли увеличить производительность серийно выпускаемого экструдера, не повышая потребление энергии и не переделывая капитально его конструкцию, без внешнего вмешательства в основные узлы? Так как экструдер широко распространен в сельскохозяйственном производстве, то и предложений по его модернизации достаточно.

Современное растениеводство изобилует не только полезным продуктом, но и его остатками, которые или не перерабатываются, или вообще не убираются с полей. К таким остаткам относятся жмых, шляпки и стебли подсолнуха, полные полезных веществ, объемные по заполнению и хорошо поедаемые животными после их переработки. За счет их относительной дешевизны, особенно стеблей и шляпок, возможно оборудование уборочных комбайнов отдельным приспособлением, которое будет собирать и производить первичную обработку шляпок и стеблей подсолнуха, стоимость которых будет близка к нулю. Затем предлагается измельченную массу из отходов подсолнечника (гречки, сои, гороха ... хвои пихты сибирской) добавлять до трети объема в зерновые кормовые смеси, идущие на переработку в экструдеры. Влияние подобных добавок на надежность шнековой группы экструдеров проверено в работах многих ученых (Mu et al., 2023; Chuikov, Kononov, Dontsova, & Petrova, 2024; Mironov, Obolenskiy, Goeva, & Grishin, 2019; Bulatov, 2015; Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025). Причем проверялось всё: шнековые секции, валы экструдера, корпусные детали, фильеры, рамы, шкивы и т.д. К таким исследованиям можно отнести труды Kraugerud & Svihus (2011), Kushnir, Gavrilov & Shkotova (2019), Li, Xiong & Li (2019), Kabdusheva et al. (2020), Liu et al. (2020), Frolov, Kotelevskaya & Tumanova (2020), Machikhin, Zurabishvili & Panfilova (1991), Kukhta (1987), Kurnish, Gavrilov & Kim (2016), Doudkin et al. (2025), Morozov, Bogdanov, Smelik, Volkhonov & Kukhar (2021) и др.

Например, Adache, Mogaji, Olabanji Olayinka & Ayodeji Olagoke (2025) занимались исследованием надежности шнека и рамы экструдера. Были изучены деформации материала шнека и рамы экструдера при их различном нагружении.

Yadav, Jha & Darlami (2023) усовершенствовали шнековый вал экструдера для переработки различной суспензии при производстве органических удобрений.



Bogdanov (2021) обосновал комплектование шнекового вала не короткими, а широкими и гладкими коническими затворами, повышающими рост давления и температуры смеси в шнековой группе экструдера до его выхода из фильеры.

Pareek & Madloi (2022) в ходе статического структурного анализа в ANSYS получили большое количество результатов причин поломок шнекового вала.

Авторы текущего исследования имели доступ к производственной базе ТОО «НПО ИННОТЕХ», где для исследования им был предоставлен автономный зерновой экструдер ПЭ-150, Казахстанского производства, выпускаемый Кустанайским ТОО «АГРОТЕХСЕРВИС 12». В этом экструдере в едином рабочем процессе объединены загрузка, перемешивание, дозирование, транспортировка, захват, плющение, сжатие, нагрев, противоток, стерилизация, гомогенизация, преобразование формы и др. Однако при сухом экструдировании все эти операции могут легко прерваться, так как в этом режиме ресурс шнековой группы экструдера недостаточно продолжителен и обычно не превышает $\approx 500-600$ часов работы, что в 2-3 раза ниже, чем при влажном экструдировании. Производительность экструдера при сухом экструдировании также ниже, чем при влажном, а рабочий процесс более нестабилен.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использовали экспериментальный метод и регрессионный анализ, результаты которых сравнивали с аналитическими расчетами. Согласно выдвинутой гипотезе, для синхронизации и безопасности работы наиболее выходящих из строя деталей экструдера, таких как цельный шнековый вал, несущий шнековый вал и шнековые секции, объединенные с несущим валом и конусной головкой в шнек экструдера, а также детали корпуса шнековой группы и фильеры, следует вместо цилиндрических затворных колец, которые работают как торцевой тормоз для транспортируемой шнеком смеси, использовать уже известные затворные кольца конической формы, но с разной шириной корпуса и углом наклона передней стенки. Их использование за счет изменяющейся ширины кольца позволит регулировать состояние уже гомогенизированной смеси, предупреждая возможные микропаровзрывы влажного экструдата при выходе из фильеры или поломки витков шнека при работе с пересушенной смесью. На рис. 1 приведены образцы возможных поломок деталей экструдера при несоблюдении условий рабочего процесса (Karrab & Ballem, 2020a).



Рисунок 1. Образцы возможных поломок деталей экструдера

Примечание: составлено авторами

Устройство шнековой группы экструдера, отделенной от привода, показано на рис. 2.

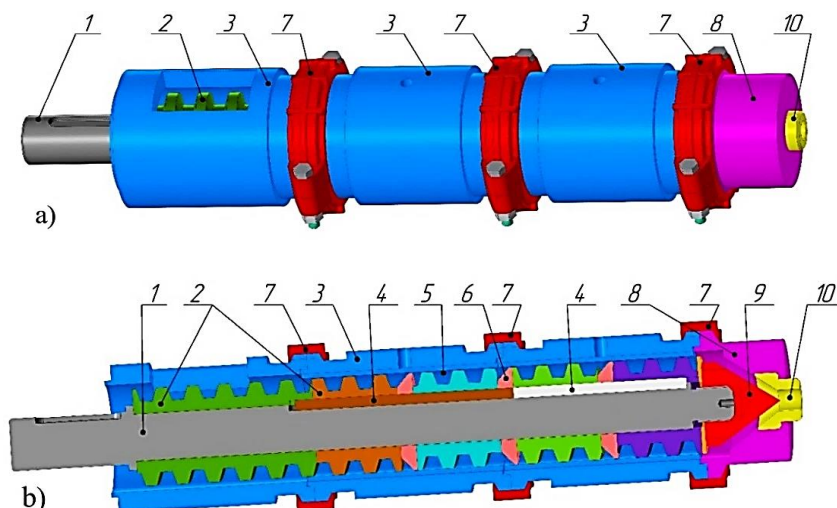


Рисунок 2. Устройство шнековой группы экструдера: 1 – вал шнека; 2 – питающие секции шнека; 3 – корпус; 4 – шпонка; 5 – пазы противотока корпуса; 6 – компрессионный затвор; 7 – хомуты соединительные; 8 – съемная регулировочная матричная головка; 9 – конусная головка шнекового вала; 10 – фильера
Примечание: составлено авторами

Работа экструдера хорошо описана во многих научных трудах (Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025; Machikhin, Zurabishvili, & Panfilova, 1991; Kukhta, 1987), поэтому отметим лишь, что кормовая смесь внутри корпуса шнековой группы движется не только вперед, к выходу из фильеры, но и по пазам противотока может возвращаться в начальные шнековые секции, где вновь поступает в переработку. Как это получается? Рассмотрим процесс с самого начала. Из бункера (не показан) смесь дозатором (не показан) подается в зону ее захвата шнековыми секциями 2 (рис. 2) и начинает транспортироваться в сторону фильеры 10. При движении смесь накапливается между витков шнековых секций с разным шагом и начинает выдавливаться в зону между корпусом 3 и шнеком 2, попутно нагреваясь. Дойдя до затворных колец 6, смесь упирается в них, так как они не имеют навитки и витков, и начинает усиленно сжиматься, одновременно проталкиваясь вперед.

Смесь, которая не продавилась между наружной поверхностью шнеков 2 и корпусом 3, перед затворными кольцами 6 вдавливается в пазы противотока 5 (рис. 3), протянутые через всю длину корпуса 3, концентрируется там и под действием увеличивающегося давления начинает выдавливаться в обратную сторону, в сторону загрузки.

Та же смесь, которая все-таки продавилась между затворным кольцом 6 и корпусом 3, сдавливается, сплющивается, её температура увеличивается, а структура меняется вплоть до начала плавки смеси. Горячая расплавленная смесь попадает в регулируемое отверстие фильеры 10 и выдавливается из него под высоким давлением (Doudkin et al., 2025; Morozov, Bogdanov, Smelik, Volkhonov, & Kukhar, 2021; Bogdanov, 2021).

От величины рабочего давления в шнековой группе зависит стабильность рабочего процесса экструдера. После нескольких проверочных экспериментов была сформулирована гипотеза о влиянии ширины конических компрессионных колец 6 затвора и их наклона к внутренней поверхности корпуса 3, а также направления наклона (острием вперед, навстречу движения смеси, или острием назад, в сторону фильеры, а к смеси цилиндрическим торцом) на накопленное давление и температуру экструдированной смеси (Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025).

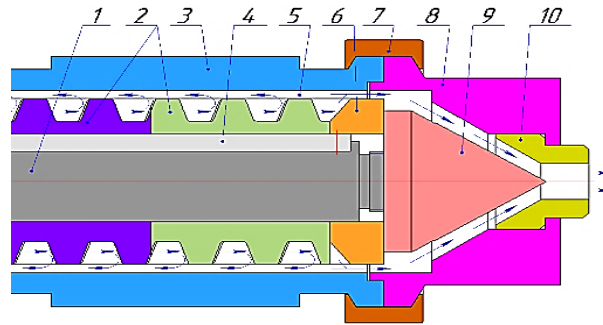


Рисунок 3. Схема рабочего процесса в выпускающей части шнековой группы: 1 – несущий вал шнека; 2 – шнековые секции; 3 – шнековый корпус; 4 – продольный стопор-шпонка; 5 – корпусные пазы противотока; 6 – затворная втулка; 7 – хомут крепежный; 8 – головка матрицы; 9 – конусный наконечник вала; 10 – матрица фильеры

Примечание: составлено авторами

Для убыстрения роста внутришнекового давления и, соответственно, температуры смеси, между секциями шнека на производстве дополнительно устанавливают кольца компрессионных затворов, внешняя поверхность колец которых образует с корпусом уменьшенный зазор, что начинает препятствовать проходу перерабатываемой смеси и провоцирует быстрое увеличение давления и трения смеси, вызывая рост температуры. Проталкивание кормовой смеси через упоры компрессионных затворов способствует её гомогенизации. Затворы в своей зоне убыстряют процессы, происходящие в смеси, и способствуют сокращению времени цикла прохода смеси до достижения ею необходимых для экструдирования параметров и состояния. В связи с тем, что необходимое состояние, температура и подвижность смеси достигаются при прохождении смесью более короткой части шнека, это позволяет сократить на одну или две секции общую длину шнека, так как процесс убыстрился и прошёл на более коротком расстоянии, без ущерба процессу экструзии, и нет смысла нагревать и уплотнять смесь более уже достигнутого состояния (Karrab & Ballem, 2020a; Karrab & Ballem, 2020b; Lyashuk, Pyndus, Lutsiv, Vovk, Poberezhna, Tretiakov, & Zoloty, 2019).

Проверим гипотезу зависимости улучшения и убыстрения процессов в зоне каждой секции шнека от изменения геометрической формы и продольной длины компрессионных колец затвора. Будем изменять продольную длину колец, а их цилиндрическую форму сменим на коническую и таким образом за счёт уменьшения объёма компрессионного кольца увеличим на такую же величину объём проталкиваемой смеси, что является положительным фактором, так как данный объём смеси не будет по каналам корпуса шнека возвращаться на повторную переработку.

Определим давление P_{pr} проталкивания экструдруемой смеси при её прохождении через кольцо компрессионного затвора конической формы. На рис. 4 материал смеси под действием силы P_x продвигается шнеком слева направо и сужается к зазору за счёт конической формы компрессионных колец затвора (Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025).

$$P_x = \frac{P_k}{\left(\frac{(r_1 + l_k g \alpha)^2}{r_1^2 - r_0^2} \right)^{0.5 \xi \left(\frac{2f}{l_k g \alpha} - 1 - f^2 \right)}} \quad (1)$$

где r_1 – начальный радиус конического компрессионного затвора, м.

Определим давление прессования перед коническим компрессионным кольцом (l_k – длина компрессионного кольца, м):

$$P_{pk} = \frac{P_k}{\left(\frac{(r_1 + l_k \tan \alpha)^2}{r_1^2 - r_0^2} \right)^{0,5 \xi \left(\frac{2f}{\tan \alpha} - 1 - f^2 \right)}} \quad (2)$$

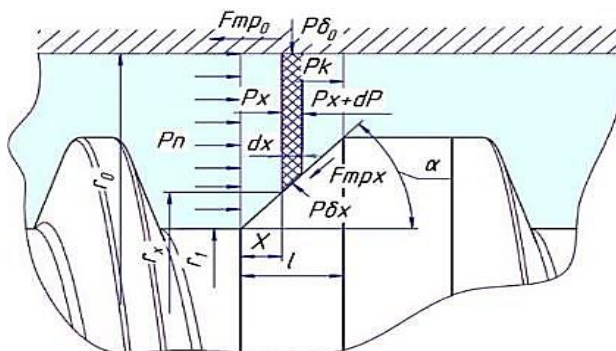


Рисунок 4. Движение смеси с отходами растениеводства через кольцо конического компрессионного затвора в шнековой группе экструдера

Примечание: составлено авторами

Для каждой экструдруемой кормовой смеси можно подобрать компрессионное кольцо с самыми рациональными параметрами. Полученные теоретические зависимости способны определить искомое давление на экструдруемый материал в любой интересующей точке внутри корпуса шнековой группы. Давление, генерируемое гребнями витков секций шнека, линейно по его длине, поэтому давление в любой точке шнека можно рассчитать (Morozov, Bogdanov, Smelik, Volkhonov, & Kukhar, 2021):

$$P_{x,n} = \frac{(P_{pn} - P_{kn}) \cdot l}{l_n} \quad (3)$$

где P_{pn} – давление перед кольцом затвора (в конце n -й секции шнека), Па;

P_{kn} – давление в начале компрессионного кольца n -й секции шнека, Па;

l – длина от начала шнека, до назначенной точки расчета давления, м;

l_n – общая длина n -й секции шнека.

На рис. 5 схематически в виде графиков показаны ступени развития давления до максимального внутри корпуса шнековой группы по всей длине шнека.

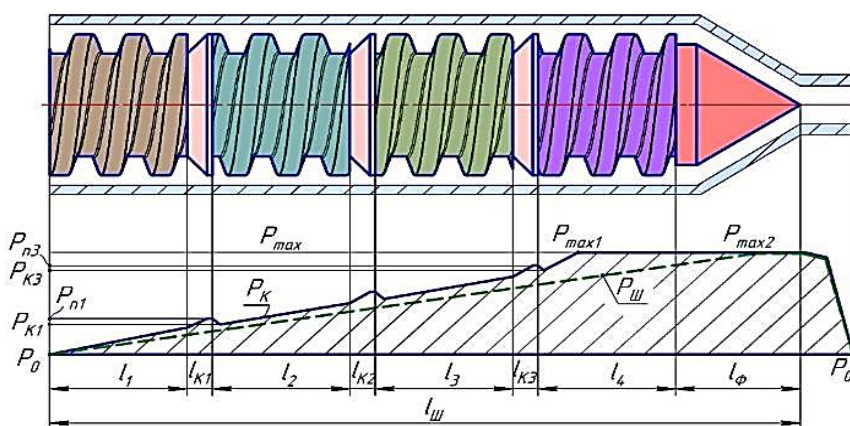


Рисунок 5. Достижение пика давления в экструдере при наличии конических компрессионных затворов и без них

Примечание: составлено авторами



По сути, на рис. 5 показан самый важный момент эксперимента: на сравнительном графике видно, что необходимый для экструдирования пик давления и, соответственно, температуры при использовании конических компрессионных затворов достигается уже на начале участка 4 шнека и дальше, через фильеру, движется без каких-либо весомых изменения пикового состояния смеси. Смесь уже дошла «до кондиции», и ее можно выпускать. То есть, после последнего пика взлета давления на 4 участке шнека его продолжение можно исключить из процесса и конструкции, так как это продолжение шнека не приносит никакого повышения давления в экструдере и не влияет на процесс.

Предварительными теоретическими исследованиями зависимости выпрессовывающего давления в шнековом корпусе от конструктивных особенностей сборки шнека подтверждено значительное влияние на общее среднее давление длины формирующей головки, площади $S_{отв}$ проходного сечения фильеры и продольной длины компрессионных колец затвора.

Зависимости (1), (2), (3) позволяют определить давление в любой точке шнековой группы экструдера. Применение конических компрессионных колец затвора разной ширины ускоряет повышение среднего давления и, возможно, температуры перерабатываемой смеси на более короткой длине шнека, что несомненно является их преимуществом перед цилиндрическими кольцами и позволяет при необходимости укоротить длину последней секции шнека, а вместе с нею и длину всего шнека, что даст сокращение металлоемкости устройства.

Увеличению температуры смеси по существующей гипотезе может способствовать увеличение поверхностей трения сжатия на шнеке экструдера, которые за счет повышения работы сил трения, например, массы кормовой смеси между витками шнека и за счет повышения давления в местах установки затворов обеспечат повышение температуры.

На значение температуры обработки смеси существенно влияет давление в шнековой группе экструдера, величину которого можно заранее спрогнозировать подбором разных по длине и форме компрессионных колец затвора или дальнейшей регулировкой площади сечения выходного отверстия фильеры. Покажем графически влияние изменения продольной длины и формы компрессионных колец затвора (рис. 6, а) и площади проходного сечения отверстия фильеры на общую температуру кормовой смеси внутри шнековой группы (рисунок 6,б) со следующими параметрами экструдера ПЭ-150: шаг шнека $t_1=t_2=t_3=20$ мм; длина шнека $l_1=160$ мм, $l_2=l_3=135$ мм; внешний радиус зуба шнека $r_{vn1}=r_{vn2}=r_{vn3}=37$ мм; продольная длина компрессионных колец ($l_{1к}=4$ мм; $l_{2к}=8$ мм; $l_{3к}=12$ мм; $l_{4к}=16$ мм); давление выпрессовывания перед фильерой $P_p=0,92$ МПа.

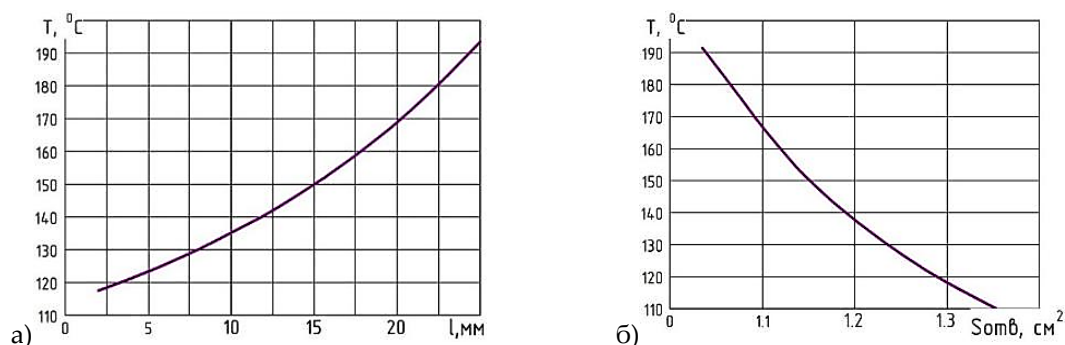


Рисунок 6. Влияние продольной длины l компрессионного кольца затвора (а) и площади $S_{отв}$ проходного сечения отверстия фильеры (б) на изменение температуры обработки смеси внутри шнековой группы

Примечание: составлено авторами

Из анализа точек графика 6, *а* вытекает вывод, что длина компрессионных колец существенно влияет на величину давления в шнековой группе. Из рисунка 6, *б* видно, что чем больше площадь S_{otv} проходного сечения отверстия фильеры, тем меньше температура в шнековой зоне. Выходит, что в процессе эксплуатации, закручивая фильеру и тем изменяя проходное сечение фильеры, можно корректировать не только давление, но и требуемую температуру внутри шнековой зоны.

Коэффициент увеличения плотности экструдата после прохождения им компрессионного кольца, который покажет, на сколько еще можно увеличить конкретную подачу, определим по формуле

$$C_r = \frac{r_0^2 - r_1^2}{r_0^2 - r_2^2}, \quad (4)$$

где r_0 – внутренний радиус цилиндра шнековой группы экструдера, м;

r_1 – начальный радиус компрессионного кольца затвора, м;

r_2 – радиус компрессионного кольца на выходе, м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты по проверке аналитики и реальных текущих показателей рабочего процесса экструдера были проведены на производственной базе ТОО «НПО ИННОТЕХ», где была предоставлена оригинальная лабораторная установка на основе натурального зернового экструдера ПЭ-150. Экструдировалась кормовая смесь, содержащая по составу 87 % зернового основания, 10 % добавок отходов после уборки подсолнечника и 3 % из отходов лесосуборки в виде хвои пихты.

В шнековую группу входят (рис. 7): секционный шнековый вал 1 с конической головкой 8, корпус первой секции 2, матрица фильеры 3, корпуса 4 п-секций шнекового корпуса, шнековые секции 5, затворы 6, выпускная фильера 7, фиксирующие хомуты 9, загрузной бункер 10.

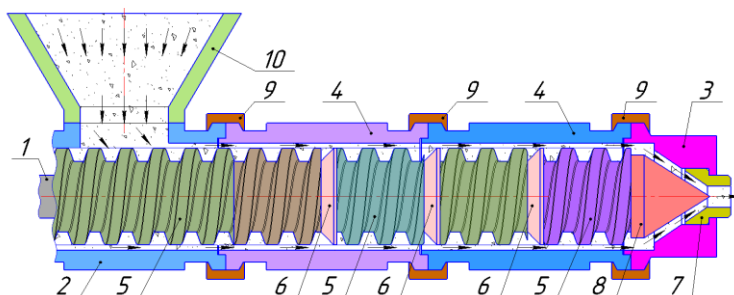


Рисунок 7. Динамика продвижения зерновой смеси в шнековой группе

Примечание: составлено авторами

Динамика рабочего процесса (рис. 7): формуемая смесь через бункер загрузки 10 поступает на циклический дозатор (не показано), дальше захватывается первой питающей секцией шнека 5, которая первично сжимает, ломает, закручивает и продавлиывает смесь на следующую секцию шнека и далее до первого затворного кольца 6. Затвором 6 смесь тормозится, сдавливается, плющится и перетекает под давлением через затвор 6 в следующую шнековую секцию 5, где операции транспортировки, сжатия, плющения и уже более сильного нагрева повторяются. Затворные кольца 6 не имеют транспортирующих витков, поэтому служат своеобразными препятствиями, тормозящими смесь, которые она вынуждена обтекать, что сопровождается увеличением температуры и давления из-за роста сопротивлений её перемещению. Смесь, которая не смогла «протиснуться» вперёд между шнековым корпусом 4 и кольцом затвора 6,



вдавливается в горизонтальные пазы противотока и тем же давлением выталкивается назад, к бункеру 10 (Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025).

Эксперимент определения эффективности рабочего процесса экструдера стандартно проводился по методике трехфакторного эксперимента, рабочая частота варьировалась в пределах 685-785 мин⁻¹ для выхода экструдата 95-110 кг/час. Сечение фильеры на выходе $S_{отв} = 1,2 \text{ см}^2$. Шаг (переменный) шнека $t=(20, 22, 24) \text{ мм}$, наибольший радиус витков $r_{vn1} = 18 \text{ мм}$, температура 120-140 °С, обеспечиваемая противодействием затворов, схематично приведенных на рисунке 8 и 9, с шириной от 4 до 12 мм. Варьировались и фиксировались показатели температуры, производительности, затраченной мощности.

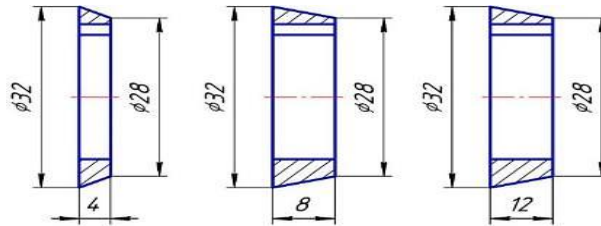


Рисунок 8. Размеры экспериментальных затворных колец

Примечание: составлено авторами



Рисунок 9. Натурные конические кольца затвора экструдера

Примечание: составлено авторами

По данным эксперимента (Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025) были составлены три уравнения регрессии (температуры экструдруемой смеси T (°С), производительности Q (кг/час) и затрат мощности N (кВт) со значимостью $\alpha = 0,05$), представляющие полную квадратичную модель, адекватно аппроксимирующую результаты эксперимента:

$$T = -197,10 + 0,8427 \cdot X_1 + 0,6563 \cdot X_2 - 0,0535 \cdot X_3 - 0,00057 \cdot X_1^2 + 0,08125 \cdot X_2^2 - 0,00552 \cdot X_3^2 \quad (5)$$

$$Q = -171,47 - 0,2228 \cdot x_1 + 14,5225 \cdot x_2 + 17,4487 \cdot x_3 + 0,000015 \cdot x_1^2 + 0,0015 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,01888 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,193 \cdot x_2^2 - 0,7344 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,4539 \cdot x_3^2 \quad (6)$$

$$N = 2,735654 - 0,004685 \cdot X_1 + 0,012739 \cdot X_2 - 0,004756 \cdot X_3 + 0,000005 \cdot X_1^2 + 0,000062 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,000018 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,001875 \cdot X_2^2 - 0,001287 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,000365 \cdot X_3^2 \quad (7)$$

По данным уравнениям регрессии построены соответствующие зависимости температуры экструдруемой смеси T (рис. 10), производительности Q экструдера (рис. 11) и мощности N (рис. 12) от изменения соответствующих факторов: частоты вращения шнекового вала n (об/мин); длины затворов h (мм); шага шнековой секции t (мм).

На рис. 10 представлены три полученные результирующие плоскости показателей, наложенных одна на другую: показатели верхней (1) плоскости – с фиксированным шагом $t = 20 \text{ мм}$; средние показатели плоскости (2) – с шагом $t = 24 \text{ мм}$; показатели нижней плоскости (3) – с шагом $t = 28 \text{ мм}$.

На рис. 11 результирующие плоскости также наложены друг на друга: первая плоскость (1) – характеризует результаты при фиксированной частоте $n=785$ об/мин; (2) – при частоте вращения шнекового вала $n = 735$ об/мин; (3) – при частоте $n=685$ об/мин и подтверждают, что шаг шнековых секций и частота их вращения наиболее сильно влияют на значение производительность, максимальное значение которой в опытах доходило до $Q=135$ кг/ч при оптимальных $t=24$ мм и $h=8$ мм.

Плоскости на рис. 12 показывают изменение мощности от n (об/мин) и h (мм) для фиксированных значений шага шнека: (1) $t = 20$ мм; (2) $t=24$ мм; (3) $t = 28$ мм. Опытное потребление мощности варьировалось с 1,94 кВт до максимума 2,53 кВт.

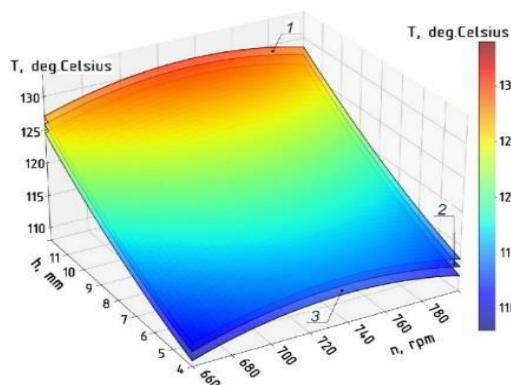


Рисунок 10. Результирующие плоскости данных изменения температуры T ($^{\circ}\text{C}$) от параметров n (об/мин), h (мм) и t (мм)

Примечание: составлено авторами

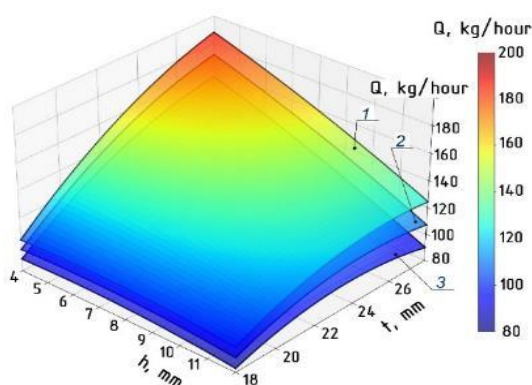


Рисунок 11. Результирующие плоскости данных изменения производительности Q (кг/час) от параметров h (мм), t (мм) и n (об/мин)

Примечание: составлено авторами

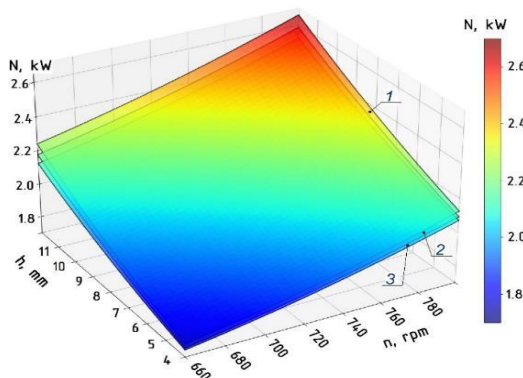


Рисунок 12. Результирующие плоскости данных изменения мощности N (кВт) от параметров n (об/мин), h (мм) и t (мм)

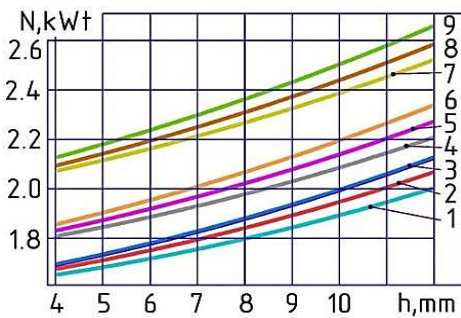
Примечание: составлено авторами

Анализ числовых плоскостей отклика, показанных на рис. 10, 11 и 12, подтверждает соответствие ранее полученных математических моделей экспериментальным показателям с максимальным отклонением 4,9 %.

Проанализируем полученные ранее зависимости мощности N (кВт), затраченной на процесс экструдирования кормовой смеси, и построим новые графики значений мощности для трех параметров: n – частоты вращения вала шнека, об/мин; h – длины



затвора, мм; t – шага шнека, мм. Для фиксированного параметра t построены графики (рис. 13) и проанализированы зависимости мощности N от параметров n и h . Анализ проводился для трех значений t : 20 мм, 24 мм и 28 мм.



- 1 - $t = 28$ мм; $n = 600$ об/мин
- 2 - $t = 24$ мм; $n = 600$ об/мин
- 3 - $t = 20$ мм; $n = 600$ об/мин
- 4 - $t = 28$ мм; $n = 700$ об/мин
- 5 - $t = 24$ мм; $n = 700$ об/мин
- 6 - $t = 20$ мм; $n = 700$ об/мин
- 7 - $t = 28$ мм; $n = 800$ об/мин
- 8 - $t = 24$ мм; $n = 800$ об/мин
- 9 - $t = 20$ мм; $n = 800$ об/мин

Рисунок 13. График изменения N от h при разных t и n

Примечание: составлено авторами

На рис. 14 приведена тепловая карта изменения мощности N для фиксированного значения $t = 24$ мм при изменении n и h , на рис. 15 – диаграмма влияния n и h в виде среднего абсолютного значения производной (САЗП) на мощность N при разных значениях шага t .

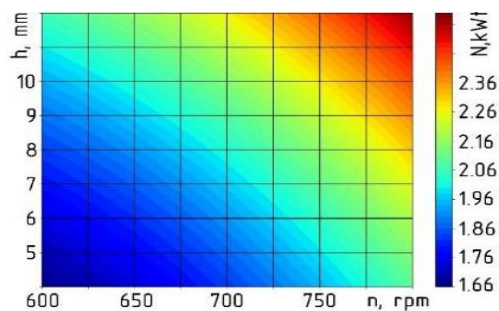


Рисунок 14. Тепловая карта N при $t = 24$ мм при разных n и h

Примечание: составлено авторами

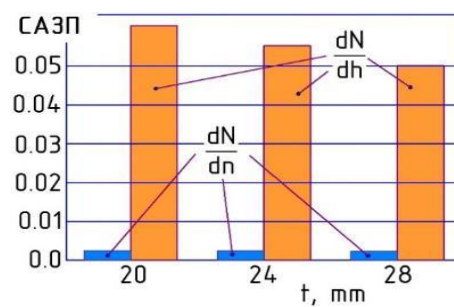


Рисунок 15. Сравнение влияния n и h на N при разных t

Примечание: составлено авторами

К обсуждению предлагаются следующие выводы:

Случай 1 – Фиксированный параметр « t » - шаг шнека.

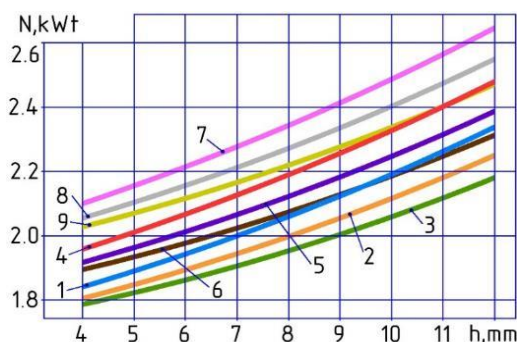
1) параметр h (ширина затвора) оказывает более сильное влияние на мощность N , чем параметр n (частота вращения);

2) максимальные значения мощности N достигаются при максимальных значениях ширины затвора h и минимальных значениях вращения вала n .

Случай 2 – Фиксированный параметр « n » - частота вращения шнека.

Для фиксированного параметра n построены графики (рис. 16) и проанализированы зависимости мощности N от параметра h . Анализ проводился для трех значений n : 685 об/мин, 735 об/мин и 785 об/мин.

На рис. 17 приведена тепловая карта изменения мощности N для фиксированного значения $n = 735$ об/мин при изменении t и h , на рис. 18 показана диаграмма влияния шага t и количества оборотов шнека h в виде среднего абсолютного значения производной (САЗП) на N при разных n .



- 1 - $n = 685$ об/мин; $t = 20$ мм
- 2 - $n = 685$ об/мин; $t = 24$ мм
- 3 - $n = 685$ об/мин; $t = 28$ мм
- 4 - $n = 735$ об/мин; $t = 20$ мм
- 5 - $n = 735$ об/мин; $t = 24$ мм
- 6 - $n = 735$ об/мин; $t = 28$ мм
- 7 - $n = 785$ об/мин; $t = 20$ мм
- 8 - $n = 785$ об/мин; $t = 24$ мм
- 9 - $n = 785$ об/мин; $t = 28$ мм

Рисунок 16. График изменения N от h при разных n и t

Примечание: составлено авторами

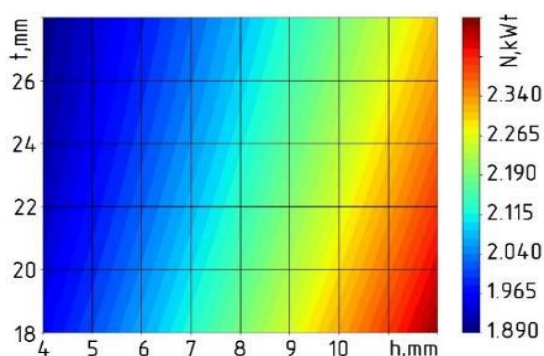


Рисунок 17. Тепловая карта N при $n = 735$ об/мин при разных t и h

Примечание: составлено авторами

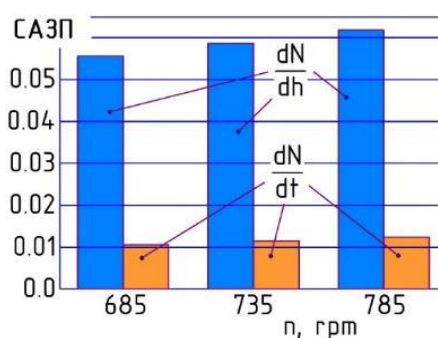


Рисунок 18. Сравнение влияния h и t на N при разных n

Примечание: составлено авторами

По результатам анализа к обсуждению предлагаются следующие выводы:

- 1) параметр h (ширина затвора, мм) оказывает более сильное влияние на мощность N , чем параметр t (шаг шнека, мм).
- 2) максимальные значения мощности N достигаются при максимальных значениях ширины затвора h (мм) и шаге шнека t (мм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученное теоретически и подтвержденное экспериментально обоснование конструктивно-технологических параметров шнековой группы зернового экструдера позволит предсказуемо и с высокой точностью выбрать рациональные параметры при модернизации зерновых экструдеров для работы с конкретным сырьем;
2. Применение затворов различной длины позволяет достичь рабочей температуры и выпрессовывающего давления смеси на более короткой длине шнека, что позволяет сократить как длину шнекового вала, так и металлоемкость всего экструдера;
3. Наиболее благоприятная по технологии температура ($120-140$ °C) в шнековой группе достигается с затворами длиной 7-12 мм и шагом транспортной шнековой секции 20 мм. Изменение шага требует изменения длины затвора для поддержания благоприятного режима работы. Если увеличить шаг до 28 мм, то для достижения необходимой для экструзии температуры длину затвора следует принять равной 9-12 мм.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследования, связанные с публикацией, финансируются Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК: грант AP23485224 –



Разработка нового энергоэффективного оборудования по производству инновационных кормовых добавок для животноводства с использованием промышленных отходов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы заявляют, что при подготовке данной рукописи были использованы технологии генеративного искусственного интеллекта:

а) <https://manus.im/> и <https://chat.deepseek.com/> - для проверки правильности выводов формул (5), (6) и (7);

б) <https://www.mathworks.com/> и <https://colab.research.google.com/> - для построения графиков и тепловых карт.

Ответственность за точность, полноту и соответствие научным стандартам всего представленного материала полностью возложена на авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Adache, L. A., Mogaji, T. S., Olabanji Olayinka, M., & Ayodeji Olagoke, Z. (2025). Design and finite element analysis of an extractor machine for castor oil biodiesel production. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, 6(1), 34–50. <https://doi.org/10.4995/jarte.2025.21917>
- Bizhanov, A. M. (2024). Mathematical modeling of extrusion agglomeration. *Metallurgist*, 67(9–10), 1362–1372. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01628-2>
- Bogdanov, K. A. (2021). Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo protsessa ehkstrudirovaniya sapropele-zernovogo korma s obosnovaniem parametrov ehkstrudera [Improvement of the technological process of extrusion of sapropel-grain feed with justification of extruder parameters] (Candidate dissertation). Velikie Luki: FGBOU VPO VGSA. (In Russ.)
- Bulatov, S. Yu. (2015). Modeling of work process of grain crusher ejector. *Tractors and Agricultural Machinery*, 82(5), 25–27. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-65437>
- Chuikov, V. E., Konovalov, V. V., Dontsova, M. V., & Petrova, S. S. (2024). Justification of a promising functional scheme of a grain crusher. *Bulletin of the Samara State Agricultural Academy*, 2, 34–43. <https://doi.org/10.55170/1997-3225-2024-9-2-34-43>
- Doudkin, M., Kim, A., Yakovlev, I., Vasilkov, D., Asangaliev, Ye., & Moldakhanov, B. (2025). Analysis of experimental studies on the efficiency of a new mixer for molding mixtures components for the production of premix lick blocks and the final product effect. *Production Engineering Archives*, 31(1), 81–90. <https://doi.org/10.30657/pea.2025.31.8>
- Frolov, V. Y., Kotelevskaya, E. A., & Tumanova, M. I. (2020). Theoretical aspects of the working process of a press extruder with a variable step auger for preparation of concentrated feed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 520, 032003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/520/1/032003>
- Kabdusheva, A., et al. (2020). The effect of parameters on the performance efficacy of a single screw feed extruder using design experiments and response surface methodology. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 26(2), 492–497.
- Karrab, S. A., & Ballem, M. A. (2020a). Failure analysis and repair of a broken extruder shaft: A case study. *EJERS, European Journal of Engineering Research and Science*, 5(1), 107–112.
- Kraugerud, O. F., & Svihus, B. (2011). Effects of online pretreatment of plant ingredients on processing responses and physical properties in extruded fish feed. *Animal Feed Science and Technology*, 168(3–4), 250–256.
- Kukhta, G. M. (1987). Mashiny i oborudovanie dlya prigotovleniya kormov [Machines and equipment for feed preparation]. Moskva: Agropromizdat. (In Russ.)
- Kurnish, V. G., Gavrilov, N. V., & Kim, S. A. (2016). Ispol'zovanie ehkstrudеров pri pererabotke produktsii rastenievodstva v Respublike Kazakhstan [Use of extruders in processing crop production in the Republic of Kazakhstan]. Kostanai: Kostanai State University. (In Russ.)



- Kushnir, V., Gavrilov, N., & Shkotova, T. (2019). Improvement of the extruder construction. *Livestock Science*, 9783319956299, 2133–2142.
- Li, H., Xiong, Z., & Li, X. (2019). Optimization of the extrusion process for the development of extruded snacks using peanut, buckwheat, and rice blend. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(12), e14264.
- Liu, Q., et al. (2020). Effect of enzyme supplementation and extruding process on the digestibility of nutrients and phenolic acids of defatted rice bran based diets in ileal-cannulated growing pigs. *Livestock Science*, 240, 104138.
- Lyashuk, O., Pyndus, Y., Lutsiv, I., Vovk, Y., Poberezhna, L., Tretiakov, O., & Zolotyy, R. (2019). Fracture cause analysis of the extruder's shaft and geometry optimization of the spline. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(1), 4449–4460. <https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378>
- Machikhin, Yu. A., Zurabishvili, G. G., & Panfilova, S. N. (1991). *Sovremennoe oborudovanie v obrabotke pishchevykh materialov davleniem* [Modern equipment for processing food materials under pressure]. Moskva: Rosvuznauka. (In Russ.)
- Mironov, K. E., Obolenskiy, N., Goeva, V., & Grishin, N. (2019). Development and study of the grain crushing working process of shocking and reflective crusher. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*, 14(1), 100–106. https://doi.org/10.12737/article_5cceddbce1e93.58919071
- Morozov, V. V., Bogdanov, K. A., Smelik, V. A., Volkhonov, M. S., & Kukhar, V. S. (2021). Rationale for the design and technological parameters of the extruder for the production of spropel and grain feed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 699, 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/699/1/012062>
- Mu, X., Li, H., Wang, Z., Wang, Q., Geng, D., & Zhu, J. (2023). Comparison of crushing effect of differently shaped crushing rollers on whole-plant silage maize. *Agriculture*, 13(7), 1276. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071276>
- Pareek, P., & Madloi, K. (2022). Ansys analysis on screw conveyor employing diverse coating materials. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 9(6), d36–d48. <http://www.jetir.org/papers/JETIR2206306.pdf>
- Yadav, S., Jha, A. K., & Darlami, H. B. (2023). Design and improvement of dewatering system implemented for biogas slurry. *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*, 5(6), 1–27. <https://www.ijfmr.com/papers/2023/6/9184.pdf>

Информация об авторах
Авторлар туралы мәліметтер
Information about authors



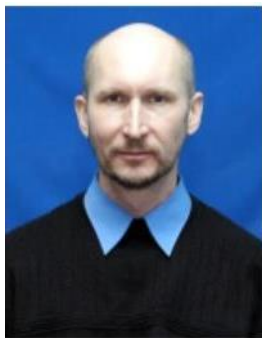
Вавилов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, директор ТОО «НПО ИННОТЕХ», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Вавилов Андрей Владимирович – техника ғылымдарының кандидаты, «ИННОТЕХ ҰЕҰ» ЖШС директоры, Өскемен қ., Қазақстан

Vavilov Andrey Vladimirovich – candidate of Technical Sciences, Direktor NPO INNOTECH LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: avavilov@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-0508>



Гурьянов Георгий Александрович – кандидат технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Гурьянов Георгий Александрович – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Guryanov George Alexandrovich – candidate of Technical Sciences, Professor, D. Serikbayev East-Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: gguryanov@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3657-3735>



Дудкин Михаил Васильевич – доктор технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

Дудкин Михаил Васильевич – техника ғылымдарының докторы, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Dudkin Mikhail Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: mdudkin@ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5732-0724>



Алина Игоревна Ким – доктор PhD, проректор, Университет «МИРАС», г. Шымкент, Казахстан

Алина Игоревна Ким – PhD докторы, проректор, "МИРАС" университеті, Шымкент қ., Қазақстан

Alina Igorevna Kim – Doctor of PhD, Vice Rektor, MIRAS University, Shymkent, Kazakhstan

e-mail: kim_ali@miras.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9332-4279>



Яковлев Владимир Сергеевич – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Яковлев Владимир Сергеевич – техника ғылымдарының магистрі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Yakovlev Vladimir Sergeevich – Master of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: vjakovlev@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7315-4719>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_60

IRSTI 53.31.21

DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS OF CHARGE MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF CHROMIUM-MANGANESE LIGATURE

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ХРОМОМАРГАНЦЕВОЙ ЛИГАТУРЫ

ХРОМ-МАРГАНЕЦТІ ЛИГАТУРАНЫ АЛУ ҮШІН ШИКІҚҰРАМ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫ ТЕРМИЯЛЫҚ ТАЛДАУЫ

S.K. Kabyllkanov ^{1*}, S.A. Abdulina ¹, Ye.N. Makhambetov ², O. Yucel ³

¹D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²Zh. Abishev Chemical-metallurgical institute, Karaganda, Kazakhstan

³Istanbul technical university, Istanbul, Turkey

*Corresponding author: Sultan Kaiyrbekovich Kabyllkanov, e-mail: kabyllkanov.s@edu.ektu.kz

Keywords:

alloy, ligature, thermal analysis, differential scanning calorimeter, temperature.

ABSTRACT

This article investigates the physicochemical properties of initial charge materials in order to improve the efficiency of the production process of chromium-manganese ligature. The aim of the study was to determine the thermal characteristics of chromium and iron-manganese ores, as well as new silicon-aluminium alloys (ferrosilicoaluminium (FeSiAl), ferrosilicochromium (FeSiCr) dust, almosilicomanganese (AlSiMn)).

Differential thermal analysis (DTA) was employed to study the thermal behaviour of the materials, including melting and crystallization processes, phase transitions, and chemical reactions.

The main part of the work discusses the theoretical principles of the DTA method, its applications, and provides a detailed analysis of the experimental results obtained. Particular attention was paid to the thermal properties of the initial raw materials and their changes during the process.

Thermal analysis was carried out using the STA300 "Synchronous Thermal Analyzer". The obtained data provide scientific evidence for improving the efficiency of chromium-manganese ligature production technologies.

The practical significance of the study lies in the efficient utilization of chromium and iron-manganese ores and the enhancement of reduction processes through the use of new silicon-aluminium alloys.

Түйінді сөздер:

қорытпа, лигатура, термиялық талдау, дифференциалды сканерлеуші калориметр, температура.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада хром-марганецті лигатура алу үрдісінің тиімділігін арттыру мақсатында бастапқы шикізат материалдарының физика-химиялық қасиеттері зерттелді. Зерттеудің мақсаты – хром және темірлі-марганец кендері, сондай-ақ жаңа кремний-алюминийлі қорытпалардың (ферросиликоалюминий (ФСА), ферросиликохром (ФСХ) шаңы, алюмосиликомарганец (АМС)) термиялық сипаттамаларын анықтау.



Зерттеу барысында дифференциалды термиялық талдау (ДТА) әдісі қолданылды. Бұл әдіс материалдардың жылу қасиеттерін, балқу және кристалдану процестерін, фазалық ауысулар мен химиялық реакцияларды зерттеуге мүмкіндік берді.

Жұмыстың негізгі бөлімінде ДТА әдісінің теориялық негіздері, қолданылу аясы және алынған тәжірибелік нәтижелер қарастырылды. Әсіресе, бастапқы шикізат материалдарының термиялық қасиеттерін және олардың үрдіс кезіндегі өзгерістерін анықтау мақсатында жүргізілген талдауларға ерекше назар аударылды.

Термиялық талдау STA300 маркалы «Synchronous Thermal Analyzer» құрылғысында жүргізілді. Алынған нәтижелер хром-марганецті лигатураны алу технологиясында қолданылатын процестердің тиімділігін арттыруға арналған ғылыми деректерді ұсынды.

Зерттеудің практикалық маңызы – хром және темірлі-марганец кендерін тиімді пайдалану, сондай-ақ жаңа кремний-алюминийлі қорытпаларды қолдану арқылы тотықсыздандыру үрдісін жетілдіру болып табылады.

Ключевые слова:

сплав, лигатура,
термический анализ,
дифференциальный
сканирующий
калориметр,
температура.

АННОТАЦИЯ

В данной статье исследованы физико-химические свойства исходных шихтовых материалов с целью повышения эффективности процесса получения хромомарганцевой лигатуры. Цель исследования заключалась в определении термических характеристик хромовых и железо-марганцевых руд, а также новых кремний-алюминиевых сплавов (ферросиликоалюминий (ФСА), пыль ферросиликохрома (ФСХ), алюмосиликомарганец (АМС)).

Для проведения анализа применялся метод дифференциального термического анализа (ДТА), который позволяет изучать тепловые свойства материалов, процессы плавления и кристаллизации, фазовые превращения и химические реакции.

В основной части работы рассмотрены теоретические основы метода ДТА, области его применения, а также подробно проанализированы полученные экспериментальные результаты. Особое внимание уделено изучению термических свойств исходных материалов и их изменений в ходе процесса.

Термический анализ проводился на приборе STA300 «Synchronous Thermal Analyzer». Полученные данные предоставляют научное обоснование для повышения эффективности технологий получения хромомарганцевой лигатуры.

Практическая значимость исследования заключается в более рациональном использовании хромовых и железо-марганцевых руд, а также в улучшении восстановительных процессов с применением новых кремний-алюминиевых сплавов.

INTRODUCTION

In modern metallurgy, the study of the thermal properties of charge materials plays a key role in the development of new alloys and ligatures. DTA is one of the main methods for studying the physico-chemical properties of materials (Sitnikova, Ponomareva & Uspenskaya, 2021). Using DTA, it is possible to determine such characteristics as melting points, decomposition, and phase transformations, which makes it possible to effectively control the temperature conditions of production processes. This method consists of tracking the temperature difference between the sample and the reference material as a function of time or temperature, while the temperature of the sample changes according to a preset program in a specific atmosphere (Makhambetov et. al., 2022; Myngzhassar, 2025).

When obtaining ligatures, the study of the interaction of charge components and their thermodynamic behavior is of particular importance (Zhuniskaliyev et. al., 2024). This makes it possible to optimize the composition of the charge, improve the quality of the obtained ligatures and increase the efficiency of metallurgical processes.

Differential thermal analysis allows precise determination of phase changes, chemical reactions, melting and crystallization processes of materials (Ido, Iwamoto & Kondoh, 2020). These studies provide a deeper understanding of the properties of the raw materials needed to produce chromium-manganese ligature, and ensure the correct choice of its composition (Wang et. al., 2021). The data obtained helps predict the behavior of materials in various temperature conditions, which minimizes production costs and increases the efficiency of technological operations.

MATERIALS AND METHODS

The research work assumes the use of domestic chromium and manganese ores as raw materials for the development of chromium-manganese ligature technology, as well as new silicon-aluminum alloys (ferrosilicon aluminum, ferrosilicon chromium dust, aluminosilicon manganese) as reducing agents.

Their thermodynamic properties, including melting points, phase transformations, and reduction reactions, are studied in the preparation of charge materials such as FeSiCr dust, FeSiAl, AlSiMn, and chromium and iron-manganese ores. FeSiCr dust rich in silicon and chromium demonstrates important characteristics for optimizing metallurgical processes such as reduction and melting. FeSiAl with a high content of aluminum and silicon is actively used as a reducing agent, and its thermal behavior also plays a key role in the steel alloying process (Nurumgaliyev et. al., 2023; Mukhambetgaliyev et. al., 2021). AlSiMn containing manganese, silicon and aluminum affects the properties of the charge, improving the quality of the obtained alloys (Shabanov, 2016; Yessengaliyev, 2020). Cr and Mn ore are the main sources for obtaining chromium-manganese ligatures, which are necessary for the production of ferroalloys. DTA helps to accurately determine their behavior at high temperatures, which is important for the development of efficient metallurgical technologies (Cheng et. al., 2019; Daver et. al., 2016).

To study the physico-chemical properties of these raw materials, namely, to perform differential thermal analysis, the device «Synchronous Thermal Analyzer» brand STA300 was used (**Figure 1**). This device allows you to determine phase changes, reactivity, and changes that occur when temperature affects the composition of raw materials.



Figure 1. «Synchronous Thermal Analyzer» STA300

Note – compiled by the authors

The composition and characteristics of this equipment are as follows: a differential scanning calorimeter (DSC) is used to measure parameters such as melting, crystallization, phase transitions, reaction temperature, heat of reaction, heat of combustion, and specific heat (Aliberti



et. al., 2025). These data allow us to accurately determine the thermodynamic behavior of materials and their reactions to temperature changes. In addition, thermal stability, decomposition, oxidation and reduction, adsorption and desorption properties, as well as the content of free and crystalline water in materials are investigated using thermogravimetric analysis (TGA) (Almyashev et. al., 2017; Lotov et. al., 2022). The device is also used to calculate the ratios of compounds, which contributes to a more accurate determination of their chemical composition and reaction characteristics at high temperatures.

The furnace body is heated by a double-row winding made of precious metal alloy wire, which reduces interference, as well as resists high temperature and oxidation. The dish sensor has a wide range of tests, high temperature resistance and resistance to oxidation and corrosion, which ensures reliable operation of the device in difficult conditions. The weighing system uses imported components, which are characterized by high stability and good repeatability of measurements. The furnace body has double-layer insulation, which minimizes heat loss and increases the energy efficiency of the device. The heating of the device is controlled using a proportional-integral-differential (PID) controller, which ensures the accuracy of temperature control and minimal pulse fluctuations, ensuring stable operation of the device during operation.

The temperature range of the device is from room temperature to 1550°C with a resolution of 0.01°C and fluctuations up to 0.1°C. The heating rate is from 0.1 to 100 °C/min, with temperature control according to the PID algorithm. The temperature maintenance time is up to 300 minutes. The weight measurement range is from 0.01 mg to 3 g (expandable to 30 g). The DSC range is from 0 to 600 MW with a resolution of 0.001 MW. The atmosphere of the device is inert, oxidizing or reducing.

RESULTS AND DISCUSSION

This section presents the differential thermal analysis results (**Figures 2–6**) of chromium and iron-manganese ores, as well as new silicon–aluminum alloys. The obtained thermograms reveal endothermic and exothermic effects, melting and crystallization processes, and phase transformations. A comparative discussion highlights the differences in thermal behaviour of natural ores and synthetic alloys, providing insights into their reactivity and stability under high-temperature conditions relevant to chromium–manganese ligature production.

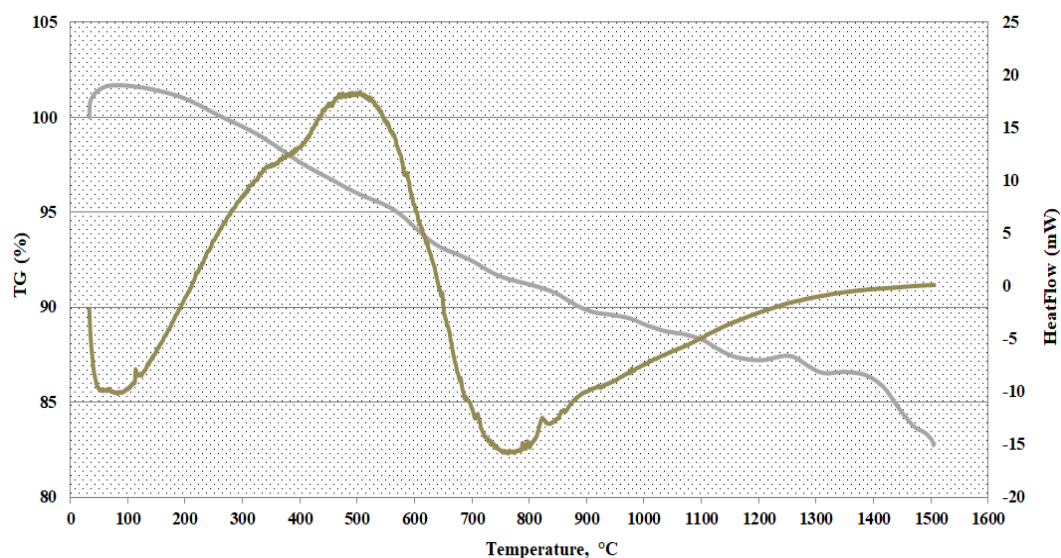


Figure 2. Chromium ore derivatogram.

Note – compiled by the authors



Figure 2, which is based on the derivatogram of chromium ore, clearly illustrates a sequence of thermal effects that characterize the behavior of the ore upon heating. These effects reflect the complex physicochemical transformations that occur within the material and determine its suitability for further metallurgical processing.

In the initial stage of heating, within the temperature range of 100–400 °C, the first endothermic peak is recorded. This effect is mainly attributed to the removal of physically adsorbed water and volatile components trapped in the pore structure of the ore. Such dehydration processes are typical for natural ores and indicate the release of surface-bound moisture, which does not alter the chemical composition but affects the overall stability of the material during subsequent heating.

As the temperature rises to the range of 500–750 °C, a distinct exothermic peak is observed. This thermal effect is linked to oxidation processes, where chromium-bearing minerals undergo structural rearrangements accompanied by the release of heat. At this stage, chromium compounds tend to oxidize, forming various intermediate oxides. The appearance of such a pronounced exothermic effect highlights the high reactivity of chromium phases and marks the onset of important chemical transformations that influence the reduction behavior of the ore in later stages.

Further heating to 800–1400 °C reveals a series of phase transformations. In this temperature interval, stable chromium oxides such as Cr_2O_3 are formed, which represent the thermodynamically favorable phases under oxidizing conditions. Additionally, in the presence of impurities (iron, manganese, or silica), solid-state interactions may take place, leading to the formation of mixed oxides or spinel-type compounds. These transformations are of particular significance for ferroalloy production, as they determine the reducibility of chromium and its potential recovery in the smelting process.

Beyond 1400 °C, the derivatogram curve becomes relatively stable, with no major thermal effects recorded. The mass of the sample remains almost unchanged, which indicates that most dehydration, oxidation, and phase transformation processes have been completed by this point. The stabilization of the system at such high temperatures suggests that chromium ore reaches a thermally resistant state, with only minor structural adjustments occurring.

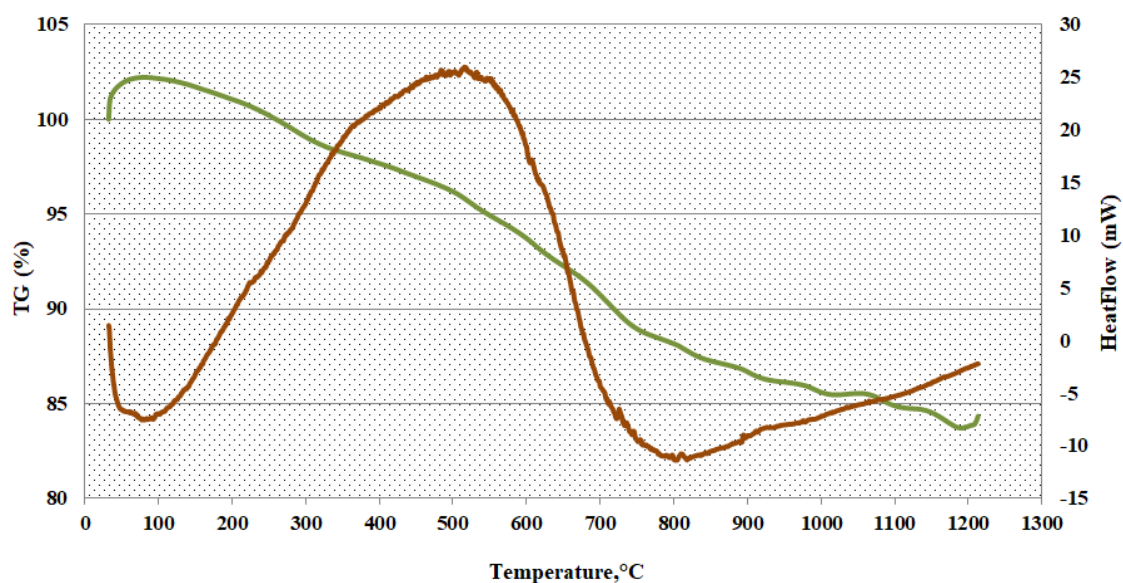


Figure 3. Iron-manganese ore derivatogram

Note – compiled by the authors



Figure 3 presents the derivatogram of iron-manganese ore, which reveals a sequence of characteristic thermal effects during heating. These effects reflect the multistage physicochemical processes that occur within the ore and provide valuable information about its thermal stability and reactivity.

In the initial heating stage (100–300 °C), an endothermic effect is recorded, which corresponds to the removal of physically adsorbed water and volatile substances. This dehydration process is typical for natural ores and indicates the release of weakly bound components without significant changes in the mineralogical structure. Such processes are important because they affect the porosity and surface area of the ore, which in turn influence its reactivity in subsequent high-temperature stages.

In the range of 350–750 °C, a distinct exothermic effect is observed. This is attributed to the oxidation of manganese-bearing phases and the formation of manganese oxides such as MnO and Mn₂O₃. The release of heat during this process reflects the high reactivity of manganese minerals in this temperature region. The formation of intermediate oxides is a critical stage, as it determines the oxidation state of manganese and its subsequent reducibility in metallurgical processes.

Further heating between 750–1200 °C leads to phase transformations and solid-state interactions among the ore components. At this stage, structural rearrangements occur, including the stabilization of manganese oxides and their possible interaction with associated impurities such as iron, silica, or alumina. The formation of complex oxide phases or spinel-type compounds can also take place, which has a direct impact on the melting behavior and reduction characteristics of the ore under smelting conditions.

Above 1200 °C, the derivatogram becomes relatively stable, indicating that the majority of thermal reactions are completed. The system reaches a state of thermal resistance, with only minor changes in mass or heat flow. This stabilization suggests that manganese ore achieves structural equilibrium at elevated temperatures.

Overall, the thermal analysis of iron-manganese ore provides detailed insight into its behavior under heating. The sequence of dehydration, oxidation, and high-temperature phase transformations is crucial for understanding its reduction mechanisms and optimizing its use in chromium–manganese ligature production.

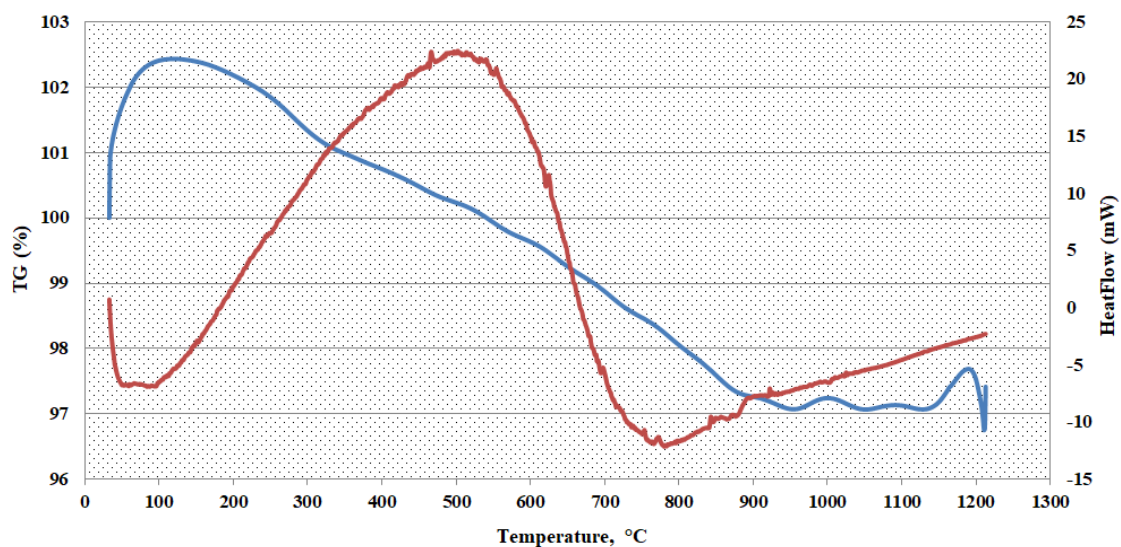


Figure 4. FeSiAl derivatogram.

Note – compiled by the authors

The derivatogram of FeSiAl (Figure 4) demonstrates several distinct thermal events that characterize the material's behavior upon heating. At temperatures below 200 °C, a minor endothermic effect is recorded, which can be attributed to the release of adsorbed water and volatile surface impurities. As the temperature increases to 400–670 °C, a more pronounced endothermic reaction takes place, likely related to the decomposition of unstable compounds or partial rearrangement within the alloy structure. Between 670 and 850 °C, noticeable phase transitions occur, reflecting changes in the solid-state organization and the possible emergence of new phases. At higher temperatures (850–1200 °C), melting phenomena and the stabilization of thermodynamically favorable phases are observed, accompanied by a distinct shift in the heat flow curve. These features emphasize the complex structural nature of ferrosilicoaluminium and its transformation under high-temperature conditions.

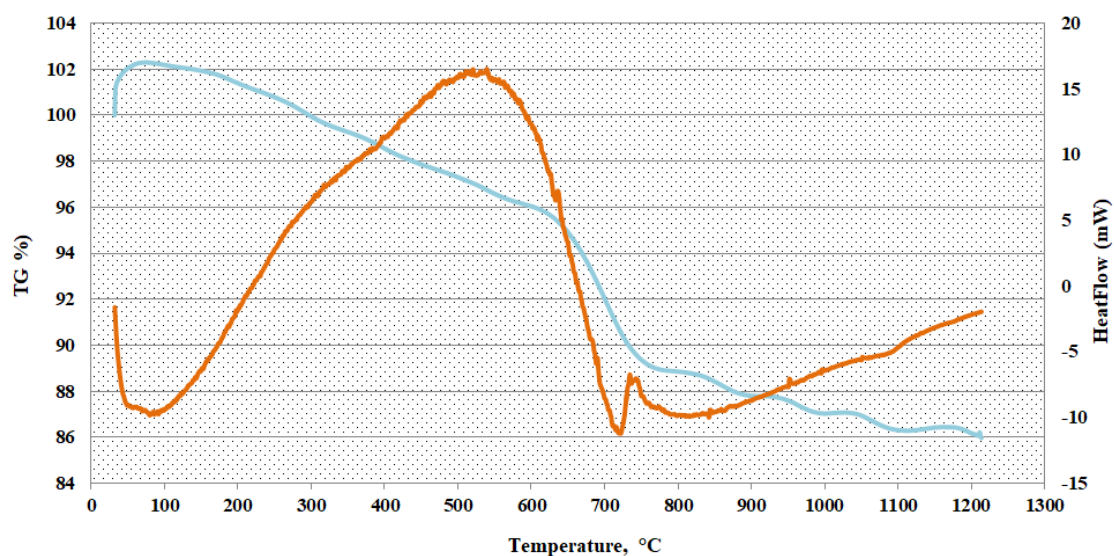


Figure 5. FeSiCr dust derivatogram.

Note – compiled by the authors

The FeSiCr dust derivatogram (Figure 5) illustrates a sequence of thermal effects that describe the material's transformations during heating. In the region up to 200 °C, a weak endothermic peak is observed, caused by the removal of physically adsorbed water and light volatile compounds. Between 200 and 660 °C, a smooth decrease in mass takes place, which can be explained by the decomposition of unstable surface compounds, such as thin oxide films or residual contaminants.

Further heating to 660–850 °C initiates structural modifications within the dust particles. At this stage, new phases may appear, while existing ones undergo rearrangement, which is reflected by a slight endothermic response on the DSC curve. Finally, in the high-temperature interval of 850–1200 °C, more complex processes are detected, including the onset of melting in certain components and the formation of stable crystalline phases. These transformations are accompanied by noticeable changes in heat flow, reflecting the transition of the material into thermodynamically stable states.

Overall, the obtained data provide important information about the thermal behavior of FeSiCr dust, confirming its complex multistage transformations. Such results are essential for understanding the mechanisms of phase changes during high-temperature metallurgical processes, as well as for assessing its role as a reducing agent in the production of chromium-manganese alloys.

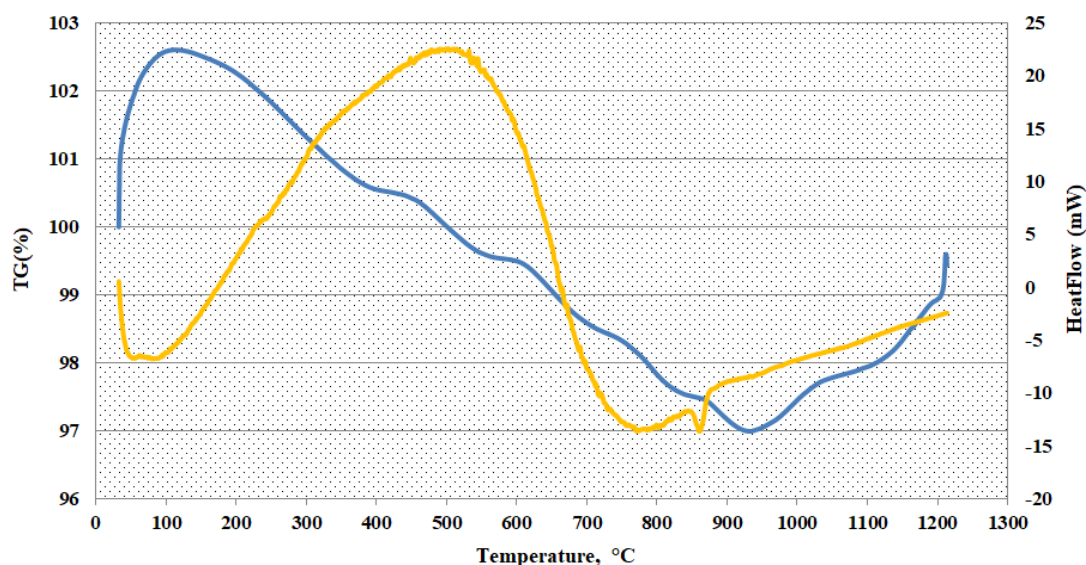


Figure 6. AlSiMn derivatogram.

Note – compiled by the authors

The derivatogram of AlSiMn (Figure 6) demonstrates a series of characteristic thermal events that reflect the behavior of the alloy during heating. At temperatures up to 200 °C, a weak endothermic effect is recorded, which corresponds to the removal of adsorbed water and light volatile components. In the range of 400–700 °C, a more pronounced endothermic process is observed, most likely related to the decomposition of unstable intermetallic phases or restructuring within the alloy's microstructure.

As the temperature rises to 700–850 °C, an exothermic effect becomes evident. This stage is indicative of redox reactions and the emergence of secondary phases, which mark the material's transition to a more complex structural state. At higher temperatures, between 850 and 1200 °C, significant phase transformations occur. These processes are typical for aluminum-based alloys of the AlSiMn system and may include crystallization phenomena or the stabilization of new intermetallic phases. The changes are accompanied by a smooth shift in heat flow, reflecting the gradual adaptation of the alloy to high-temperature conditions.

CONCLUSION

The present study focused on the thermal analysis of charge materials used in the production of chromium–manganese ligatures, including FeSiCr dust, FeSiAl, AlSiMn, as well as chromium and iron-manganese ores. DTA made it possible to identify the key thermal properties of these materials, such as characteristic melting points, phase transformations, and reduction reactions. These findings provide a detailed understanding of the mechanisms that govern the behavior of the raw materials under high-temperature conditions.

The results indicate that chromium and iron-manganese ores, despite being low-grade, demonstrate predictable and consistent thermal behavior, making them suitable for further metallurgical processing. At the same time, the use of complex silicon–aluminum alloys such as FeSiCr dust, FeSiAl, and AlSiMn as reducing agents has shown significant potential due to their favorable thermodynamic properties and ability to participate effectively in reduction reactions. This confirms their value in the optimization of the reduction process and the stabilization of phase composition during alloy production.



A comparative assessment of the investigated materials highlights the advantages of combining ores with silicon–aluminum alloys, which ensures efficient reduction, improved phase transformations, and the formation of stable products at high temperatures. Such results underline the possibility of designing more rational charge compositions aimed at obtaining high-quality chromium–manganese ligatures.

From a practical perspective, the outcomes of this study provide a strong basis for improving existing metallurgical processes. The incorporation of the studied materials can contribute to higher productivity, lower energy consumption, and improved quality of the final product. Furthermore, the findings support the implementation of innovative technological approaches in ferroalloy production, paving the way for the efficient utilization of low-grade ores and secondary raw materials.

In summary, this research not only contributes to the theoretical understanding of the thermal behavior of ores and alloys but also offers practical recommendations for the development of advanced metallurgical technologies. The obtained results have both scientific and industrial relevance, emphasizing their importance for the sustainable growth and modernization of the ferroalloy industry.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant no. AP23488918).

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to the Laboratory of Ferroalloys and Reduction Processes of the Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev for providing experimental facilities, technical support, and valuable assistance during the research work.

STATEMENT ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: The authors declare that no artificial intelligence (AI) tools were used in the preparation of this article.

REFERENCES

- Aliberti, F., Oliviero, M., Longo, R., Guadagno, L., & Sorrentino, A. (2025). Effect of crystallinity on the printability of poly(ethylene terephthalate)/poly(butylene terephthalate) blends. *Polymers*, 17(2), 156. <https://doi.org/10.3390/polym17020156>
- Almyashev, V. I., Vasilevskaya, A. K., Kirillova, S. A., Krasilin, A. A., & Proskurina, O. V. (2017). *Comprehensive thermal analysis: Textbook* (193 p.) [in Russian]. Saint Petersburg.
- Cheng, L., Li, W., Li, Y., Yang, Y., Li, Y., Cheng, Y., & Song, D. (2019). Thermal analysis and decomposition kinetics of the dehydration of copper sulfate pentahydrate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(6), 2697–2703. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7595-y>
- Daver, F., Kajtaz, M., Brandt, M., & Shanks, R. A. (2016). Creep and recovery behaviour of polyolefin-rubber nanocomposites developed for additive manufacturing. *Polymers*, 8(12), 437. <https://doi.org/10.3390/polym8120437>
- Ido, Y., Iwamoto, Y., & Kondoh, S. (2020). Thermal conduction of the magnetic fluids mixing micrometer size particles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 508, 166864. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166864>
- Lotov, V. A., Khabas, T. A., Ditz, A. A., & Sudarev, E. A. (2022). *Differential thermal analysis: Guidelines for laboratory practicals and independent student work on the course “Physical chemistry of refractory non-metallic and silicate materials”* (30 p.). Tomsk: TPU Publishing. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226508.6595>



- Makhambetov, Y., Abdirashit, A. M., Kuatbay, Y., Yucel, O., & Tazhiyev, Y. (2022). Research of electrophysical properties of charge materials for smelting a complex alloy of aluminosilicomanganese. *Engineering Journal of Satbayev University*, 144(2), 15–21. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i2.03>
- Mukhambetgaliyev, Y., Zhuniskaliyev, T., & Baisanov, S. (2021). Research of electrical resistance and beginning softening temperature of high-ash coals for melting of complex alloy. *Metalurgija*, 60(4), 332–334. <https://hrcak.srce.hr/256101>
- Mukhambetgaliyev, Y., Zhuniskaliyev, T., & Mukhambetkaliyev, A. (2023). Experimental investigation of the influence of phase compounds on the friability of Fe-Si-Mn-Al complex alloy. *Metals*, 14(9), 1091. <https://doi.org/10.3390/met14091091>
- Myngzhassar, Ye. A. (2025). Development of resource-saving technology for smelting standard grades of ferrosilicomanganese from low-quality raw materials (Doctoral dissertation, PhD, specialty 8D07202 – Metallurgy). Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan.
- Nurumgaliyev, A., Zayakin, O., Zhuniskaliyev, T., Kenzhaliyev, B., Makhambetov, Y., & Shingisov, M. (2023). Smelting of Fe–Si–Mn–Al complex alloy using high-ash coal. *Metallurgist*, 67(11–12), 1178–1186. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01609-x>
- Shabanov, E. Zh. (2016). Development of technology for smelting aluminosilicochrome from high-ash coals of the Karaganda basin and screenings of high-carbon ferrochrome (Doctoral dissertation, PhD, specialty 6D070900 – Metallurgy). Karaganda State Technical University. [in Russian]. <https://www.kstu.kz/doktorly-dissertatsiya-or-aunaturaly-shabanov-erbol-zhasyly-ly/>
- Wang, Y., Karasev, A., Park, J. H., & Jonsson, P. G. (2021). Non-metallic inclusions in different ferroalloys and their effect on the steel quality: A review. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 52(6), 2892–2925. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02215-1>
- Yessengaliyev, D. A. (2020). Development of technology for refining ferromanganese production using high-basic manganese ores and special complex alloys (Doctoral dissertation, PhD, specialty 6D070900 – Metallurgy). Karaganda State Technical University. [in Russian]. <https://www.kstu.kz/wp-content/uploads/2020/11/Esenaliev-D.A.-Dissertatsiya.pdf>
- Zhuniskaliyev, T., Nurumgaliyev, A., Chekimbayev, A., Kelamanov, B., Kuatbay, Y., Mukhambetgaliyev, Y., Mukhambetkaliyev, A., & Abdirashit, A. (2024). Experimental investigation of the influence of phase compounds on the friability of Fe-Si-Mn-Al complex alloy. *Metals*, 14(9), 1091. <https://doi.org/10.3390/met14091091>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Кабылканов Султан Кайырбекович – PhD докторант, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Кабылканов Султан Кайырбекович – PhD докторант, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Kabyllkanov Sultan Kaiyrbekovich – PhD doctoral student, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: kabyllkanov.s@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1272-2065>



Абдулина Сауле Амангельдыевна – PhD, профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Абдулина Сауле Амангельдыевна – PhD, профессор, Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Abdulina Saule Amangeldyevna – PhD, Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: abdulina.saule@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-8652>



Махамбетов Ерболат Нысаналыұлы – PhD, қауымдастырылған профессор, Ж. Әбішев атындағы Химия-Металлургия институты, Қарағанды Қазақстан

Махамбетов Ерболат Нысаналыұлы – PhD, ассоциированный профессор, Химико-Металлургический институт, г. Караганда, Казахстан

Makhambetov Yerbolat Nysanallyuly – PhD, Associate Professor, Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan,

e-mail: m.ye.n@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8613-9932>



Onuralp Yucel – PhD, профессор, Ыстамбұл техникалық университеті, Ыстамбұл, Түркия

Onuralp Yucel – PhD, профессор, Стамбульский технический университет, Стамбул, Турция

Onuralp Yucel – PhD, Professor, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey,

e-mail: yucel@itu.edu.tr,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3879-0410>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_71
FTAXP 53.37.33

ҚҰРАМЫНДА МЫС МӨЛШЕРІ ЖОҒАРЫ ЦИАНИДТІК ЕРІТІНДІЛЕУ ДЕН АЛЫНҒАН ЕРІТІНДІДЕГІ АЛТЫН МЕН МЫСТЫ СОРБЦИЯЛАУ ЖӘНЕ ДЕСОРБЦИЯЛАУ ҮРДІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ ЗОЛОТА И МЕДИ ИЗ РАСТВОРА ЦИАНИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕДИ

STUDY OF THE PROCESSES OF SORPTION AND DESORPTION OF GOLD AND COPPER FROM A CYANIDE LEACHING SOLUTION WITH A HIGH COPPER CONTENT

Д.Б. Касымова ^{1,2}, Р.В. Сапинов ^{1,3*}, М.А. Адылканова ¹, Г.А. Реутова ¹

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

²ВНИИцветмет, Өскемен қ., Қазақстан

³Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан,

*Корреспондент-автор: Сапинов Руслан Викторович, e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz

Түйінді сөздер:

Алтын мыс кендері,
цианидті шаймалау,
тұйық цикл, сорбция,
қиын байытылатын
кендер, десорбция,
қоюлану,
зиянсыздандыру.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыста құрамында мыс мөлшері жоғары Қазақстан Республикасы кен орындарының бірінің алтын мыс кенінің бұрын алынған цианидті ерітінділеу нәтижесінде алынған ерітіндідегі алтын мен мысты сорбциялау және десорбциялау үрдістерін зерттеу көрсетілген. Нәтижесінде ерітіндідегі алтынның минималды қалдық мөлшерін қамтамасыз ету үшін сорбция кезеңдерінің минималды саны 4 екендігі анықталды. Сынақтарда көмірде қол жеткізілген ең жоғары алтын мөлшері 2,8 кг/т. Мыс мөлшері 7,2 кг/т болды. Нәтижелерге сәйкес, мыс десорбциясы бойынша сынақтар көрсеткендей, мыс десорбциялық ерітіндіге 73–82 % мөлшерінде өткенде, алтынның осы ерітіндімен бірге жоғалуы 0,1 %-дан аспайды. Мыс мөлшері 0,13 % болған көмірден десорбция дәрежесі 10 сағат бойы 40 °C температурада жүргізілгенде 76,7 % құрап, қалдық мөлшері 0,029 % болды, ал 20 °C температурада – 73,8 % болып, көмірдегі қалдық мөлшері 0,034 % құрайды. Мыс десорбциясының төмендеуіне байланысты 3-4 операциядан кейін ерітіндіні жаңарту керек.

Ключевые слова:

Золотомедные руды,
цианидное выщелачивание,
замкнутый цикл, сорбция,
упорные руды, десорбция,
стущение,
обезвреживание.

АННОТАЦИЯ

В данной работе показано исследование процессов сорбции и десорбции золота и меди из ранее полученного раствора цианидного выщелачивания золотомедной руды одного из месторождений Республики Казахстан с высоким содержанием меди. В результате было установлено, что минимальное количество стадий сорбции для обеспечения минимального остаточного содержания золота в растворе составляет 4. Максимально достигнутое в тестах содержание золота в угле 2,8 кг/т. Содержание меди составляло 7,2 кг/т. Результаты тестов по десорбции меди показали, что при извлечении меди в десорбирующий раствор на 73-82 %, потери золота с этим



раствором не превышают 0,1 %. Степень десорбции меди из угля с содержанием меди 0,13 % при проведении процесса в течение 10 часов при 40 °C составила 76,7 % при остаточном содержании 0,029 %, при температуре 20 °C – 73,8 % при остаточном содержании в угле 0,034 %. По причине снижения степени десорбции меди, после 3-4 операций раствор следует обновлять.

keywords:

Gold-copper ores, cyanide leaching, closed cycle, sorption, refractory ores, desorption, thickening, neutralization.

ABSTRACT

This paper presents a study of the sorption and desorption processes of gold and copper from a previously obtained cyanide leaching solution of gold-copper ore from one of the deposits in the Republic of Kazakhstan with a high copper content. As a result, it was established that the minimum number of sorption stages to ensure the minimum residual gold content in the solution is 4. The maximum gold content achieved in the tests was 2.8 kg/t. The copper content was 7.2 kg/t. The results of copper desorption tests showed that when 73-82% of copper was extracted into the desorbing solution, gold losses with this solution did not exceed 0.1%. The degree of copper desorption from coal with a copper content of 0.13% during a 10-hour process at 40 °C was 76.7% with a residual content of 0.029%, and at a temperature of 20 °C it was 73.8% with a residual content in coal of 0.034%. Due to the decrease in the degree of copper desorption, the solution should be renewed after 3-4 operations.

КІРІСПЕ

Соңғы уақытта алтынның оңай алынатын минералды қорлары азайып келеді (Henckens, 2021; Henckens, et al., 2016). Натрий цианидін қолдану арқылы алтынды алудың дәстүрлі әдістері (Kenzhaliyev, et al., 2023) минералды шикізаттың беріктігіне байланысты тиімділігі төмендейді (Medina, et al., 2020; Xie, et al., 2013) және мыс сияқты зиянды қоспалардың көп мөлшері (Dai, et al., 2012; Sceresini, 2005). Бұл мәселе жыл сайын Қазақстан Республикасы үшін де өзекті болып отыр (Kenzhaliyev, et al., 2023). Құрамында алтыны бар минералды шикізатты өңдеудің тиімділігін арттырудың әртүрлі әдістері бар. Қиын байытылатын кендерді дайындаудың дәстүрлі әдістері – флотациялық байыту және тотығу арқылы күйдіру болып табылады. Сондай-ақ аммиакпен алдын ала өңдеуді қамтитын (Bas, et al., 2015) немесе мысты әртүрлі тәсілдермен тұндыру арқылы жанама коммерциялық өнім ретінде алу әдістері бар (Kassymova, et al., 2024). Қайта өңдеу схемасы шикізаттың нақты құрамына байланысты және әмбебап бола алмайды. Бұл жұмыс сульфидті минералдармен (пирит, арсенопирит және халькопирит) жұқа ассоциацияда орналасқан құрамында мыс мөлшері жоғары Қазақстан кен орындарының бірінің алтын мыс кенін цианидпен ерітінділеу технологиясын зерттеу мен әзірлеудің жалғасы болып табылады (Kassymova, et al., 2025).

Бұл жұмыстың мақсаты бұрын алынған шаймалау ерітіндісінде алтын мен мысты сорбциялау және десорбциялау бойынша зерттеулер жүргізу.

ЗЕРТТЕУДІҢ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Барлық тәжірибелер Қазақстан Республикасында, Өскемен қаласында орналасқан «Д.Серікбаев» атындағы ШҚТУ және «ШҒЗТКМИтүсмет» ЕМК Шығыс тау-кен металлургиялық түсті металдар ғылыми-зерттеу институтында» өткізілді. Шикізаттың химиялық құрамын зерттеу үшін «Agilent technologies» (АҚШ) фирмасының ICP-MS 7500sx масс-спектрометрі пайдаланылды. Зерттеу объектісі – «ШҒЗТКМИтүсмет» тәжірибелік-өнеркәсіптік қондырғысында Қазақстан кен орнының алтын мыс кенін шаймалау кезінде алынған ерітінді. Ерітінді ауаны жеткізуге арналған диспергаторлармен және араластыруға арналған араластырғышпен жабдықталған 1,5 м³ үгіткіш ыдыста алынады. Ерітінділеу кезіндегі алынған ерітіндісіндегі натрий цианидінің бастапқы концентрациясы 0,05%



құрады, ерітіндіні натрий цианидінің бастапқы концентрациясына дейін күшейту процесс басталғаннан кейін 2, 4, 6 және 8 сағаттан кейін жүзеге асырылды. Ерітінділеудің жалпы ұзақтығы 24 сағатты құрады. Белсендірілген көмір процеске берілмеді. Ерітінділеу аяқталғаннан кейін ерітінділеу пульпасы сүзу үшін нутч-сүзгісіне берілді. Алтын, күміс, мыс және натрий цианидінің құрамын анықтау үшін сынамалар алынды. Ерітінділеудің қатты қалдықтары сумен шайылып, кептіріліп, алтын, күміс және мыс құрамына химиялық талдау жасалды. Ерітінділеу кезінде алынған ерітіндіде (NaCN 2,49 кг/т кенді тұтыну кезінде) элементтердің жоғарылауы байқалды: мыс 0,59 (г/дм³), темір (0,010-0,084 г/дм³), күкірт (0,2 г/дм³). Алтын мен күмістің мөлшері сәйкесінше 0,78 (мг/дм³) және 0,24 (мг/дм³).

Сорбция бойынша зерттеулер жүргізу. Сорбция бойынша зерттеулер келесі бағыттарда жүргізілді:

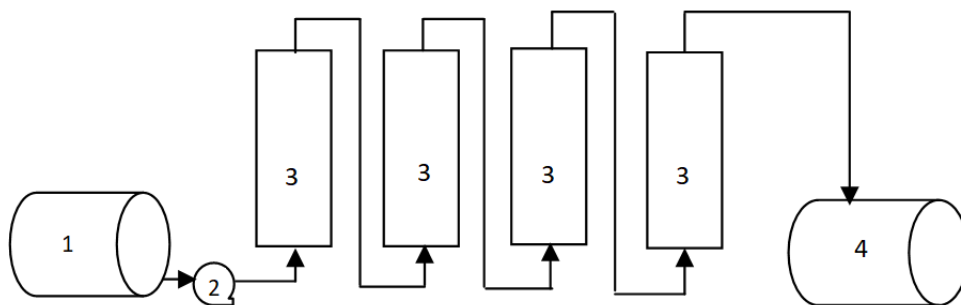
- алтынның минималды қалдық құрамына қол жеткізу үшін сорбция кезеңдерінің минималды санын теориялық анықтау мақсатында сорбция қисықтарын құру;

- сорбцияның динамикалық режиміндегі зерттеулердің анықтамасы – сорбция сатылары бойынша көмірдегі алтынның қол жеткізілетін құрамын анықтау және кейінгі мыс пен алтынды селективті десорбциялау сынақтарын жүргізу үшін қаныққан көмірді дайындау мақсатында жүргізіледі.

- көмірдегі алтынның максималды мөлшерін анықтау.

Сорбция изотермасын құрастыру үшін алтынды ерітінділеу нәтижесінде алынған ерітіндіден әртүрлі ерітінді мен көмір қатынасында сорбциялық тұндыру сынақтары жүргізілді: көмір (1 дм³ ерітіндіге 0,04-тен 200 г көмірге дейін). Сорбция бөлме температурасында 16 сағат бойы механикалық араластыру кезінде әртүрлі сыйымдылықтағы үгіткіштерде жүргізілді. Араластырмалы өңдеу аяқталғаннан кейін сорбциядан кейінгі көмір мен ерітінділер алтын мен мыс құрамына талданды.

Динамикалық режимдегі сорбция сынақтары сұлбасы 1-суретте көрсетілген қондырғыда жүргізілді.



1-сурет. Ерітінділеу кезінде алынған ерітінділердің сорбциялық өңдеудің зертханалық қондырғысының принципті аппаратты сұлбасы: 1 – өнімді ерітіндінің сыйымдылығы;

2 – сорғы; 3 – сорбция бағандары; 4 – алтындатылған ерітіндінің сыйымдылығы

Ескерту: авторлар құрастырған

Сорбция үшін NORIT маркалы цианид ерітінділерінен алтын алу үшін жоғары белсенді түйіршікті белсендірілген көмір пайдаланылды. Сорбциялық тазарту бойынша екінші операцияны жүргізер алдында ерітіндіні неғұрлым толық тазартуды қамтамасыз ету үшін зертханалық қондырғының құрамына жаңа белсендірілген көмірі бар бесінші баған енгізілді. Алдағы кезеңде бірінші колоннаның шығуындағы ерітіндідегі алтынның құрамы 0,5 мг/дм³-тен асқан кезде, бұл колонна сорбция процесінен шығарылып, оның орнына келесі баған ауыстырылды, ал бесінші бағанның орнына жаңа активтендірілген көмірі бар баған енгізілді. Қаныққан көмір шайылды, химиялық талдауға алынды, ал қалған бөлігі мыс десорбциясы сынақтарына жіберілді.

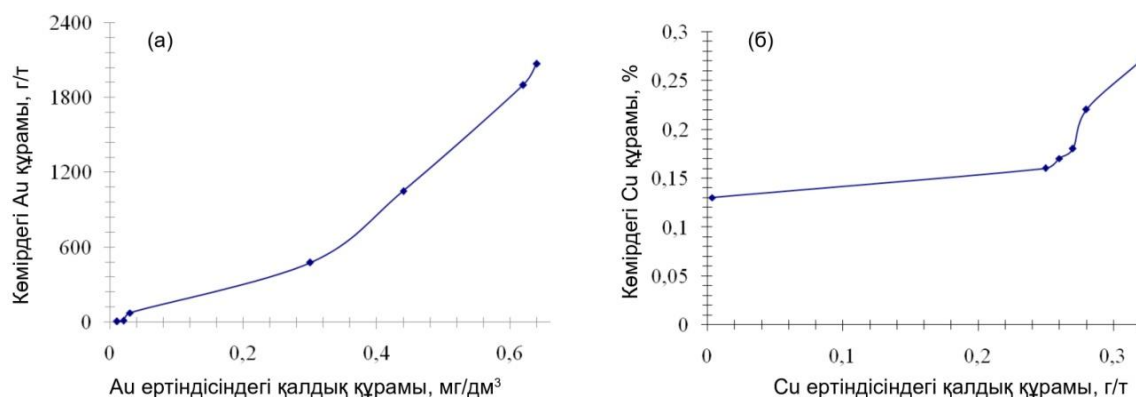


Алтынды десорбциялау бойынша сынақтар жүргізу. Сынақтар 120 °С температурада жоғары қысымды автоклапта жүргізілді.

Мыс десорбциясы бойынша сынақтар жүргізу. Мыс десорбциясының алғашқы сынағы. Десорбцияның ұзақтығы 10 сағат, температурасы 20 °С. Бағаның шыға берісінен шыққан сайын екі сағат сайын мыс пен алтынның құрамына сынама алынды. Мыс десорбциясының екінші сынағы 40 °С температурада жүргізілді, F:T=20:1, араластыру режимінде 10 сағатқа созылды. 10 сағат өткеннен кейін көмір жуылып, мыстың қалдық құрамын анықтауға тапсырылды. Кейінгі десорбция сынақтарында сорбция сынақтарын жүргізу кезінде алынған қаныққан көмірдің әртүрлі партиялары бағанға жүктелді. Сынақтың соңындағы мыс құрамына сынама алынғаннан кейін десорбцияға арналған ерітінді ерітіндідегі мыс жиналуының десорбция көрсеткіштеріне әсерін анықтау мақсатында бірдей пайдаланылды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Алтын мен мыс сорбциясы сынақтарының нәтижелері. Сорбция сынақтарының нәтижелері 2, а-суретте алтын сорбциясының изотермасы және 2, б-суретте мыс сорбциясының изотермасы берілген



2-сурет. Алтын (а) және мыс (б) сорбциясының изотермасы

Ескерту: авторлар құрастырған

Ерітіндіні сорбциялық өңдеу нәтижелері 1-кестеде келтірілген.

1-кесте. Ерітіндіні сорбциялық өңдеу нәтижелері

Сорбциялық бағандарға ерітіндіні беру жылдамдығы		Ерітінді мөлшері, дм ³	Ерітіндідегі құрамы, мг/дм ³ баған бойынша									
Дм ³ /сағ	м ³ /т көмір/сағ		I баған		II баған		III баған		IV баған		V баған	
			Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
8,76	134,8	160	0,17	0,17	0,10	0,13	0,034	0,065	0,014	0,037		
		200	0,34	0,28	0,20	0,13	0,10	0,10	0,045	0,06		
6,0	92,3	100	0,43	0,43	0,2	0,24	0,032	0,15	0,016	0,10	0,016	0,10
		100	0,60	0,32	0,46	0,24	0,26	0,30	0,19	0,25	0,022	0,20
		100	0,50	0,50	0,29	0,35	0,16	0,32	0,076	0,23	0,029	0,13
		100	0,53	0,41	0,29	0,36	0,19	0,29	0,11	0,25	0,054	0,19
		100	0,47	0,36	0,40	0,34	0,26	0,32	0,12	0,24	0,023	0,097
		100	0,49	0,37	0,41	0,31	0,24	0,30	0,12	0,22	0,04	0,13
Ескерту: авторлар құрастырған												

Ескерту: авторлар құрастырған



Екі сорбция циклінен кейін қаныққан көмірдің химиялық құрамы 2-кестеде келтірілген

2-кесте. «Юбилейное» кен орнының кенді ерітінділеу кезінде алынған ерітінділерін сорбциялық тазартудан кейін көмірдің химиялық құрамы

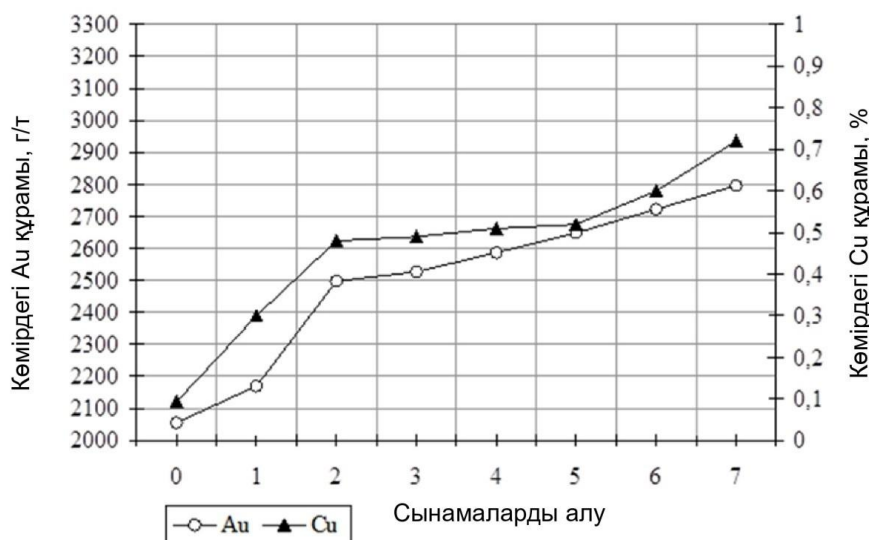
Баған	Көмірдегі құрамы				
	Au, г/т	Ag, г/т	Cu, %	Ca, %	Mg, %
1 цикл					
1	2193,0	667,0	0,13	2,55	0,11
2	2056,0	338,0	0,093	1,36	0,065
3	2173,0	801,0	0,085	1,22	0,051
4	849,6	167,5	0,12	1,45	0,063
2 цикл					
1	1812,5	605,0	0,34	1,41	0,059
2	1371,5	577,0	0,37	1,03	0,053
3	707,0	382,0	0,36	0,98	0,047
4	292,5	294,0	0,40	0,97	0,044
Ескерту: авторлар құрастырған					

Динамикалық режимдегі сорбция сынақтарында көмірдегі алтынның мөлшері 2,2 кг/т аспағандығына байланысты көмірдің максималды қанықтылығын анықтау үшін қосымша сынақтар қойылды. Көлемі 200 дм³, құрамында 0,78 мг/дм³ алтын және 0,59 г/дм³ мыс бар ерітінді тұйық режимде 18 дм³/сағ жылдамдықпен 2056 г/т көмірде алтын және 0,093% мыс бар 10 г мөлшеріндегі көмірі бар баған арқылы өткізілді. Әр 8 сағат сайын көмірдегі алтын мен мыс құрамын анықтау үшін көмір сынамалары алынды. Тест нәтижелері 4-кестеде және 3-суретте көрсетілген.

3-кесте. Сорбциялық тазартудан кейінгі көмірдің химиялық құрамы

№ р/с	Көмірдегі құрамы	
	Au, г/т	Cu, %
0	2056,0	0,093
1	2170,0	0,30
2	2498,0	0,48
3	2526,5	0,49
4	2587,0	0,51
5	2649,0	0,52
6	2722,5	0,60
7	2797,0	0,72
Ескерту: авторлар құрастырған		

Алтын мен мыс сорбциясының десорбциялық сынақтарының нәтижелері. Мыс бойынша алғашқы десорбция сынағы алтынның құрамы 2193 г/т және мыстың құрамы 0,13 % (1,3 кг/т) болатын көмірде жүргізілді. Десорбция ерітіндісіндегі сілтінің концентрациясы 20 г/дм³, натрий цианиді – 5,0 г/дм³ болды. Десорбцияның ұзақтығы – 10 сағат, температурасы – 20 °С. Элюция жылдамдығы 0,118 дм³/сағ болды. Әр екі сағат сайын бағаннан шыққан кезде мыс пен алтынның құрамына сынама алынды.



3-сурет. Ерітінділеу нәтижесінде алынған ерітінділерден алтын мен мыс сорбциясы кезіндегі көмірдің қанығу динамикасы

Ескерту: авторлар құрастырған

Десорбция ерітінділерінің құрамы және мыс пен алтынның есептелген десорбция дәрежелері 5-кестеде келтірілген. Көмірдегі мыстың қалдық мөлшері 0,034 % құрады. Мыс десорбциясының екінші сынағы 40°C температурада жүргізілді, F:T=20:1, араластыру режимінде 10 сағатқа созылды. Сынақ құрамында мыс мөлшері 0,13 % (1,3 кг/т) болатын көмірде жүргізілді. Десорбция ерітіндісіндегі сілтінің концентрациясы 20 г/дм³, натрий цианиді – 0,5 г/дм³ болды. 10 сағаттан кейін көмір шайылып, 0,029 % құрайтын мыстың қалдық құрамын анықтауға тапсырылды.

4-кесте. Мыс десорбциясының бірінші сынағының нәтижелері

Ұзақтығы, сағ	Мыс			Алтын		
	Ерітіндідегі мөлшері, г/дм ³	Десорбция дәрежесі, %		Ерітіндідегі құрамы, мг/дм ³	Десорбция дәрежесі, %	
		кезең ішінде	Кумулятивтік		кезең ішінде	Кумулятивтік
2	0,024	14,5	14,5	0,036	0,013	0,013
4	0,032	19,4	33,9	0,048	0,017	0,030
6	0,030	18,1	52,0	0,054	0,019	0,049
8	0,022	13,3	65,3	0,060	0,021	0,070
10	0,018	10,9	76,2	0,054	0,019	0,089

Ескерту: авторлар құрастырған

Кейінгі десорбция сынақтарында сорбция сынақтарын жүргізу кезінде алынған қаныққан көмірдің әртүрлі партиялары бағанға жүктелді. Сынақтың соңындағы мыс құрамына сынама алынғаннан кейін десорбцияға арналған ерітінді ерітіндідегі мыс жиналуының десорбция көрсеткіштеріне әсерін анықтау мақсатында бірдей пайдаланылды. Мыс десорбциясы сынақтарының нәтижелері 5-кестеде келтірілген.



5-кесте. Мыс десорбциясы сынақтарының нәтижелері

№ p/c	Көмірдегі мыстың бастапқы мөлшері, %	Ерітіндідегі мыс мөлшері, г/дм ³	Көмірдегі мыстың қалдық мөлшері, %	Десорбция дәрежесі, %
1	0,13	0,028	0,034	73,8
2	0,13	0,047	0,023	82,3
3	0,093	0,068	0,033	64,5
4	0,085	0,084	0,056	34,1
5	0,085	0,092	0,062	27,1
Цианид натрий және сілтінің концентрациясы барлық циклдарда бірдей болып қалды				
Ескерту: авторлар құрастырған				

Алтынды десорбциялау бойынша сынақтар жүргізу. Алтынды десорбциялау бойынша сынақтар құрамында 1659,0 г/т алтын, 410,0 г/т күміс және 370 г/т мыс бар көмірде жүргізілді. Сынақтар жоғары қысымды автоклавта 120 °С температурада жүргізілді. Алтынды десорбциялау үшін сілтілік концентрациясы 20 г/дм³, натрий цианиді – 1,0 г/дм³ болатын ерітінді қолданылды.

Алтынның десорбциясы аяқталғаннан кейін көмірдегі алтынның қалдық мөлшері – 60 г/т, күміс – 110 г/т және мыс 45 г/т болды. Десорбция ерітінділеріндегі алтын мөлшері 80 мг/дм³, күміс – 15 мг/дм³ және мыс 0,016 г/дм³ құрады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Сорбция сынақтарының нәтижелері мынаны көрсетті:

– ерітіндідегі алтынның минималды қалдық мөлшерін қамтамасыз ету үшін сорбция кезеңдерінің минималды саны 4 құрайды;

– көмірдегі мыс мөлшері алтыннан едәуір асып түседі. Сынақтарда қол жеткізілген көмірдегі алтынның мөлшері 2,8 кг/т аспады, мыс мөлшері 2,5 есе жоғары және 7,2 кг/т (0,72 %) құрады.

Мыс десорбциясы сынақтарының нәтижелері:

– мысты десорбциялау режимі селективтілік бойынша қанағаттанарлық нәтижелер көрсетті: мыс десорбциялау ерітіндісіне 73-82 %-ға шығарғанда, осы ерітіндімен алтынның жоғалуы 0,1-ден аспайды %;

– мыс құрамасы 0,13 % болатын көмірден 10 сағат бойы 40 °С температурада жүргізілген процесс кезінде мыс десорбциясының деңгейі 76,7 % болып, қалдық құрам 0,029 % болды; 20 °С температурада – десорбция 73,8 % құрап, көмірдегі қалдық құрам 0,034 % болды.

– көмірдің жаңа партияларын десорбциялау үшін бірдей ерітіндіні қолдану мыстың десорбция дәрежесінің біртіндеп төмендеуіне әкеледі. 3-4 операциядан кейін ерітіндіні жаңарту керек сияқты.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар өз жұмыстарын дайындаудың әртүрлі кезеңдерінде жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын пайдаланбаған.



ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Henckens, T. (2021). Scarce mineral resources: Extraction, consumption and limits of sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105511. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105511>
- Henckens, M.L.C.M., Ierland, E.C., Driessen, P.P.J., Worrell E. (2016). Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy*, 49, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.012>
- Kenzhaliyev, B.; Surkova, T.; Yessimova, D.; Abikak, Y.; Mukhanova, A.; Fischer, D. On the Question of the Complex Processing of Pyrite Cinders. *Inorganics*, 2023, 11, 171.
- Medina, D., Anderson, C.G. (2020). A Review of the Cyanidation Treatment of Copper-Gold Ores and Concentrates. *Metals*, 10, 897. <https://doi.org/10.3390/met10070897>
- Xie, F., Dreisinger, D., Doyle, F. A Review on Recovery of Copper and Cyanide from Waste Cyanide Solutions. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* **2013**, 34, 387–411. <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2012.695303>
- Dai, X., Simons, A., Breuer, P. (2012). A review of copper cyanide recovery technologies for the cyanidation of copper containing gold ores. *Minerals Engineering*, 25(1), 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.10.002>
- Sceresini, B. (2005). Gold-copper ores. *Developments in Mineral Processing*, Elsevier, 15, 789–824. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15032-7](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15032-7)
- 2.Kenzhaliyev, B., Surkova, T., Koizhanova, A., Yessimova, D., Amanzholova, L., & Dosymbayeva, Z. (2023). Study of the Cyanide Leaching of Gold from Low-Grade Raw Materials in the Presence of Amino Acids. *Inorganics*, 11(12), 461. <https://doi.org/10.3390/inorganics11120461>
- Bas, A.D., Koc, E., Yazici, E.Y., Devci, H. (2015). Treatment of copper-rich gold ore by cyanide leaching, ammonia pretreatment and ammoniacal cyanide leaching. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25 (2), 597-607. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63642-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63642-1).
- Kassymova, D., Sapinov, R., Kushakova, L., Kulenova, N., Shoshay, Z., & Adylkanova, M. (2024). Optimization of Copper Recovery from Cyanide Leaching Solutions Used in Gold–Copper Ore Processing Using Probabilistic–Deterministic Experimental Design. *Processes*, 13(1), 61. <https://doi.org/10.3390/pr13010061>
- Kassymova, D., Sapinov, R., Kulenova, N., Adylkanova, M. (2025) Study of the material composition of gold-copper ores from Kazakhstani deposits. *Science and technology of Kazakhstan*, 1, 248–258. <https://doi.org/10.48081/HAHW3828>

Авторлар туралы мәліметтер Информация об авторах Information about authors



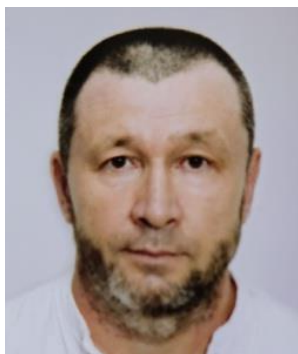
Касымова Динара Бекжановна – докторант, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Касымова Динара Бекжановна – докторант, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Kassymova Dinara Bekzhanovna – doctoral student, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: dinara_kassymova@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0937-8477>,



Сапинов Руслан Викторович – PhD, Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан

Сапинов Руслан Викторович – PhD, Торайғыров университет, г. Павлодар, Казахстан

Ruslan Viktorovich Sapinov – PhD, Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan

e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9334-5806>,



Әділқанова Меруерт Әділқанқызы – PhD, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Әділқанова Меруерт Әділқанқызы – PhD, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Meruyert Adilkanova Adilkankyzy – PhD, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: milka160281@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8193-116X>,



Реутова Галина Александровна – т.ғ.к., қауым. проф., Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Реутова Галина Александровна – к.т.н., ассоц. проф., Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Reutova Galina Alexandrovna – candidate of Technical Sciences, associate professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: greutova.42@mail.ru ,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5905-2687>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_80

IRSTI 52.13.15

ASSESSMENT OF GEOLOGICAL CONDITIONS AND PROSPECTS FOR METHANE PRODUCTION IN THE KARAGANDA COAL BASIN

ОЦЕНКА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДОБЫЧИ МЕТАНА В КАРАГАНДИНСКОМ УГОЛЬНОМ БАСЕЙНЕ

ҚАРАҒАНДЫ КӨМІР БАССЕЙНІНДЕ МЕТАН ӨНДІРУДІҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЛАРЫ МЕН ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫН БАҒАЛАУ

R.A. Musin ¹, M. Rabatuly ^{1*}, N.M. Zamaliyev ¹, D.R. Akhmatnurov ¹

¹Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

*Corresponding author: Rabatuly Mukhamedrahym, e-mail: m.rabatuly@ktu.edu.kz

Keywords:

methane, coal seams, mining prospects, degassing, industrial, hydraulic fracturing, gas content, permeability..

ABSTRACT

The article explores the prospects for methane extraction at the Taldykuduk and Saran sections of the Karaganda coal basin. It highlights the geological features of these areas, including tectonic structures and varying gas-bearing parameters. Drilling methods, such as vertical drilling with hydraulic fracturing and directional horizontal drilling, are described along with their applicability under specific conditions. The emphasis is placed on the necessity of systematizing and updating geological data, as existing information on the permeability and gas saturation of coal seams is fragmented.

The study underscores the critical role of investigating the physical and mechanical properties of coal and conducting additional isothermal desorption tests to evaluate the critical desorption point. The high potential for methane production at significant depths, where gas content reaches 20 m³/t or more, is noted, making these sections attractive for pilot project implementation. The combination of hydraulic fracturing and horizontal drilling methods is recommended to enhance productivity in low-permeability conditions.

The article provides conclusions and recommendations for designing drilling operations, emphasizing the need for advanced technologies and the involvement of skilled professionals. It underscores the importance of an integrated approach to studying and developing coalbed methane in the Karaganda basin to achieve sustainable gas extraction.

Түйінді сөздер:

метан, көмір қабаттары, өндіріс перспективалары, газсыздандыру, өнеркәсіптік, гидро жару, газдылық, өткізгіштік..

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада Қарағанды көмір бассейнінің Талдықұдық және Саран учаскелерінде метанды өндіру перспективалары қарастырылған. Учаскелердің геологиялық құрылымының ерекшеліктері, соның ішінде әртекті тектоникалық құрылымдар және газдылықтың әртүрлі параметрлері ұсынылған. Гидро жарумен тік бұрғылау және бағытталған көлденең бұрғылау сияқты бұрғылау әдістері және олардың жағдайларға байланысты қолданылуы сипатталған. Геологиялық деректерді жүйелеу және өзектендіру қажеттілігіне баса назар аударылады, себебі көмір қабаттарының өткізгіштігі мен



газға қанықтылығы туралы бар ақпарат толық емес. Көмірдің физикалық-механикалық қасиеттерін зерттеудің және десорбцияның критикалық нүктесін бағалау үшін қосымша изотермиялық сынақтар жүргізудің негізгі рөлі көрсетілген. Газдылығы 20 м³/т немесе одан да көп жететін, бұл учаскелерді пилоттық жобаларды іске асыру үшін тартымды ететін елеулі тереңдіктер аймағында метан өндірудің жоғары әлеуеті атап өтілді. Төмен өткізгіштік жағдайында өнімділікті арттыру үшін гидро жару және көлденең бұрғылау әдістерінің үйлесімі ұсынылады. Заманауи технологияларды пайдалану және білікті мамандарды тарту қажеттілігін қоса алғанда, бұрғылау жұмыстарын жобалау бойынша қорытындылар мен ұсынымдар ұсынылған. Жұмыс тұрақты газ өндіруге қол жеткізу үшін Қарағанды бассейнінде көмір метанын зерттеу мен әзірлеуге кешенді тәсілдің маңыздылығын атап көрсетеді.

Ключевые слова:

метан, угольные пласты,
перспективы добычи,
дегазация,
промышленное,
гидро разрыв пласта,
газоносность,
проницаемость

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены перспективы добычи метана на Талдыкудукском и Саранском участках Карагандинского угольного бассейна. Представлены особенности геологического строения участков, включая тектонические структуры и варьирующие параметры газоносности. Описаны методы бурения, такие как вертикальное бурение с гидроразрывом пластов и направленное горизонтальное бурение, и их применимость в зависимости от условий. Акцент сделан на необходимости систематизации и актуализации геологических данных, так как существующая информация о проницаемости и газонасыщенности угольных пластов фрагментарна. Показана ключевая роль исследования физико-механических свойств углей и проведения дополнительных изотермических испытаний для оценки критической точки десорбции. Отмечен высокий потенциал метанодобычи в зоне значительных глубин, где газоносность достигает 20 м³/т и более, что делает эти участки привлекательными для реализации пилотных проектов. Рекомендовано сочетание методов гидроразрыва и горизонтального бурения для повышения производительности в условиях низкой проницаемости. Представлены выводы и рекомендации по проектированию буровых работ, включая необходимость использования современных технологий и привлечения квалифицированных специалистов. Работа подчеркивает значимость комплексного подхода к изучению и разработке угольного метана в Карагандинском бассейне для достижения устойчивой добычи газа.

INTRODUCTION

The development and extraction of methane in the Karaganda coal basin are planned for the Taldykuduk and Saran sections, which are integral parts of the basin. These sections hold a significant volume of geological data collected during the Soviet era, including the drilling of 18–30 wells per square kilometer on the Saran section and 10–15 wells per square kilometer on the Taldykuduk section. However, this historical data has not yet been systematized or utilized for constructing a geological model.

Coal deposits in the Karaganda basin have been developed for many years. Of particular interest for methane extraction is the Karaganda suite, comprising coal-bearing seams and clastic deposits with a total thickness of 780–800 meters. This multilayer sequence includes seams up to 60 meters thick, such as the notable K12 seam, which reaches a thickness of 8.4 meters (Figure 1). The cumulative thickness of coal seams represents a significant positive factor contributing to a high potential methane yield.

According to the literature (Dou X., 2025; Drizhd N.A., Alexandrov A.Yu. & Zhunis G.M., 2020; Xu F., Zhang W. & Zhao G. 2023; Fang H., Li A. & Huang Y. 2023), coal deposits in the Karaganda basin contain substantial volumes of methane, highlighting the need to ensure safety in coal mines. However, no underground mining activities have been conducted to date on the Saran and Taldykuduk sections, allowing these areas to be considered "unrelieved" zones with high potential for methane production.

The coal seams of the Karaganda basin have undergone significant tectonic modifications. Within the project sections, faults, anticline and syncline structures, and zones of structural deformation are observed. Methane emissions have been detected in loose coal near these zones. The metamorphism of coal seams ranges from 1.04 to 1.75, creating favorable conditions for methane accumulation and extraction.

Thus, the combination of geological and tectonic features of the Taldykuduk and Saran sections determines their high potential for methane development, making them promising targets for detailed research and subsequent project implementation.

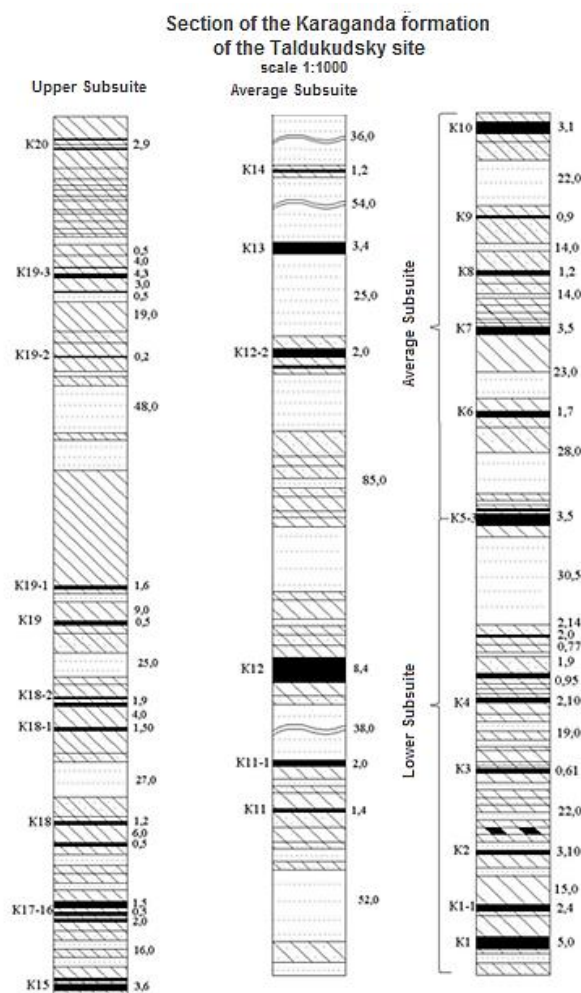


Figure 1. The sequence of strata in the Karaganda formation

Note: compiled by the authors

The study employed a combination of geological, geophysical, and analytical methods to evaluate the methane potential of the Karaganda coal basin, specifically at the Taldykuduk and Saran sites.



Geological data analysis. Archival geological reports and well-logging data from the Soviet period were reviewed and systematized. These data included information on the thickness of coal seams, tectonic structures, and lithological composition. - Geophysical surveys. Borehole geophysical methods (logging, gas content measurements, and cavementry data) were used to identify seam boundaries, permeability indicators, and gas saturation. Laboratory tests. Isothermal desorption analyses were carried out on coal samples to determine the critical desorption pressure (CDP) and methane sorption isotherms. The physical and mechanical properties of coal were also assessed through compression and permeability tests. Analytical modeling. Based on the collected data, gas content versus depth correlations were constructed. Preliminary reservoir modeling was performed to assess the spatial variability of permeability and methane content. This methodology provided the basis for identifying key parameters necessary for evaluating methane production prospects and for selecting appropriate drilling technologies.

MATERIALS AND METHODS

The results of the applied methods demonstrate a consistent increase in gas content with depth, accompanied by significant variability in permeability values. On the Taldykuduk site, maximum gas content reaches 20.2 m³/t, increasing up to 115–125 m³/t in the “methane zone” at depths exceeding 500 m. However, permeability remains highly heterogeneous, ranging from below 0.01 mD to 20–40 mD.

These findings indicate that while the methane resource potential is substantial, extraction efficiency will be strongly constrained by low permeability in certain intervals. Hydraulic fracturing and horizontal drilling are therefore recommended as combined methods to improve productivity.

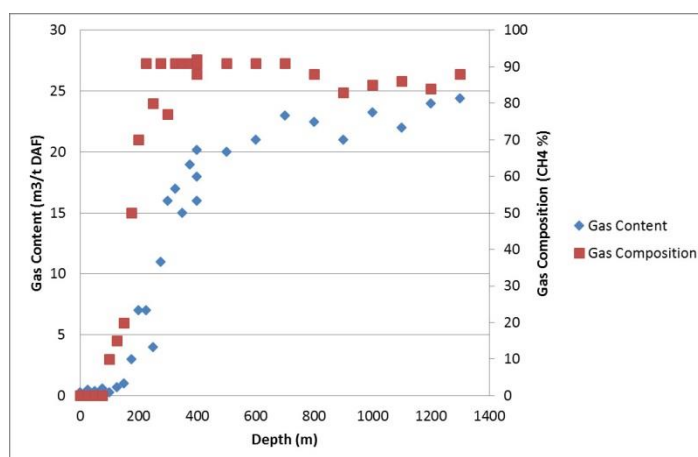


Figure 2. The gas content according to the depth

Note: compiled by the authors

The composition of the gas, characterized by methane content, is displayed on the Y axis. It should be noted an uneven increase in gas concentration with increasing depth and significant methane losses with high hydrocarbon content at depths over 700 m. Tests on the construction of a gas sorption isotherm have not been carried out. Nevertheless, a similar isotherm that best meets the conditions is shown in Fig. 3. According to calculations, coal seams are located near the gas saturation state. However, this conclusion is based on fragmentary and unreliable data obtained during mining activities.

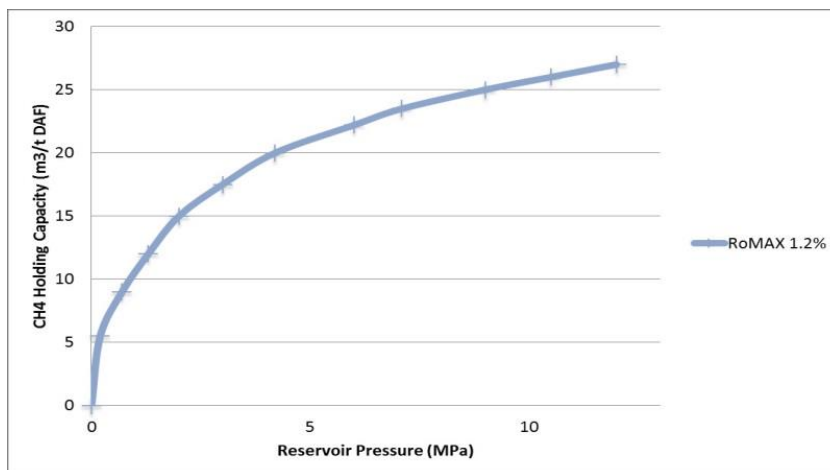


Figure 3. Prognostic isotherm for coals of the Karaganda basin

Note: compiled by the authors

To refine gas saturation parameters, it is recommended to conduct additional studies aimed at determining the critical desorption pressure (CDP) and the corresponding reservoir pressure for key seams, such as seam K12 (Wang Z., Fu X. & Zhou H. 2023; Reddy B.R., Ashok I. & Vinu R., 2020).

Sorption isotherm calculations should be performed exclusively for methane (CH₄), aligning with the most applicable methodologies for the Karaganda coal basin. Accurate isotherm data are essential for estimating the required water removal volume to reach the level at which gas extraction becomes feasible, as well as for determining the capacity of pumping equipment. These parameters are crucial for the efficiency of drilling operations in coal seams, particularly when using directional drilling methods, as planned for the Karaganda basin. Currently, reliable data on coal seam permeability are lacking. However, based on scattered reports, permeability values are estimated to range from less than 0.01 mD (extremely low permeability) to 20–40 mD (good permeability). For coal seams, permeability in the range of 20–40 mD is considered sufficient for extraction, while values below 0.01 mD significantly hinder or render extraction unfeasible. Globally, no successful commercial coalbed methane (CBM) projects have been documented at permeability levels below 1 mD. Low permeability remains a major challenge for CBM project implementation in several countries, including China, India, the United Kingdom, Australia, and the United States (Zhang X., Cai Y. & Kang J. 2023). Available data suggest that the coal seams of the Karaganda basin may also exhibit extremely low permeability, posing a significant challenge for successful project execution. While permeability generally increases at shallower depths, it remains low in dense coal seams.

Reservoir pressure is assumed to be hydrostatic; however, no reliable confirmation is available. In certain cases, overpressure has been observed. No permeability measurements under pressure conditions have been conducted on Karaganda coal cores, nor have the directions of prevailing stress fields been studied. Permeability anisotropy is widespread, limiting the planning of optimal azimuths for directional drilling (Rabatuly M., Musin R.A. & Kenetaeva A.A. 2023). Detailed studies are required to determine the directions of tectonic stress fields and coal seam cleat orientations, which are critical components of ongoing reservoir evaluations. The current dataset is insufficient for comprehensive pilot project planning. The primary objective of data collection is to determine an optimal extraction strategy that balances maximizing permeability with adequate gas content in the seams.

Drilling depth parameters, according to international practices, range from 300 to 600 m. Successful projects are rare at depths exceeding 800 m. On the Saran site, hydraulic fracturing



was performed at a depth of 830 m in seam K12, but the results were unsatisfactory (gas flow rates of 30,000-40,000 m³/day for a short duration). The next pilot project is planned for the Taldykuduk site, using directional drilling on one of the thick coal seams. The Atlas Copco RD20 rig, with a capacity of 40 tons, will be employed. The drilling plan includes setting the conductor casing at 10 m, intermediate casing at 80 m, deviating the wellbore at 120 m, followed by horizontal drilling along the seam for approximately 300 m (Jianguang W., 2019). The project's goal is to achieve a stable gas flow rate of 5,000–6,000 m³/day (up to 200,000 m³/month) over a prolonged operational period.

Figure 4 illustrates an example of changes in coal seam gas content with depth. The optimal depth for methane extraction is not determined by maximum gas content but rather by the zone where a balance is achieved between required gas content and permeability indicators.

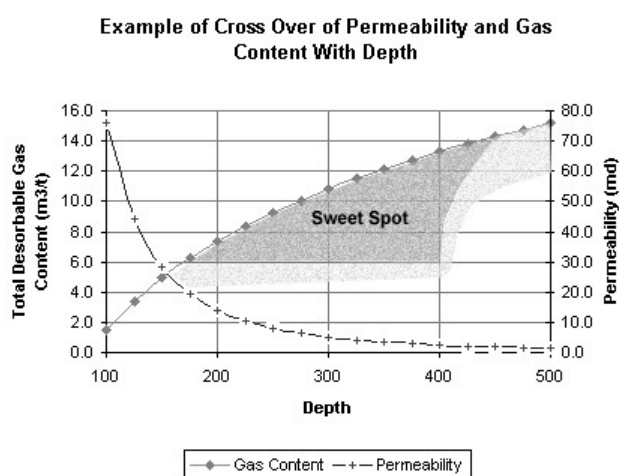


Figure 4. Changes in the gas content of coal seams depending on the depth

Note: compiled by the authors

Commencing operations without obtaining precise data on reservoir properties is highly risky and economically unjustifiable. The main challenges associated with the use of hydraulic fracturing and the design of horizontal drilling are outlined below.

The selection of a depth of 830 m for hydraulic fracturing virtually guarantees low reservoir permeability and, consequently, insufficient well productivity. This case exemplifies an approach where the complex process of coalbed methane extraction is initiated before conducting detailed reservoir studies.

International experience indicates that projects employing hydraulic fracturing at such depths are exceedingly rare. Even in cases where they are implemented, reservoir permeability is typically higher than that in the Karaganda basin. Furthermore, in most coal deposits, hydraulic fracturing is not used as a standard completion method. For instance, in Australia, the share of such projects is only 5–8% (Zhou W., Wang H. & Liu, X.2019).

The proposed horizontal drilling design represents an "absorbing column" that does not intersect the vertical pump bore (Figure 5). International coalbed methane development practices typically involve the use of separate vertical production wells equipped with pumps and gas collection systems (Figure 6). An example of multi-seam implementation is shown in Figure 7.

To enhance efficiency, it is recommended to drill a pressure monitoring well calibrated to the reservoir pressure.

The planned length of the horizontal wellbore is 300 m, which falls significantly short of international standards. This limitation reduces the well's impact on the reservoir and constrains the potential gas production volume.

The diameter of the proposed well is 168 mm, making it one of the largest diameters used for coalbed methane extraction. However, the increased diameter reduces the flexibility of the drilling equipment, which may complicate trajectory control.

Precise targeting of the seam is a critical aspect of successful drilling. Insufficient information on seam positioning increases the risk of an overly steep entry, potentially requiring additional drilling at the seam base to adjust the trajectory. This factor significantly elevates technical risks, particularly under conditions of limited understanding of the site's geological structure.

Effective seam drilling management requires specialized equipment and the involvement of highly skilled professionals with experience in coalfield operations. To achieve more precise control, intentional deviation of the drill stem trajectory is recommended, allowing for the determination of the optimal position of the drilling tool within the seam.

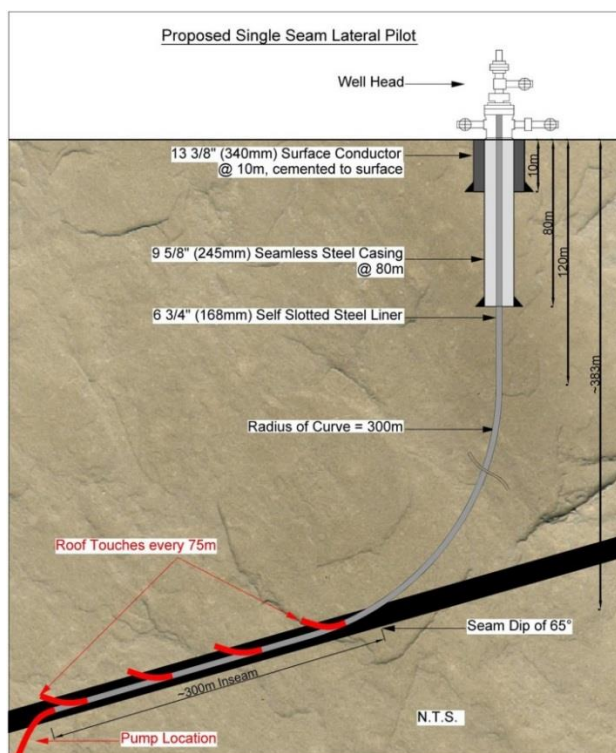


Figure 5. Horizontal directional drilling well

Note: compiled by the authors

At the Taldykuduk site (highlighted in gray), the proposed intersections with the roof of the coal seam and the final placement of the pump are marked in red.

Given the anticipated low permeability of the coal seams in the Karaganda Basin, achieving production goals and accessing resources will require either hydraulic fracturing or a combination of hydraulic fracturing and horizontal drilling. General recommendations include:

For gas permeability below 5 mD, a multilateral well is required.

For gas permeability ranging from 5 to 20 mD, it is advisable to combine hydraulic fracturing with horizontal drilling.

Figure 6 illustrates an example of a horizontal well commonly used in global coalbed methane extraction practices. The key features of this design include the production section of the wellbore positioned at a specified depth and a pressure-monitoring well located near the target seam.

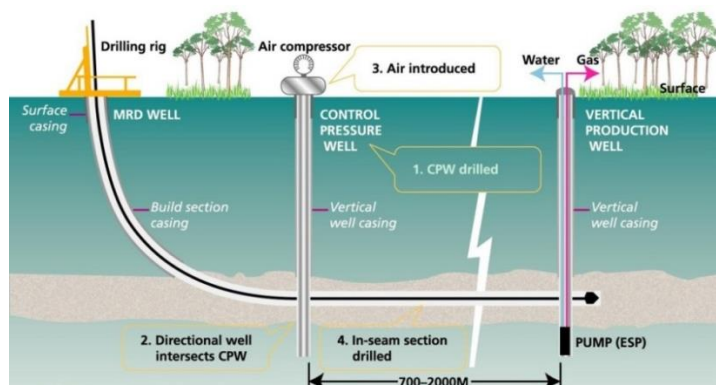


Figure 6. Simple horizontal wells

Note: compiled by the authors

Figure 7 presents an example of a multilateral well. Its key features include the placement of the pump at the point of angle buildup and the orientation of the borehole upward along the dip of the coal seam. This method is based on utilizing gas pressure to drive water upward (highlighted in yellow) toward the main wellbore (marked in red).

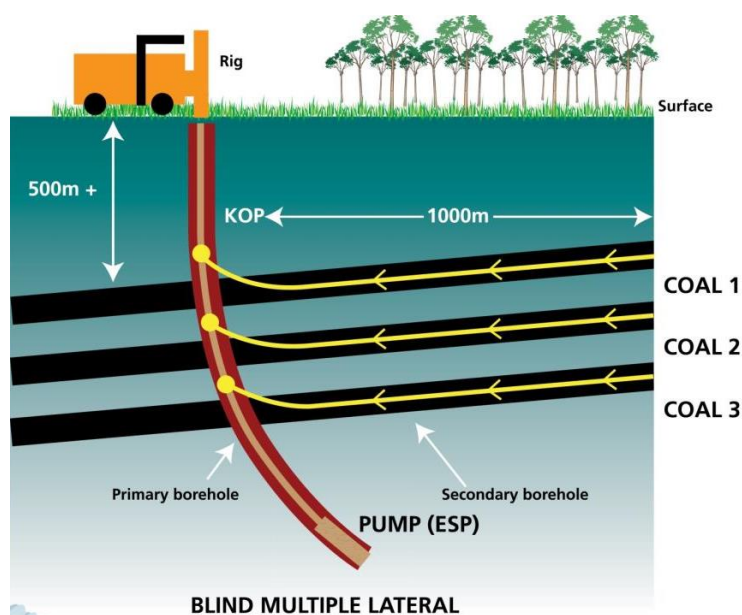


Figure 7. Multi-barrel wells

Note: compiled by the authors

The development of coalbed methane extraction in the Karaganda Basin holds significant potential. Despite the limited availability of field data, preliminary assessments suggest that total methane resources at the Saran and Taldykuduk sites may range from 2 to 10 trillion cubic feet, with the K12 seam alone potentially containing up to 1 trillion cubic feet. According to international standards, these represent exceptionally large gas reserves (Zhou D., Chen G. & Liu, Z. 2022; Xu F., Yan X. & Mei Y. 2022).

However, the quality of the data supporting these estimates remains unsatisfactory, necessitating prioritized research. Specifically, clarifications are required in the following areas:

- Absolute permeability and its distribution with depth;
- Degree of gas saturation in the seams;



Relationship between gas content and depth within the seams;
Geological structure of the sites.

Permeability is the key factor determining the success of methane extraction operations. Before commencing pilot drilling, it is recommended to gather comprehensive and reliable data on these parameters. Additionally, studying the continuity of coal seams at selected depths is crucial, as this remains insufficiently explored.

During drilling, it is advisable to intersect the horizontal well with a vertical well equipped with a pump. It is unlikely that an absorbing well design will be successful. Early challenges include trajectory adjustments, achieving the correct angle of entry into the seam, and maintaining the wellbore trajectory within the seam.

To minimize risks from the outset, it is essential to engage highly qualified specialists and employ reliable directional drilling equipment. A significant concern remains the possibility of extremely low gas output, even with successful drilling execution.

While coalbed methane extraction in the Karaganda Basin presents promising prospects, its realization requires a systematic approach. This involves first collecting accurate data and subsequently determining the most effective extraction methods. Furthermore, the experience gained from these operations will be valuable for further degassing of coal seams in the region.

CONCLUSION

The development and extraction of methane in the Karaganda coal basin, particularly at the Taldykuduk and Saran sites, demonstrate substantial potential. However, the current limitations in geological and gas-related data present several technical and organizational challenges. Key issues include the low permeability of coal seams, the lack of systematic data on geological structure and tectonic features, and insufficient information on reservoir pressure and gas saturation parameters.

To achieve efficient and stable methane production, comprehensive studies are recommended to refine the key characteristics of the coal seams, including their permeability, gas content, and depth correlation. Optimal development methods are recognized to include directional drilling and hydraulic fracturing, applied according to the properties of the target areas.

The success of projects in the Karaganda Basin will depend on the implementation of modern exploration techniques, the adaptation of international experience, and the development of specialized technical solutions tailored to local geological conditions.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: The research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan within the framework of program-targeted financing for the implementation of the scientific, scientific and technical program of the IRN No. BR24993009

REFERENCES

- Dou, X. (2025). Simulation Research On Space-ranging Vector Guidance System Of Tubular Magnetic Sources. *Journal of Applied Science and Engineering*, 28(6), 1287–1297. [https://doi.org/10.6180/jase.202506_28\(6\).0011](https://doi.org/10.6180/jase.202506_28(6).0011)
- Drizhd, N.A., Alexandrov, A.Yu., Balniyazova, G., Zhunis, G.M. (2020). Результаты освоения опытных скважин на участке Шерубай-Нуринского месторождения Карагандинского угольного бассейна. Научно-технический, промышленный и экономический журнал «Уголь», №06, 36-40. // Drizhd, N.A., Alexandrov, A.Yu., Balniyazova, G., Zhunis, G.M. Rezultaty osvoeniya opytnykh skvazhin na uchastke Sherubay-Nurinskogo mestorozhdeniya Karagandinskogo ugol'nogo basseina. [Results of development of pilot



- wells at the Sherubainurinsky site of the Karaganda coal basin]. Moscow: Publishing House of Rolix LLC. (In Russ.)
- Xu, F., Zhang, W., Li, Z., Zhang, L., Zhang, J., How, W., Change, Q., (...), Zhao, G. (2023). Coalbed methane reservoir description and enhanced recovery technologies in Bad block, Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 43(1), 96-112. <https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2023.01.010>
- Fang, H., Li, A., Sang, S., Gu, C., Yang, J., Li, L., Liu, H., (...), Huang, Y. (2023). Numerical analysis of permeability rebound and recovery evolution with THEM multi-physical field models during CBM extraction in crushed soft coal with low permeability and its indicative significance to CO₂ geological sequestration. *Energy, Part A*, 262, 125395. <https://www.journals.elsevier.com/energy/doi:10.1016/j.energy.2022.125395>
- Drizhd, N.A., Mussin, R.A., Alexandrov, A.Yu. (2019). Improving the Technology of Hydraulic Impact Based on Accounting Previously Treated Wells. International science and technology conference "Earth science", IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 272, 022031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022031>
- India Coal Mine Methane Market Study. (2019, February 22). <https://www.globalmethane.org/documents/India>
- Yang, W., Wang, L., Yang, K., Tian, C., Pan, R. (2023). Molecular insights on influence of CO₂ on CH₄ adsorption and diffusion behaviour in coal under ultrasonic excitation. *Fuel*, 355, 129519. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129519>
- Li, W., Yang, K., Deng, D., Zhao, C., Yang, S., Cheng, Y., Lu, S. (2023). A lattice Boltzmann model for simulating gas transport in coal nanopores considering surface adsorption and diffusion effects. *Fuel*, 340, 127507. <http://www.journals.elsevier.com/fuel/doi:10.1016/j.fuel.2023.127507>
- Wang, Z., Fu, X., Hao, M., Li, G., Pan, J., Niu, Q., Zhou, H. (2021). Experimental insights into the adsorption-desorption of CH₄/N₂ and induced strain for medium-rank coals. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 204, 108705. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09204105/81doi:10.1016/j.petrol.2021.108705>
- Reddy, B.R., Ashok, I., Vinu, R. (2020). Preparation of carbon nanostructures from medium and high ash Indian coals via microwave-assisted pyrolysis. *Advanced Powder Technology*, 31(3), 1229-1240. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.12.017>
- Zhang, X., Cai, Y., Zhou, T., Cheng, J., Zhao, G., Zhang, L., Kang, J. (2023). Thermodynamic characteristics of methane adsorption on coals from China with selected metamorphism degrees: Considering the influence of temperature, moisture content, and in situ modification. *Fuel*, 342, 127771. <http://www.journals.elsevier.com/fuel/doi:10.1016/j.fuel.2023.127771>
- Rabatuly, M., Musin, R.A., Demin, V.F., Usupaev, Sh.E., Kenetaeva, A.A. Improving the efficiency of methane extraction from coal seams. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*, 324
- Kang, Y., Yan, X., Huangfu, Y., Zhang, B., Deng, Z. (2023). Concept and main characteristics of deep oversaturated coalbed methane reservoir. *Shiyou Xuebao/Acta Petrolei Sinica*, 44(11), 1781-1790. <https://doi.org/10.7623/syxb202311003>
- Jianguang, W. Technology Process of China's CBM Exploration and Development. <https://usea.org/sites/default/files/event.29.08.2019>
- Zhou, W., Wang, H., Zhang, Z., Chen, H., Liu, X. (2019). Molecular simulation of CO₂/CH₄/H₂O competitive adsorption and diffusion in brown coal. *RSC Advances*, 9(6), 3004-3011. <http://pubs.rsc.org/en/journals/journal/ra/doi:10.1039/c8ra10243k>
- Zhou, D., Chen, G., Chen, Z., Liu, Z. (2022). Exploration and development progress, key evaluation parameters and prospect of deep CBM in China. *Natural Gas Industry*, 42(6), 43-51. <https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2022.06.004>



Xu, F., Yan, X., Lin, Z., Li, S., Xiong, X., Yan, D., Wang, H., (...), Mei, Y. (2022). Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China. Meitandizhi Yu Kantan/Coal Geology and Exploration, 50(3), 1-14. <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.12.0736>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Мусин Равиль Альтавович – PhD, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан
Мусин Равиль Альтавович – PhD, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г.Караганда, Казахстан
Musin Ravil Altavovich – PhD, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
e-mail: r.a.mussin@mail.ru ,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1206-6889>,



Рабатұлы Мұхаммедрахым – PhD, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан
Рабатұлы Мұхаммедрахым – PhD, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г.Караганда, Казахстан
Rabatuly Mukhamedrahym – PhD, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan
e-mail: m.rabatuly@ktu.edu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7558-128X>



Замалиев Наиль Мансурович – PhD, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан
Замалиев Наиль Мансурович – PhD, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан
Zamaliev Nail Mansurovich – PhD, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
e-mail: nailzamaliev@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0628-2654>



Ахматнуров Денис Рамильевич – PhD, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., Қазақстан
Ахматнуров Денис Рамильевич – PhD, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Казахстан
Akhmatnurov Denis Ramilevich – PhD, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
e-mail: d_akhmatnurov@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-3669>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_91
FTAXP 55.47.29

ЖЕТЕКТЕРДІ ҒАРЫШТЫҚ РОБОТОТЕХНИКА МАНИПУЛЯТОРЛАРЫН ӘЗІРЛЕУДЕ ҚОЛДАНУ

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИВОДОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МАНИПУЛЯТОРОВ КОСМИЧЕСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

APPLICATION OF ACTUATORS IN THE DEVELOPMENT OF SPACE ROBOTICS MANIPULATORS

Ф.Б. Ораз ^{1*}, А.Н. Оразалиева ¹, К.С. Иванов ¹, К.А. Алипбаев ¹

¹«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚ,
Алматы қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Ораз Фариза Байдосқызы, e-mail: f.oraz@au.es.kz

Түйін сөздер:

кинематикалық схема,
геологиялық жағдайларда
жұмыс, геологиялық
жұмыстар, манипулятор,
робототехника.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада кинематикалық схеманы таңдау орындалатын жұмысқа және манипулятордың жұмыс аймағының түріне сәйкес жүргізілуі қажет жетекке негізделген манипуляторды әзірлеу мәселелері қарастырылды. Манипулятордың маневрлік қабілетін қамтамасыз ету кинематикалық схеманы құрудағы негізгі міндет болып табылады. Осы мақсатта таңдалған схема негізінде кинематикалық және күштік талдау жүргізілді.

Арнайы мақсаттағы манипуляторлардың қарастырылып отырған түрі жоғары жылдамдыққа ие емес, өйткені құрылғыны пайдалану процесі үлкен жылдамдықты қажет етпейді. Сондықтан жеделдету және динамикалық жүктемелер аз болады. Кинематикалық талдау нәтижесінде алынған мәліметтер екінші тарауда 2-кестеде келтірілген.

Ротация модулінің күштік талдауында барлық модульдердің өзара әрекеттесуі нәтижесінде туындайтын инерция күштері анықталды. Манипулятордың әртүрлі модульдерден тұратын құрылымы олардың инерциялық параметрлері мен кедергі күштерін ескере отырып талданды.

Төртінші тарауда екі бөліктен тұратын қармау құрылғысының күштік есебі қарастырылды. Бірінші кезеңде манипуляция объектісін ұстап тұру үшін қармау губкалары жасаған күштік сәт анықталды. Екінші кезеңде қармау модулінің шығыс жүктемесі есептелді, ол келесі модульдің кіріс жүктемесі болып табылады. Бұл жағдайда айналу модулі зерттелді.

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері манипуляторды жобалау және жетілдіру барысында қолдануға болатын маңызды техникалық көрсеткіштерді ұсынады. Бұл зерттеу болашақта ғарыштық манипуляторлардың дамуын жетілдіруге және олардың жұмыс тиімділігін арттыруға ықпал етеді. Сонымен қатар, алынған нәтижелер өндірістік роботтарды жобалау кезінде де қолданылуы мүмкін. Бұл зерттеу робототехниканың болашақ дамуында жаңа әдістерді енгізуге негіз бола алады. Оның нәтижелері робототехникалық жүйелердің тиімділігін арттыруда үлкен маңызға ие.



Ключевые слова:

кинематическая схема,
работа в геологических
условиях, геологические
работы, манипулятор,
робототехника.

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрены вопросы разработки манипулятора на основе привода, выбор кинематической схемы которого должен производиться в соответствии с выполняемой работой и типом рабочей зоны манипулятора. Обеспечение маневренности манипулятора является основной задачей при построении кинематической схемы. С этой целью был проведен кинематический и силовой анализ на основе выбранной схемы.

Рассматриваемый тип манипуляторов специального назначения не обладает высокой скоростью, так как процесс эксплуатации устройства не требует больших скоростей. Следовательно, ускорение и динамические нагрузки будут меньше. Данные, полученные в результате кинематического анализа, представлены во второй главе в табл. 2.

Силовой анализ модуля ротации выявил силы инерции, возникающие в результате взаимодействия всех модулей. Структура манипулятора, состоящая из различных модулей, анализировалась с учетом их инерционных параметров и сил сопротивления.

В четвертой главе рассмотрен силовой расчет устройства захвата, состоящего из двух частей. На первом этапе определялся момент силы, создаваемый захватными губками для удержания объекта манипуляции. На втором этапе рассчитывалась выходная нагрузка модуля захвата, которая является входной нагрузкой следующего модуля. В этом случае был изучен модуль вращения.

В целом, результаты исследования предоставляют важные технические показатели, которые можно использовать в процессе проектирования и совершенствования манипулятора. Это исследование будет способствовать совершенствованию разработки космических манипуляторов в будущем и повышению эффективности их работы. Кроме того, полученные результаты также могут быть использованы при проектировании промышленных роботов. Это исследование может стать основой для внедрения новых методов в будущее развитие робототехники. Его результаты имеют большое значение для повышения эффективности робототехнических систем.

keywords:

kinematic scheme, working
in geological conditions,
geological work,
manipulator, robotics

ABSTRACT

This article discusses the development of a manipulator based on a drive, the kinematic scheme of which should be selected in accordance with the work performed and the type of working area of the manipulator. Ensuring the maneuverability of the manipulator is the main task in constructing the kinematic scheme. For this purpose, kinematic and force analysis was carried out based on the chosen scheme.

This type of special-purpose manipulators does not have high speed, since the operation of the device does not require high speeds. Therefore, acceleration and dynamic loads will be less. The data obtained as a result of kinematic analysis are presented in the second chapter in table 2.

The force analysis of the rotation module revealed inertia forces resulting from the interaction of all modules. The structure of the



manipulator, consisting of various modules, was analyzed taking into account their inertial parameters and resistance forces.

In the fourth chapter, the force calculation of the capture device, consisting of two parts, is considered. At the first stage, the moment of force created by the gripping jaws to hold the object of manipulation was determined. At the second stage, the output load of the capture module was calculated, which is the input load of the next module. In this case, the rotation module was studied.

In general, the results of the study provide important technical indicators that can be used in the process of designing and improving the manipulator. This research will contribute to improving the development of space manipulators in the future and increasing their efficiency. In addition, the results obtained can also be used in the design of industrial robots. This research can become the basis for the introduction of new methods in the future development of robotics. His results are of great importance for improving the efficiency of robotic systems.

КІРІСПЕ

Ғарышта қолдануға арналған роботталған жүйелерді дамыту қазіргі ғылым мен техниканың ажырамас бөлігі болып табылады. Жыл сайын ғарыштың экстремалды жағдайларында тапсырмаларды орындай алатын технологияларға қойылатын талаптар күшейіп келеді. Бұл адам өміріне қауіптілік деңгейінің жоғары болуына байланысты: радиация, микрогравитация, экстремалды температуралар және вакуум. Осыған байланысты ашық ғарышта және планеталардың бетінде тиімді жұмыс істей алатын робототехникалық кешендерді құруға ерекше назар аударылады.

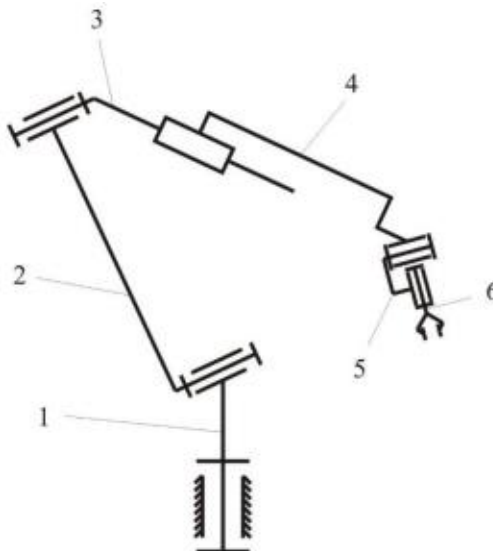
Ғарыштық роботтар спутниктерді орбитада қызмет көрсету және жөндеу, ғарыш станциялары үшін модульдер мен құрылымдарды жинау, сондай-ақ қолданыстағы спутниктер мен ғарыш аппараттары үшін елеулі қауіп төндіретін ғарыш қоқыстарын жою сияқты көптеген міндеттерді шешуде маңызды рөл атқарады. Бұл роботтар әртүрлі манипуляторлармен, сенсорлармен және арнайы операцияларды орындауға арналған құралдармен жабдықталуы мүмкін, бұл олардың функционалдық мүмкіндіктерін айтарлықтай кеңейтеді. (Louback, Machado, Bruck, Kollmeyer & Emadi, 2022; James, Thomas, 2021). Сонымен қатар, роботталған жүйелер басқа планеталар мен астероидтарда ғылыми зерттеулер жүргізу үшін қажет. Олар геологиялық талдау жүргізуге, топырақ үлгілерін жинауға, сондай-ақ алынған деректерді Жерге жіберуге қабілетті, бұл ғарыштық ғылым мен технологияның дамуына ықпал етеді. Осылайша, робототехника ғарышты игерудің және адам өз бетінше шеше алмайтын күрделі тапсырмаларды орындаудың ең маңызды құралы болып табылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Кинематикалық схеманы таңдау

Манипулятордың кинематикалық сұлбасын таңдағанда, манипулятордың жұмыс аймағының түрін ескеру қажет (Ivanov, Tulekenova, Seccarelli, 2021). Алайда, арнайы мақсаттағы робот-манипулятордың нақты жұмыс аймағы болмайды. Кинематикалық сұлбаны құрастырудағы басты міндет — манипулятордың маневрлік қабілетін қамтамасыз ету. Сондықтан бұл мәселені шешу толығымен әзірлеушінің құзыретіне жатады.

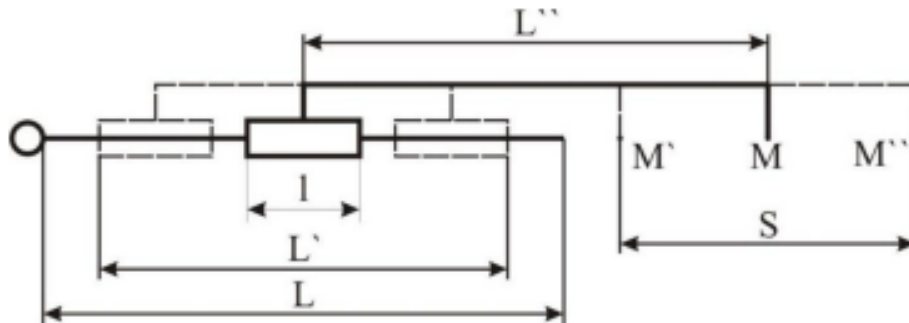
Әзірленген роботтың кинематикалық сұлбасы 1-суретте көрсетілген және ол бұрылу, иықты еңкейту, білек еңкейту, жазу, білекті еңкейту және айналу модульдерінен тұрады.



1-сурет. Робот манипуляторының кинематикалық схемасы

Ескерту – (Ivanov & Tulegenova, 2021) негізінде құрастырылған.

Кинематикалық сұлбаны таңдағаннан кейін, алынған орын ауыстыруларға сәйкес буын ұзындықтары есептеледі. Айналу модульдері буын ұзындықтарын есептеуді қажет етпейтіндіктен, бұл сұлбада тек шығу модулінің өлшемдерін анықтау қажет. Бұл үшін кеңейту модулін жеке қарастыру керек. Қарастырылып отырған модульдің сұлбасы 2-суретте көрсетілген.(Ivanov & Tulegenova, 2021.)



2-сурет. Кеңейту модулінің схемасы

Ескерту – (Корескі, 2021) негізінде құрастырылған

Өзек (стержень) ұзындығы қажетті қозғалыстың 0,1-і ретінде анықталады.

$$l = 0,1S = 0,1 \cdot 0,2 = 0,02 \text{ м}, \quad (1)$$

2-суретте көрсетілген L , L' және L'' ұзындықтары бағыттаушының толық өлшемін, бағыттаушының ұзындығын, жылжыма ұзындығын және модульдің қозғалмалы бөлігінің қосылу өлшемін анықтайды. Бұл өлшемдер 2, 3, 4 формулалармен анықталады (Корескі, 2021, Trubachev, 2024)

$$L' = 1,1S = 1,1 \cdot 0,2 = 0,22 \text{ м}. \quad (2)$$

$$L = 1,2S = 1,2 \times 0,2 = 0,24 \text{ м}. \quad (3)$$

$$L'' = 1,15S = 1,15 \times 0,2 = 0,23 \text{ м}. \quad (4)$$



Есептелген байланыс ұзындықтарынан басқа, берілген байланыстардың ұзындықтарын анықтау қажет. Бұл байланыстар иық модулі, қол модульдері және айналу модульдерін қамтиды. Кейбір жағдайларда айналу модулінің өлшемдерін ескеру қажет. Кесте 1-де кейінгі есептеулерге қажетті байланыс ұзындықтары көрсетілген.

Кинематикалық талдау

Манипулятор модульдерінің кинематикасында мынадай ұғымдар пайдаланылады:

- модульдің жүруі;
- жауап беру уақыты;
- үдеу уақыты;
- тежелу уақыты;
- әрекет жылдамдығы.

1-кесте. Манипулятор буындарының ұзындығы

Атауы	Ұзындығы, м
Иық модулі	0,6
Білек модулі (жазылу модулін қоса алғанда)	0,6
Білектің еңкею модулі	0,07
Айналу модулі	0,03
<i>Ескерту – автормен құрастырылған</i>	

Кинематика есептерін практикалық есептеуде модульдің жүріс кезіндегі жауап беру уақыты үш фазадан тұрады:

- үдеу;
- тұрақты қозғалыс;
- тежелу.

$$T = t_a + t_{st} + t_d, \quad (5)$$

мұндағы t_a – үдеу уақыты,

t_{st} – тұрақты қозғалыс уақыты,

t_d – тежелу уақыты ($t_p > t_r$) (Ivanov, Ceccarelli, Yestemessova, Nurgizat & Balbayev, 2019).

Модульдің жұмыс уақыты және оның фазалары жетектің түріне, инерциялық параметрлерге, кедергі күштеріне және тежегіш құрылғысына байланысты. 3-суретте көрсетілген жылдамдық графигінде үдеу және тежелу кезінде жылдамдықтың сызықтық өзгеруі болжанады, ал тұрақты қозғалыс фазасында жылдамдық тұрақты. Жетек түріне байланысты үдеу және тежелу уақытының коэффициенттері таңдалады. Электромеханикалық жетек үшін $k_a=0,2$ және $k_d=0,1$.

$$k_a = \frac{t_a}{T}, \quad (6)$$

$$k_d = \frac{t_d}{T} \quad (7)$$

Модульдің жауап беру жылдамдығын практикалық есептеулер кезінде үдеу және тежелу үшін уақытты ескере отырып, 8 және 9 формулалар пайдаланылады:

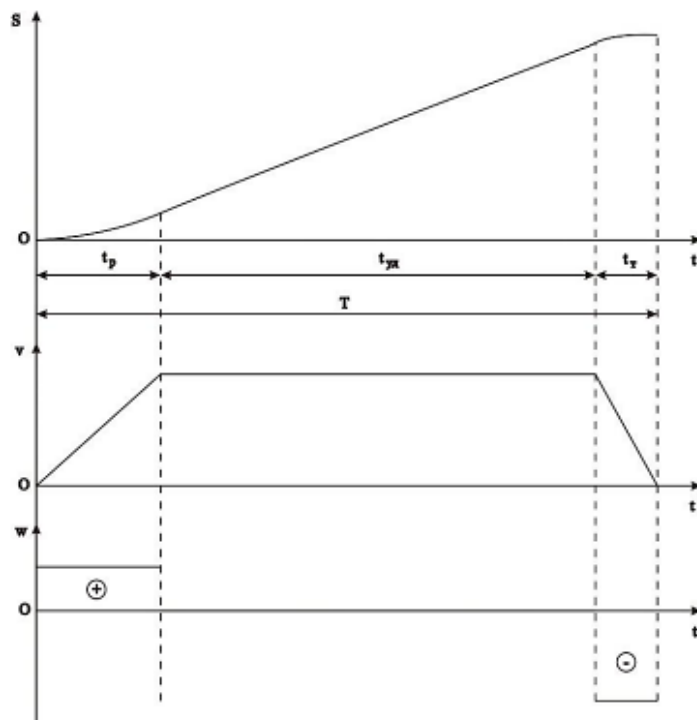
$$v = \frac{S}{T} \cdot \frac{1}{1-0.5(k_a+k_d)}, \quad (8)$$

$$\omega = \frac{\varphi}{T} \cdot \frac{1}{1-0.5(k_a+k_d)}, \quad (9)$$

мұндағы S – модульдің жүрісі;

T – модульдің жұмыс уақыты;

φ – айналу бұрышы.



3-сурет. Жылдамдық графигі

Ескерту – автормен құрастырылған

Үдеуді есептеу үшін үдеу және тежелу уақыттарының формулалары қолданылады, алайда, есептеу үшін тұрақты қозғалыс кезінде үдеу нөлге тең.

$$w_p = \frac{s}{T^2} \cdot \frac{1}{k_p[1-0.5(k_p+k_m)]'} \quad (10)$$

$$w_m = \frac{s}{T^2} \cdot \frac{1}{k_m[1-0.5(k_p+k_m)]'} \quad (11)$$

Сондай-ақ, арнайы мақсаттағы роботталған манипуляторлардың көпшілігі жоғары жылдамдыққа ие емес екенін атап өткен жөн, өйткені құрылғы қолданылатын процесс үлкен жылдамдықтарды қажет етпейді, сондықтан үдеулер мен динамикалық жүктемелер аз болады. (Ivanov 2019; Иванов, 2019)

Жүргізілген есептеулер нәтижесінде алынған деректер 2-кестеде жинақталған. Бұл кестеде үдеу және тежелу кезінде ең үлкен үдеу мәндері көрсетілген.

2-кесте. Жылдамдық және үдеу есептеулерінің нәтижелері

Атауы	Жүріс, рад/м	Уақыт, с	Жылдамдық, рад/с, м/с	Үдеу, рад/с ² , м/с ²
Айналу	2π	50	0,148	0,03
Номинациялар	0,2	40	0,006	0,002
Білек	3,58	72	0,059	0,008
Иық	2,8	64	0,052	0,008

Ескерту – автормен құрастырылған

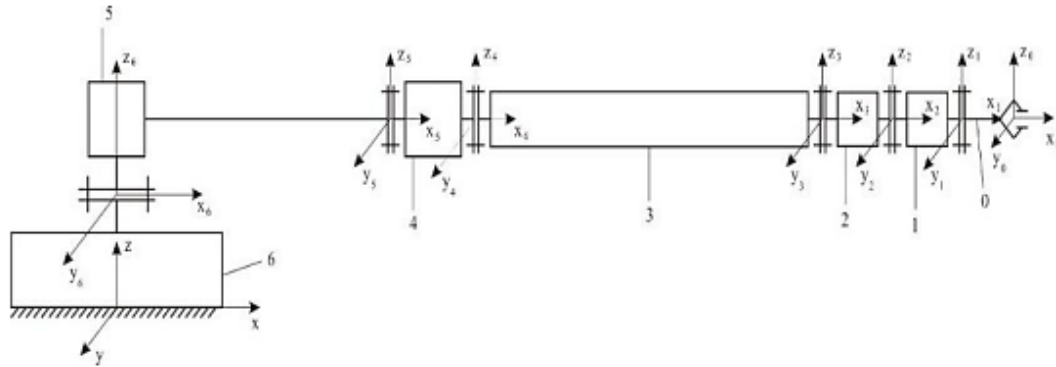
Манипулятордың күштік талдауы

Ашық кинематикалық тізбегі бар манипулятордың күштік талдауы кинематикалық жұптағы күштерді анықтайды, олар манипулятордың жетектеріндегі күштерге сәйкес келеді. Алынған деректер кеңейту модулі үшін электр қозғалтқышты есептеу және таңдау



үшін пайдаланылады. Жеке модульдерден тұратын құрылым ретінде манипулятордың күшін есептеу кезінде, олардың инерциялық параметрлері мен кедергі күштерін ескере отырып, модульдердің құрамдас бөліктеріне әсер ететін күштерді анықтау қажет (Kim, Kim, Choi, 2020; Louback, Machado, Bruck, Kollmeyer & Emadi, 2022)

Бастапқы міндет – модульдерден тұратын манипулятордың схемасын анықтау. Бұл манипулятор схемасы 4-суретте көрсетілген.



4-сурет. Манипулятордың модульдік схемасы

Ескерту – автормен құрастырылған

4-суретте келесі модульдер нөмірлермен белгіленген:

- 0 – қармау;
- 1 – айналу модулі;
- 2 – білектің еңкею модулі;
- 3 – кеңейту модулі;
- 4 – білек еңкею модулі;
- 5 – иық еңкею модулі;
- 6 – бұрылу модулі.

Күштік талдау әрбір модуль қармағынан бастап соңғы модульге дейін қарастырады. Есептеу үшін модульдің бастапқы деректері модульдің кіріс жүктемесі және модульдің қозғалмалы және қозғалмайтын бөлігіне инерциялық жүктемелерді қамтиды.

Кіріс жүктеме P векторы, ол негізгі момент M және негізгі күш векторын R қамтиды:

$$\bar{P} = [P_x \ P_y \ P_z \ P_\alpha P_\beta P_\gamma]^T, \quad (12)$$

мұндағы P_x, P_y, P_z - сәйкесінше x, y, z осьтеріндегі R векторының проекциялары;

$P_\alpha, P_\beta, P_\gamma$ сәйкесінше x, y, z осьтеріндегі негізгі момент M проекциялары.

Қозғалмалы және қозғалмайтын бөліктерге инерциялық жүктемелер векторлары кіріс жүктемесінің векторына сәйкес.

$$\bar{H}^n = [H_x^n H_y^n H_z^n H_\alpha^n H_\beta^n H_\gamma^n]^T. \quad (13)$$

$$\bar{H}^h = [H_x^h H_y^h H_z^h H_\alpha^h H_\beta^h H_\gamma^h]^T. \quad (14)$$

Шығыс жүктеме векторы келесідей түрге ие:

$$\bar{P}_{i+1} = \bar{P}_i^p + \bar{P}_i^n + \bar{P}_i^h, \quad (15)$$

мұндағы $\bar{P}_i^p$ – модульдің кірісіндегі жүктемеден шығатын вектор,

$\bar{P}_i^n$ – модульдің қозғалмалы бөлігінің инерциялық күштерінен шығатын вектор,

$\bar{P}_i^h$ – модульдің кірісіндегі жүктемеден шығатын вектор.

Жоғарыда сипатталған үш вектор түрлендіру матрицасына кіріс жүктемелерінің көбейтіндісі болып табылады, ол мынадай түрге ие:

$$B_{i(i+1)} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_i & -y_i & 1 & 0 & 0 \\ -z_i & 0 & x_i & 0 & 1 & 0 \\ y_i & -x_i & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Осылайша, 15 және 16 формулаларын салыстыра отырып, біз жүктеменің шығыс векторының толық көрінісін аламыз $\bar{P}_{i+1}$:

$$\bar{P}_{i+1} = B_{i(i+1)}^P \bar{P}_i + B_{i(i+1)}^n \bar{H}_i^n + B_{i(i+1)}^H \bar{H}_i^H. \quad (17)$$

Қармау күшін талдау

Қармаудың күштік есебі екі бөліктен тұрады. Бірінші кезеңде манипуляция объектісін ұстап тұру үшін қармау тубкаларымен жасалатын сәт анықталады. Екінші кезеңде қармау модулінен шығу жүктемесі есептеледі, ол сондай-ақ келесі модулдің, бұл жағдайда айналу модулінің кіру жүктемесі болып табылады.

Объектіні қармау үшін қармау құрылғысының тістері жасайтын айналу моменті M_3 , барлық модульдердің жұмысы нәтижесінде пайда болатын объектінің инерциялық күштерін жеңуге тиіс. 5-суреттен көрініп тұрғандай, M_3 моменті x және z осьтеріне әсер ететін күштерді жеңуге тиіс. (Machado, Kollmeyer, Barroso, Emadi, 2021)

Сәйкесінше, M_3 моменті x және z осьтері бойымен әсер ететін күштерді жеңуге арналған M_{3x} және M_{3z} екі моменттен тұрады:

$$M_3 = M_{3x} + M_{3z}. \quad (18)$$

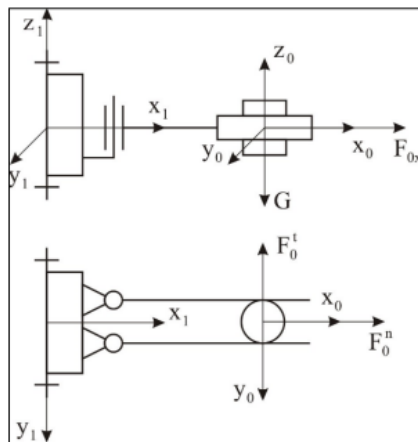
M_{3x} моменті келесі формула бойынша есептеледі:

$$M_{3x} = \frac{(F_0^n + F_{0x})l}{f}, \quad (19)$$

Момент басқарылатын объектінің ауырлық күшін теңестіреді және келесі формула бойынша есептеледі:

$$M_{3z} = \frac{Gl}{f} = \frac{mgl}{f}, \quad (20)$$

мұндағы G – басқарылатын объектінің ауырлық күші, m – объектінің массасы, g – еркін түсу үдеуі.



5-сурет. Қармау құрылғысының схемалық диаграммасы

Ескерту – автормен құрастырылған



мұндағы F_0^n – объектінің инерциялық күші, ол модульдердің орталықтан тепкіш үдеулері нәтижесінде пайда болады;

F_{0x} – кеңейту модулінің жұмысы нәтижесінде пайда болатын инерциялық күш;

l – қармау құрылғысының ұзындығы;

f – қысу еріншесі материалының үйкелу коэффициенті. (Lin, Feng, Mo & Li, 2019.)

Центрден тепкіш инерция күші F_0^n келесі формуламен анықталады:

$$F_0^n = m(x_{06}\omega_6^2 + x_{05}\omega_5^2 + x_{04}\omega_4^2 + x_{02}\omega_2^2). \quad (21)$$

Ұзарту модуліне әсер ететін инерциялық күш келесі формула бойынша есептеледі:

$$F_{0x} = mw_3. \quad (22)$$

18-22 формулаларына тиісті мәндерді қойып, біз объектінің қармау құрылғысының тістерінің айналдыру моментін алдық $M_3=73,66$ Н.

Қармау модулінің шығатын жүктеме векторы келесі формула бойынша анықталады:

$$\bar{P}_0 = \begin{bmatrix} P_{0x} \\ P_{0y} \\ P_{0z} \\ P_{0\alpha} \\ P_{0\beta} \\ P_{0\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m(x_{06}\omega_6^2 + x_{05}\omega_5^2 + x_{04}\omega_4^2 + w_3 + x_{02}\omega_2^2) \\ mx_{06}\varepsilon_6 \\ m(x_{05}\varepsilon_5 + x_{04}\varepsilon_4 + x_{02}\varepsilon_2) + G \\ \frac{2mR^2\varepsilon_1}{5} \\ Gx_{05} + mx_{05}^2\varepsilon_5 + mx_{04}^2\varepsilon_4 + mx_{02}^2\varepsilon_2 \\ mx_{06}^2mx_{04}^2\varepsilon_6 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Тиісті мәндерді қойып, келесі нәтижеге жеттік:

$$\bar{P}_0 = [0,0754 \ 0,0455 \ 49,1261 \ 0,0004 \ 63,7735 \ 0,0592]^T.$$

Бастапқы есептеулерде қармау құрылғысы айналу модуліне бекітілген деп болжанады, сондықтан $\bar{P}_0$ қармау модулінің шығатын жүктеме векторы $\bar{P}_1$ келесі модульдің кіріс жүктеме векторына тең, яғни, $\bar{P}_1 = \bar{P}_2$.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Манипулятор модульдерінің күштік талдауы

Айналу модулінің күштік талдауында барлық модульдердің жұмысы нәтижесінде пайда болатын оның қозғалмалы және қозғалмайтын бөліктерінің инерция күштері анықталады. Қозғалмалы бөліктің инерция күштерінен туындаған жүктеме келесі түрде болады (Mantriota, Reina, 2021; Alipbayev, Ivanov, Sultan & Komekbayev, 2024)

$$\bar{H}_1^n = [0,0059 \ 0,0036 \ 0,0065 \ 0,00000 \ 0,007 \ 0,0015]^T$$

$$\bar{H}_1^n = \begin{bmatrix} H_{1x}^n \\ H_{1y}^n \\ H_{1z}^n \\ H_{1\alpha}^n \\ H_{1\beta}^n \\ H_{1\gamma}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1^n(x_{16}\omega_6^2 + x_{15}\omega_5^2 + x_{14}\omega_4^2 + w_3 + x_{12}\omega_2^2) \\ m_1^n x_{16}\varepsilon_6 \\ m_1^n(x_{15}\varepsilon_5 + x_{14}\varepsilon_4 + x_{12}\varepsilon_2) \\ \frac{2m_1^n R_1^n \varepsilon_1}{5} \\ m_1^n(x_{15}^2\varepsilon_5 + x_{14}^2\varepsilon_4 + x_{12}^2\varepsilon_2) \\ \frac{m_1^n R_{06}^2 \varepsilon_6}{3} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

(16) формулаға сәйкес түрлендіру матрицасы келесі түрде болады:

$$B_{12}^n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.03 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Кіріс жүктеме векторы үшін түрлендіру матрицасы да осындай болады $B_{12}^p = B_{12}^n$.

Қозғалмайтын бөлік білектің еңкею модулімен байланысты болғандықтан түрлендіру матрицасы B_{12}^n бірлік матрица болып табылады. Жоғарыда алынған мәндерді 17 формулаға қойып, келесі нәтижеге жеттік:

$$\bar{P}_2 = B_{12}^p \bar{P}_1 + B_{12}^n \bar{H}_1^H + B_{12}^H \bar{H}_1^H = |0,0914 \ 0,0562 \ 49,1451 \ 0,0004 \ 65,2677 \ 0,0622|^T.$$

25 формулаға тиісті мәндерді қойып, келесі нәтижені алдық:

$$\bar{H}_1^H = |0,0101 \ 0,0071 \ 0,0125 \ 0 \ 0,0132 \ 0,003|^T.$$

Қозғалмайтын бөліктің инерция күшінен жүктеме былайша анықталады:

$$\bar{H}_1^n = \begin{bmatrix} H_{1x}^H \\ H_{1y}^H \\ H_{1z}^H \\ H_{1\alpha}^H \\ H_{1\beta}^H \\ H_{1\gamma}^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1^H(x_{16}\omega_6^2 + x_{15}\omega_5^2 + x_{14}\omega_4^2 + w_3 + x_{12}\omega_2^2) \\ m_1^H x_{16} \varepsilon_6 \\ m_1^H(x_{15}\varepsilon_5 + x_{14}\varepsilon_4 + x_{12}\varepsilon_2) \\ \frac{2m_1^H R_{11}^H \varepsilon_1}{5} \\ m_1^H(x_{15}^2 \varepsilon_5 + x_{14}^2 \varepsilon_4 + x_{12}^2 \varepsilon_2) \\ \frac{m_1^H R_{06}^2 \varepsilon_6}{3} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Келесі модульдердің қуатын талдау ұқсас болғандықтан, төменде әрбір модуль үшін есептік деректер ғана берілген.

$$\bar{H}_2^n = |0,0103 \ 0,0062 \ 0,0109 \ 0 \ 0,0115 \ 0,0026|^T,$$

$$\bar{H}_2^H = |0,0139 \ 0,0067 \ 0,0115 \ 0 \ 0,0115 \ 0,0027|^T,$$

$$\bar{P}_3 = |0,1156 \ 0,0691 \ 49,1675 \ 0 \ 0,0004 \ 68,7322 \ 0,0632|^T.$$

Ұзарту модулі:

$$\bar{H}_3^n = |0,0238 \ 0,0143 \ 0,0244 \ 0 \ 0,0245 \ 0,0057|^T,$$

$$\bar{H}_3^H = |0,0139 \ 0,0106 \ 0,0155 \ 0 \ 0,011 \ 0,003|^T,$$

$$\bar{P}_4 = |0,1533 \ 0,094 \ 49,2074 \ 0 \ 0,0004 \ 98,2828 \ 0,0276|^T.$$

Білек еңкею модулі:

$$\bar{H}_4^n = |0,0049 \ 0,0042 \ 0,0048 \ 0 \ 0,0028 \ 0,0008|^T,$$

$$\bar{H}_4^H = |0,0049 \ 0,0042 \ 0,0048 \ 0 \ 0,0028 \ 0,0008|^T,$$

$$\bar{P}_5 = |0,1631 \ 0,01024 \ 49,217 \ 0,0004 \ 127,8186 \ 0,5398|^T.$$

Иық еңкею модулі:

$$\bar{H}_5^n = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,0048 \ 0,0017|^T,$$

$$\bar{H}_4^H = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,0001|^T,$$

$$\bar{P}_6 = |0,1631 \ 0,1024 \ 49,217 \ 0,0004 \ 127,8234 \ 0,5416|^T.$$

Іінтіректің көлбеу модулінен шығу жүктемесі іінтіректің бұрылу модулі үшін жүктеме болып табылады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл мақалада келесі мәселелер қарастырылды:

1) Кинематикалық схеманы таңдау.

2) Кинематикалық талдау. Модульдің жауап беру уақыты және оның фазасы жетек типіне, инерциялық параметрлерге, кедергі күштеріне және тежеу құрылғысына



байланысты болады. Жетек түріне байланысты жылдамдық және тежеу уақытының коэффициенттері таңдалады. Электр механикалық жетек үшін $k_p = 0,2$ және $k_r = 0,1$ коэффициенттері.

3) Айналу модулінің күштік талдауы барлық модульдердің жұмысынан туындайтын оның жылжымалы және жылжымайтын бөліктерінің инерция күштерінен жүктемелерді анықтайды.

Ғылыми жаңашылдығы – манипулятордың модульдік құрылымын ескере отырып күштік модельдеудің интеграцияланған әдістемесін ұсыну, сондай-ақ әрбір модуль үшін кіріс-шығыс күштік векторлар мен түрлендіру матрицалары арқылы бірізді есептеулер жүргізу әдісі.

Зерттеудің практикалық маңызы – алынған нәтижелер ғарыштық ортада жұмыс істеуге арналған робототехникалық жүйелерді жобалауда, соның ішінде модульдік манипуляторларды басқару алгоритмдерін жетілдіруде, сондай-ақ өнеркәсіптік роботтарды бейімдеуде қолданылуы мүмкін.

Зерттеу шектеулері – зерттеу тек кинематикалық және күштік сипаттамалармен шектеліп, толық динамикалық модельдеу және басқару жүйесі симуляциясы қарастырылған жоқ. Сондай-ақ зертханалық немесе орбиталық сынақтар жүргізілмеген.

Болашақ зерттеу бағыттары ретінде келесі мәселелер ұсынылады:

- басқару алгоритмдерін динамикалық модельмен біріктіру және MATLAB/Simulink ортада модельдеу;

- қозғалыс дәлдігін арттыру үшін адаптивті басқару әдістерін енгізу;

- манипулятордың нақты ғарыштық ортада жұмыс істеуін сынақтан өткізуге арналған прототип жасау.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор(лар) мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржылық қолдауымен дайындалды. (AP23489937 «Әскери көлік техникасының механикалық өзін-өзі реттейтін беріліс қорабын әзірлеу» гранты).

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Alipbayev, K., Ivanov, K., Sultan, A., & Komekbayev, A. (2024). Research and design of an efficient adaptive drive with balancing friction coupling. *Istrazivanja i Projektovanja Za Privredu*, 22(2), 81–88. <https://doi.org/10.5937/jaes0-44991>
- Ivanov, K. (2019). Prospects of creation of mechanisms with two degree of freedom. In *Mechanisms and Machine Science: Advances in Mechanism and Machine Science* (pp. 937–946). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_93
- Ivanov, K. S., Ceccarelli, M., Yestemessova, G., Nurgizat, Y., & Balbayev, G. (2019). Design and characterization of a gearbox joint for manipulators. In *Mechanisms and Machine Science: Advances in Mechanism and Machine Science* (pp. 2261–2268). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_223
- Ivanov, K. S., Tulekenova, D. T., & Ceccarelli, M. (2021). An adaptive drive of spacecraft docking mechanism. In *Mechanisms and Machine Science: Mechanism Design for Robotics* (pp. 168–178). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75271-2_18
- Иванов, К. С., & Тулекенова, Д. Т. (2021). Адаптивный привод стыковочного механизма космического аппарата с фрикционной муфтой. *Вестник Алматинского Университета Энергетики и Связи*, (3), 48–55. https://doi.org/10.51775/1999-9801_2021_54_3_48 // Ivanov, K. S., & Tulekenova, D. T. (2021). *Adaptivnyi privod*



- stykovochnogo mekhanizma kosmicheskogo apparata s friktsionnoi muftoi [Adaptive drive of the spacecraft docking mechanism with a friction clutch]. Vestnik Almatinskogo Universiteta Energetiki i Svyazi, (3), 48–55. https://doi.org/10.51775/1999-9801_2021_54_3_48 (In Russ.).
- Swanke, J., & Jahns, T. M. (2021). Reliability analysis of a fault-tolerant integrated modular motor drive (IMMD) for an urban air mobility (UAM) aircraft using Markov chains. 2021 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). <https://doi.org/10.23919/EATS52162.2021.9704851>
- Kim, D.-H., Kim, J.-W., & Choi, S. B. (2020). Design and modeling of energy efficient dual clutch transmission with ball-ramp self-energizing mechanism. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69(3), 2525–2536. <https://doi.org/10.1109/tvt.2019.2963332>
- Kopecki, G. H. (2021). Aircraft control with the use of model reference adaptive control. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 93(9), 1395–1400. <https://doi.org/10.1108/AEAT-11-2020-0248>
- Lin, X., Feng, Q., Mo, L., & Li, H. (2019). Optimal adaptation equivalent factor of energy management strategy for plug-in CVT HEV. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 233(4), 877–889. <https://doi.org/10.1177/0954407018755612>
- Louback, E., Machado, F., Bruck, L., Kollmeyer, P. J., & Emadi, A. (2022, June 15). Real-time performance and driveability analysis of a clutchless multi-speed gearbox for battery electric vehicle applications. 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). <https://doi.org/10.1109/itec53557.2022.9814032>
- Machado, F., Kollmeyer, P., Barroso, D., & Emadi, A. (2021). Multi-speed gearboxes for battery electric vehicles: Current status and future trends. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2, 419–435. <https://doi.org/10.1109/ojvt.2021.3124411>
- Mantriota, G., & Reina, G. (2021). Dual-motor planetary transmission to improve efficiency in electric vehicles. Machines, 9(3), 58. <https://doi.org/10.3390/machines9030058>
- Trubachev, E. S. (2024). Software system SPDIAL. Bulletin of Kalashnikov ISTU, 27(2), 37–48. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2024-2-37-48>
- Иванов, К. С. (2019). Саморегулирующиеся механизмы. Монография. Алматы: Типография «ЦЭС». ISBN 978-601-7889-88-3. 28 с. // Ivanov, K. S. (2019). Samoreguliruyushchiesya mekhanizmy [Self-regulating mechanisms]. Almaty: Printing house “TsES”. ISBN 978-601-7889-88-3. 28 p. (In Russ.).

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Ораз Фариза Байдосқызы – Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті докторанты, кіші ғылыми қызметкер, Алматы, Қазақстан

Ораз Фариза Байдосқызы – докторант НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», младший научный сотрудник, Алматы, Казахстан

Oraz Fariza Baidoskyzy – Doctoral student of the Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, junior researcher, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: f.oraz@aes.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2483-1234>,



Оразалиева Арай Назарбайқызы – Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті докторанты, кіші ғылыми қызметкер, Алматы қ., Қазақстан

Оразалиева Арай Назарбайқызы – докторант НАО

«Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», младший научный сотрудник, г. Алматы, Казахстан,

Orazaliyeva Arai Nazarbaikyzy – Doctoral student of the Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, junior researcher, Almaty, Kazakhstan

e-mail: orazaliyevaaray@gmail.com,,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5480-4835>



Иванов Константин Самсонович – Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті профессоры, Алматы қ., Қазақстан

Иванов Константин Самсонович – профессор, НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан

Ivanov Konstantin Samsonovich – Professor of the Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan

e-mail: k.ivanov@aes.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3750-8081>



Алипбаев Куаныш Арингожаевич – Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті ғылым жөніндегі проректоры, Алматы қ., Қазақстан

Алипбаев Куаныш Арингожаевич – проректор по науке НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», PhD, г. Алматы, Казахстан

Alipbayev Kuanysh Aringozhaevich – vice-rector for science, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan

e-mail: k.alipbayev@aes.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1652-9470>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_104

МРНТИ 55.19.03

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТИ ПНЕВМОТРУБОПРОВОДОВ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД И APM WINMACHINE

ПНЕВМАТИКАЛЫҚ ҚҰБЫРЛАРДЫҢ БЕРІКТІГІН ЕСЕПТЕУДІ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ: АНАЛИТИКАЛЫҚ ӘДІС ЖӘНЕ APM WINMACHINE

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATIONS OF STRENGTH OF PNEUMATIC PIPELINES: ANALYTICAL METHOD AND APM WINMACHINE

А.М. Сакенова ¹, Д.Д. Басканбаева ², Н.С. Төлебаев ¹, Н.Н. Сакадиев ¹,
С.П. Сатыбалды ^{1,2*}

¹Институт Механики и Машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан

²НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева», г. Алматы, Казахстан

*Автор-корреспондент: Сатыбалды Сымбат Пердебайқызы, e-mail: symbat_satybaldy@mail.ru

Ключевые слова:

пневмотрубопровод,
прочность,
аналитический метод,
метод конечных
элементов, APM
WinMachine,

АННОТАЦИЯ

В статье представлен сравнительный анализ прочностных расчетов пневматических трубопроводов, выполненных с применением аналитического метода и численного моделирования в среде APM WinMachine. Рассмотрены теоретические основы прочностных расчетов цилиндрических оболочек, приведены аналитические формулы и их практическое применение. На основе численного моделирования определены напряжения и перемещения трубопровода при заданных нагрузках. Выполнен обзор научных публикаций, связанных с прочностным анализом пневмосистем, выделены ключевые методы расчёта и их особенности. Показано, что использование APM WinMachine позволяет получить более точные результаты за счёт учёта геометрии, граничных условий и локальных напряжений. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к расчету трубопроводов на прочность в данной области а также результаты используются на практике.

Түйінді сөздер:

пневматикалық құбыр,
беріктік, аналитикалық
әдіс, шекті элементтер
әдісі, APM WinMachine

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада APM WinMachine ортасында аналитикалық әдісті және сандық модельдеуді қолдана отырып жасалған пневматикалық құбырлардың беріктік есептеулерінің салыстырмалы талдауы келтірілген. Цилиндрлік қабықтардың беріктігін есептеудің теориялық негіздері қарастырылады, аналитикалық формулалар және олардың практикалық қолданылуы келтірілген. Сандық модельдеу негізінде берілген жүктемелер кезінде құбырдың кернеуі мен қозғалысы анықталады. Пневматикалық жүйелердің беріктігін талдаумен байланысты ғылыми жарияланымдарға шолу жасалды, есептеудің негізгі



әдістері мен олардың ерекшеліктері анықталды. APM WinMachine пайдалану геометрияны, шекаралық жағдайларды және жергілікті кернеулерді ескере отырып, дәлірек нәтижелерге қол жеткізуге мүмкіндік беретіні көрсетілген. Алынған нәтижелер осы саладағы беріктікке негізгі арналған құбырларды есептеуге кешенді тәсілдің қажеттілігін растайды және нәтижелер іс жүзінде де негізгі де қолданылады.

keywords:

pneumatic pipe, strength, analytical method, finite element method, APM WinMachine.

ABSTRACT

The article presents a comparative analysis of the strength calculations of pneumatic pipelines performed using the analytical method and numerical modeling in the APM WinMachine environment. The theoretical foundations of strength calculations of cylindrical shells are considered, analytical formulas and their practical application are given. The stresses and displacements of the pipeline under specified loads are determined based on numerical modeling. A review of scientific publications related to the strength analysis of pneumatic systems is performed, key calculation methods and their features are highlighted. It is shown that the use of APM WinMachine makes it possible to obtain more accurate results by taking into account geometry, boundary conditions and local stresses. The results obtained confirm the need for an integrated approach to the calculation of pipelines for strength in this area, and the results are also used in practice.

ВВЕДЕНИЕ

Пневматические трубопроводы находят широкое применение в машиностроении, пищевой, химической, горнодобывающей и других отраслях, обеспечивая транспортировку сжатого воздуха и газов к исполнительным механизмам, пневмоприводам и системам управления. Их надёжность и прочность во многом определяют устойчивость производственных процессов и безопасность эксплуатации оборудования. В связи с этим задача точного расчёта напряжённо-деформированного состояния таких элементов приобретает особую актуальность.

Методы расчёта прочности пневмотрубопроводов можно условно разделить на две группы. К первой относятся классические аналитические подходы, основанные на теории сопротивления материалов и механике сплошных сред. Они позволяют получить строгие зависимости, но требуют ряда упрощающих предположений – линейность деформаций, однородность материала, простая геометрия. Вторая группа представлена современными вычислительными методами, в частности методом конечных элементов (FEM), реализованным в специализированных программных комплексах. Одним из таких инструментов является APM WinMachine, позволяющий учитывать сложные геометрии, комбинированные нагрузки и нестационарные воздействия.

Цель настоящей статьи заключается в сравнительном анализе прочностных расчётов пневмотрубопроводов, выполненных аналитическим методом и с использованием APM WinMachine. Такой подход позволяет оценить точность и применимость каждого метода, определить границы их использования и сделать выводы о целесообразности численного моделирования при проектировании пневмосистем.

Многочисленные исследования выполнены зарубежными авторами в области численного моделирования и оптимизации трубопроводных систем. Так, Aydin и Şahin (2021) изучили резонансные явления в пневмосистемах и определили зависимости между частотами собственных колебаний и параметрами трубопровода. Choi и соавт. (2022) представили гибридный метод расчёта, сочетающий элементы аналитики и численного моделирования, позволяющий повысить точность прогноза нагруженности. Kumar и



соавт. (2020) провели сравнительный анализ прочностных характеристик тонкостенных труб с применением различных типов нагрузок, выявив ключевые факторы устойчивости при комбинированном нагружении.

Отдельное внимание уделяется использованию инженерного ПО. Aliyev и Zhanabayev (2023) представили отчёт по расчётам напряжений в трубопроводных системах в среде ANSYS, раскрывая практическое применение современных CAE-комплексов. Lee и Kim (2022) рассмотрели влияние тепловых нагрузок на надёжность пневмоэлементов, проводя симуляции в COMSOL. Перспективное направление описали Mehmood и соавт. (2021), применив методы машинного обучения к оптимизации проектирования трубопроводов.

Среди русскоязычных источников заметное место занимают исследования, посвящённые как теоретическим основам прочностного анализа, так и практическим применениям отечественных CAE-систем. Альханов (2020) представил обобщённый аналитический подход к расчёту тонкостенных цилиндров, являющихся базовым элементом пневмотрубопровода. Иванов (2021) исследовал сходимость конечно-элементных расчётов при моделировании труб и указал на необходимость корректного выбора сетки для точного прогноза.

Прочность соединений и чувствительность моделей также активно изучаются. Жангалиев (2023) оценил влияние параметров на результаты прочностного анализа в среде APM, выявив критические зоны в моделях. Садыкова (2021) рассмотрела возможности APM WinMachine для расчёта трубопроводов и подтвердила его применимость на практике. Корнеев (2021) классифицировал основные подходы к расчёту прочности труб и сравнил аналитические методы с численными. Жуматаева (2024) провела температурный анализ пневмотрубопроводов с учётом внешних тепловых воздействий.

Касымова (2025) исследовала устойчивость труб под давлением, включая локальные потери формы. Мордвинцев и соавт. (2021) рассмотрели воздействие волн и течений на подводные трубопроводы, что позволяет экстраполировать результаты и на воздушные системы, работающие в нестабильных средах. В казахстанском контексте Нурумбетов (2022) проанализировал фланцевые соединения, выявив возможные зоны концентрации напряжений при пневмонагрузках.

Анализ литературных источников показывает, что для прочностного анализа пневмотрубопроводов применяются как классические аналитические методы (Альханов, 2020; Корнеев, 2021), так и современные CAE-подходы (Mehmood et al., 2021; Жангалиев, 2023; Садыкова, 2021). Особый интерес представляют работы, в которых рассматриваются гибридные модели (Choi et al., 2022) и теплофизические эффекты (Жуматаева, 2024; Lee & Kim, 2022). Наибольшую точность расчёта можно достичь при комплексном учёте геометрии, материала, внешних факторов и корректной верификации модели. Это подчёркивает актуальность сравнительного анализа различных программных средств и методик расчёта прочности, включая APM WinMachine

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сравнения применяются два подхода: аналитический расчет по классическим формулам сопротивления материалов и численный расчет в среде APM WinMachine.

Для численного моделирования использовался программный комплекс APM WinMachine, включающий модуль прочностного анализа, основанный на МКЭ. В модели трубопровода были учтены:

- геометрические параметры труб (длина, диаметр, толщина стенки);
- свойства материала (модуль упругости, предел прочности);
- внутреннее давление как основная нагрузка;
- граничные условия – жёсткое закрепление на концах.



Для численного моделирования в APM WinMachine использовалась тетраэдрическая конечно-элементная сетка второго порядка. Средний размер конечного элемента составил около 3 мм. Всего в модели было создано около 18 200 элементов и 25 600 узлов. Проверка сходимости показала, что при уменьшении размера элемента на 30 % максимальное напряжение изменялось менее чем на 2 %, что подтверждает корректность выбранной дискретизации. Модель создавалась с использованием встроенного конструктора с последующей генерацией конечно-элементной сетки. В качестве результатов получены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, деформации и таблица максимальных значений по ключевым участкам.

В расчёте использовались свойства стали: модуль Юнга 200 000 МПа, предел текучести 235 МПа. На трубопровод действовало внутреннее давление 0,1 МПа. Масса всего трубопровода составляла 5,7379 кг; объем – 0,0007356 м³; коэффициент Пуассона – 0,3; плотность стали – 7800 кг/м³; предел прочности – 410 МПа; внутренний диаметр трубопровода – 100 мм, толщина стенки – 5 мм; внутреннее давление – 0,1 МПа; закрепление – по торцам камеры.

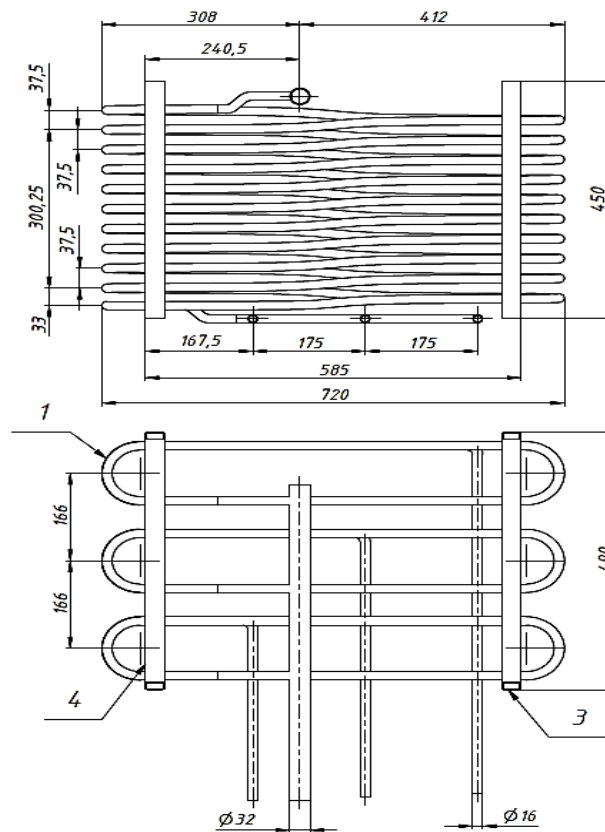


Рисунок 1. Трубопровод сублимационной сушилки

Примечание – составлено автором (Д.К. Смагулов 2025)

Аналитические расчёты прочности трубопровода

Расчет напряжений в тонкостенной цилиндрической оболочке при внутреннем давлении выполняется по классическим формулам сопротивления материалов.

Окружное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_{\theta} = \frac{p \cdot r}{t} . \quad (1)$$

Продольное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_l = \frac{p \cdot r}{2t}, \quad (2)$$

где: p – внутреннее давление, МПа;

r – внутренний радиус трубопровода, м;

t – толщина стенки, м.

Подставив значения $r = 0,05$ м, $t = 0,005$ м, получим:

$$\sigma_\theta = \frac{p \cdot r}{t} = \frac{0,1 \cdot 0,05}{0,005} = 1,0 \text{ МПа}, \quad (3)$$

$$\sigma_l = \frac{p \cdot r}{2t} = \frac{0,1 \cdot 0,05}{2 \cdot 0,005} = 0,5 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Оценка прочности:

Если предел текучести $\sigma_{тек} = 235$ МПа, то коэффициент запаса прочности по окружному напряжению

$$n = \frac{\sigma_{тек}}{\sigma_\theta} = \frac{235}{1,0} = 235. \quad (5)$$

Таким образом, аналитические расчеты показывают, что максимальное кольцевое напряжение составляет 1,0 МПа, что значительно ниже предела текучести стали (235 МПа).

Расчет в APM WinMachine.

Геометрическая модель трубопровода была создана в Autodesk Inventor и экспортирована в APM Studio для прочностного анализа.

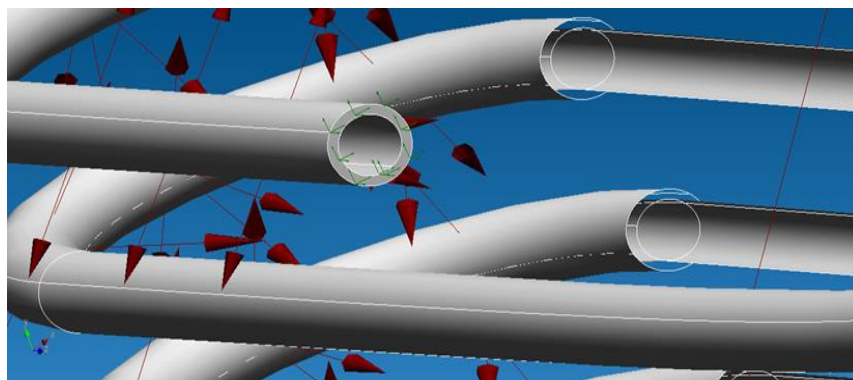


Рисунок 2. Распределение напряжений в конструкции трубопровода

Примечание – составлено авторами (Н.С.Төлебаев и А.М. Сакенова 2025)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Аналитические методы, как показано в работах, обеспечивают быстрое получение приближённых результатов и удобны на начальных стадиях проектирования. Однако они слабо адаптированы к сложной геометрии и комбинированным нагрузкам.

APM WinMachine демонстрирует хорошую сбалансированность между точностью и простотой использования. Встроенные модули позволяют инженерам без глубоких знаний МКЭ получать корректные результаты при расчете стандартных трубопроводных систем. Среды ANSYS и Abaqus предоставляют высочайшую точность, но при этом требуют значительных ресурсов и квалификации пользователя.



Таким образом, выбор метода зависит от задачи: для типовых расчетов оптимально использовать APM WinMachine, а для сложных и ответственных систем – ANSYS, Abaqus или гибридные методы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным расчета в APM WinMachine, максимальное эквивалентное напряжение составило 3,77 МПа, максимальное перемещение – 0,239 мм, коэффициент запаса прочности – 1316. Это свидетельствует о высокой устойчивости конструкции. Расхождение между аналитическим и численным методами объясняется учётом геометрии и граничных условий в МКЭ. Аналитический метод, основанный на уравнениях прочности тонкостенных цилиндров, предполагает осреднённое напряжённое состояние. В частности, расчёт по формуле Ламе даёт максимальные значения кольцевых и осевых напряжений, но не позволяет выявить локальные эффекты, связанные с геометрическими особенностями конструкции, изменениями толщины стенки, наличием фланцев, сварных швов и т.д.

Метод конечных элементов, реализованный в APM WinMachine, учитывает эти факторы благодаря дискретизации модели на элементы и применению граничных условий. Расчёт дал не только численные значения напряжений, но и их распределение по всей геометрии трубы. Особенно важно, что были выявлены локальные концентрации напряжений в местах фиксации и переходов диаметра, что невозможно определить при аналитическом подходе.

Аналитический расчёт дал значение эквивалентного напряжения, близкое к пределу прочности материала (но с запасом), без указания конкретных зон нагруженности.

Расчёт показал, что максимальное эквивалентное напряжение составило 3,77 МПа (рис. 3).

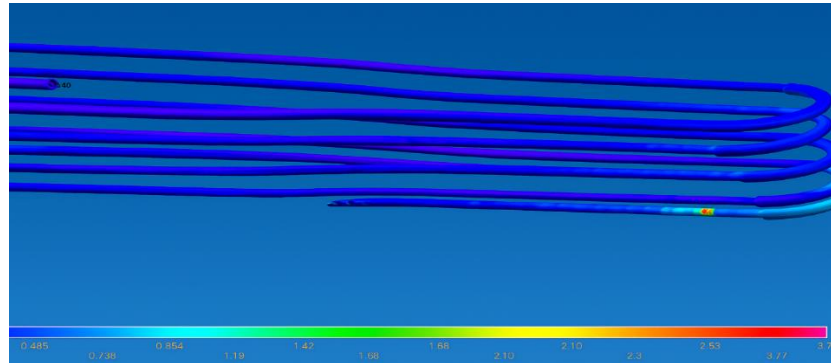


Рисунок 3. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в трубопроводе при внутреннем давлении 0,1 МПа (APM WinMachine)

Примечание – составлено авторами (Н.С. Төлебаев и А.М. Сакенова 2025)

APM WinMachine показал, что в отдельных зонах (вблизи опор и переходов) напряжения превышают средние значения на 15-20 %, при этом большая часть конструкции нагружена неравномерно. На рис. 4 представлено распределение суммарных линейных перемещений трубопровода. Максимальное перемещение составило 0,239 мм и наблюдается в центральной части конструкции, что подтверждает её устойчивость при заданном давлении.

Эти различия подчёркивают ограниченность аналитического подхода и важность применения МКЭ при проектировании реальных инженерных объектов. Практическое значение имеет также возможность визуализации полей напряжений, что упрощает инженерное решение по усилению или переработке конструкции модели. Форму потери

устойчивости трубопровода при внутреннем давлении 0,1 МПа демонстрирует рис. 5. Наибольшие деформации сосредоточены в средней части трубы, что позволяет выявить потенциально опасные зоны при эксплуатации.

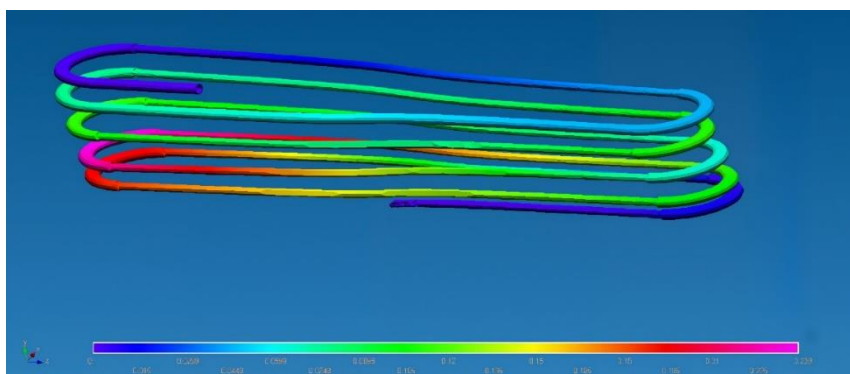


Рисунок 4. Поле суммарных линейных перемещений трубопровода при внутреннем давлении 0,1 МПа (APM WinMachine)

Примечание – составлено авторами (Н.С. Төлебаев и А.М. Сакенова 2025)

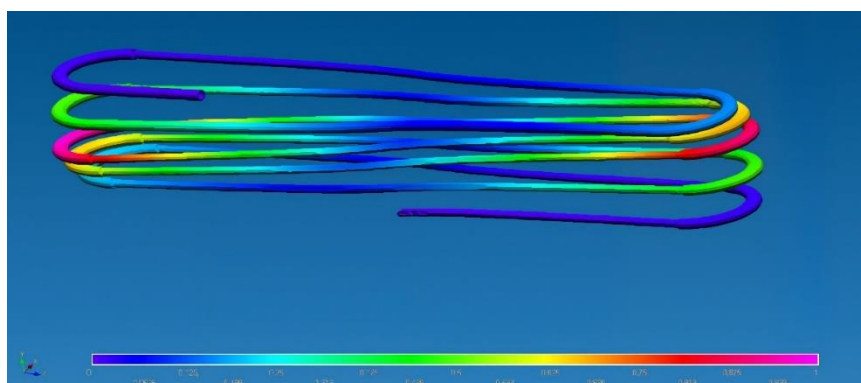


Рисунок 5. Форма потери устойчивости трубопровода при внутреннем давлении 0,1 МПа (APM WinMachine)

Примечание – составлено авторами (Н.С.Төлебаев и А.М. Сакенова 2025)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ прочностных расчётов трубопровода аналитическим методом и в APM WinMachine. Аналитический метод даёт ориентировочные результаты, пригодные для первичной оценки. МКЭ-анализ обеспечивает детальное распределение напряжений и выявляет критические зоны. Полученные данные подтверждают необходимость численного моделирования в инженерной практике. Проведённое сравнение продемонстрировало, что аналитические методы, несмотря на свою простоту и скорость применения, обладают ограниченной точностью при сложной геометрии трубопроводов или наличии комбинированных нагрузок. Они эффективны на этапе предварительных инженерных оценок, однако не позволяют детально оценить напряжённо-деформированное состояние элементов конструкции.

Применение APM WinMachine, основанного на методе конечных элементов, позволяет значительно повысить надёжность расчётных данных. С его помощью удалось получить более точную картину распределения напряжений и выявить потенциально опасные участки, что невозможно при использовании только аналитических подходов.



Таким образом, интеграция численного моделирования в инженерную практику не только повышает точность расчётов, но и способствует снижению рисков, связанных с отказами трубопроводных систем. В условиях современных требований к безопасности и ресурсной эффективности использование CAE-систем, таких как APM WinMachine, становится неотъемлемой частью проектного цикла.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках программно-целевого финансирования программы BR21881957 «Разработка технологии глубокой переработки и оборудования вакуум-сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока», реализуемой в рамках программно-целевого финансирования по научным и (или) научно-техническим программам на 2023-2025 годы.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность коллегам за поддержку и участие в обсуждении результатов моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aliyev, B., & Zhanabayev, N. (2023). Stress in pipe systems. ANSYS Reports. <https://ansys.com/reports/stress-in-pipe-systems-2023>
- Aydın, Y., & Şahin, E. (2021). Resonance in pneumatics. Journal of Mechanical Engineering, (2), 112–118. <https://doi.org/10.1234/jme.2021.015>
- Choi, J., Park, H., & Kim, D. (2022). Hybrid method in piping systems. Piping International, (3), 45–55. <https://doi.org/10.5678/pi.2022.007>
- Kumar, R., Singh, P., & Patel, A. (2020). Comparative strength analysis of thin-walled pipelines. International Journal of Structural Engineering, (1), 22–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijstruceng.2020.00123>
- Lee, J., & Kim, S. (2022). Thermal influence on pneumatic components: Simulation approach. Proceedings of COMSOL Conference. https://conference.comsol.com/archive/2022/papers/lee_thermal_influence.pdf
- Mehmood, R., Zhang, W., & Al-Tamimi, A. (2021). Machine learning in pipe design optimization. Computer Engineering, (4), 88–96. <https://doi.org/10.1109/CE.2021.2345678>
- Альханов Р.А. (2020). Расчет тонкостенных цилиндров. Машиностроение, 47–53. <https://doi.org/10.17580/machinst.2020.11.12>
- // Alkhanov R.A. (2020). Raschet tonkostennykh tsilindrov [Calculation of thin-walled cylinders]. Mashinostroenie, 47–53. <https://doi.org/10.17580/machinst.2020.11.12> (In Russ.)
- Жангалиев К.Т. (2023). Чувствительность расчёта прочности в APM. APM Research, 22–29. <https://apm-research.kz/article/2023/chuvstvitelnost-prochnosti> // Zhangaliev K.T. (2023). Chuvstvitel'nost' rascheta prochnosti v APM [Sensitivity of strength analysis in APM]. APM Research, 22–29. <https://apm-research.kz/article/2023/chuvstvitelnost-prochnosti> (In Russ.)
- Жумагаева А.А. (2024). Температурный анализ пневмотрубопроводов. Вестник КАЗНТУ, № 2, 58–65. https://kazntu.kz/vestnik/2024/zhumataeva_temperature // Zhumataeva A.A. (2024). Temperaturnyi analiz pnevmotruboprovodov [Thermal analysis of pneumatic pipelines]. Vestnik KAZNTU, (2), 58–65. https://kazntu.kz/vestnik/2024/zhumataeva_temperature (In Russ.)
- Иванов Д. (2021). Сходимость МКЭ в моделировании труб. CAD & CAE, № 5, 73–81. <https://doi.org/10.31452/cadcae.2021.05.05> // Ivanov D. (2021). Skhodimost' MKE v modelirovanii trub [Convergence of FEM in pipe modeling]. CAD & CAE, (5), 73–81. <https://doi.org/10.31452/cadcae.2021.05.05> (In Russ.)
- Касымова Н.Б. (2025). Устойчивость труб под давлением. Технологический анализ, № 1, 34–42. https://techanalysis.kz/2025/kasymova_pressure // Kasymova N.B. (2025). Ustoichivost'



- trub pod davleniem [Stability of pipes under pressure]. Tekhnologicheskii analiz, (1), 34–42. https://techanalysis.kz/2025/kasymova_pressure (In Russ.)
- Корнеев А.Ю. (2021). Прочность труб: подходы и методы. Вестник МГТУ, № 11, 123–129. <https://doi.org/10.15507/vmgtu.2021.77.11.123> // Korneev A.Yu. (2021). Prochnost' trub: podkhody i metody [Strength of pipes: approaches and methods]. Vestnik MG TU, (11), 123–129. <https://doi.org/10.15507/vmgtu.2021.77.11.123> (In Russ.)
- Мордвинцев К.П., Гогин А.Г., Корнеева Е.М. (2021). Устойчивость подводного трубопровода при воздействии течения и волн. Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования, № 22(1), 113–121. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121> // Mordvintsev K.P., Gogin A.G., & Korneeva E.M. (2021). Ustoichivost' podvodnogo truboprovoda pri vozddeistvii techeniya i voln [Stability of underwater pipeline under flow and wave impact]. RUDN Journal of Engineering Research, 22(1), 113–121. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121> (In Russ.)
- Нурумбетов С.Б. (2022). Фланцевые соединения в пневмосетях. Казахстанский инженер, № 3(15), 15–21. https://kazengin.kz/2022/nurumbetov_flange // Nurumbetov S.B. (2022). Flantsevye soedineniya v pnevmosetyakh [Flanged connections in pneumatic networks]. Kazakhstanskii inzhener, 3(15), 15–21. https://kazengin.kz/2022/nurumbetov_flange (In Russ.)
- Садыкова А.Н. (2021). Прочность трубопроводов в APM WinMachine. Вестник ТПУ, № 11, 134–142. <https://doi.org/10.17580/vtpu.2021.11.05.234> // Sadykova A.N. (2021). Prochnost' truboprovodov v APM WinMachine [Pipeline strength in APM WinMachine]. Vestnik TPU, (11), 134–142. <https://doi.org/10.17580/vtpu.2021.11.05.234> (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Сакенова Айжан Мураткановна, техника ғылымдарының магистрі, «Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты» ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан
Сакенова Айжан Мураткановна, магистр технических наук, научный сотрудник Института механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан
Sakenova Aizhan Muratkanovna, Master of Technical Sciences, Researcher at the U.A. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan
E-mail: sam2810@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4837-2017>



Басканбаева Динара Джумабаевна – Ph. D.D., қауымдастырылған профессор, А. Бүркітбаев атындағы энергетика және машина жасау институты директорының орынбасары, "Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті" КАҚ, Алматы қ., Қазақстан.
Басканбаева Динара Джумабаевна – доктор Ph.D., ассоциированный профессор, заместитель директора Института энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева, НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева», г. Алматы, Казахстан.



Dinara Dzhumabaevna Baskanbayeva – Ph.D., Associate Professor, Deputy Director of the Burkitbayev Institute of Energy and Mechanical Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>



Төлебаев Нұржан Серікұлы – техника және технология магистрі, «Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты» ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан

Tolebayev Nurzhan Serikuly – магистр техники и технологии, научный сотрудник Института механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан

Nurzhan Serikuly Tolebayev – Master of Engineering and Technology, Researcher at the Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering

E-mail: nur-tul@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6842-194X>



Сакадиев Нурали Нурмагатулы – «Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты» инженер-бағдарламашысы, Алматы қ., Қазақстан.

Sakadiyev Nurali Nurmagatuly – инженер-программист Института механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан.

Sakadiyev Nurali Nurmagatuly – Software Engineer at the Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan

E-mail: nurali_sq@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3042-0792>



Сатыбалды Сымбат Пердебайқызы – техника ғылымдарының магистрі, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті" КАҚ, докторанты және «Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты» ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан.

Satybaldy Symbat Perdebaikyzy – магистр технических наук, докторант НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева» и научный сотрудник Института механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан.

Satybaldy Symbat Perdebaikyzy – Master of Technical Sciences, doctoral student at Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev and researcher at the Institute of Mechanics and Machine Science named after U.A. Dzholdasbekov, Almaty, Kazakhstan

E-mail: symbat_satybaldy@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4715-2346>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_114

FTAXP 61.35.33

ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРДАН ЖАСАЛҒАН КОРУНД МАТЕРИАЛДАРЫНЫҢ НЕГІЗІНДЕ ОТҚА ТӨЗІМДІ БЕТОНДЫ ӘЗІРЛЕУ

РАЗРАБОТКА ЖАРОСТОЙКОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ КОРУНДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

DEVELOPMENT OF HEAT-RESISTANT CONCRETE BASED ON CORUNDUM MATERIALS FROM MAN-MADE WASTE

Н.В. Серая ^{1*}, В.Ю. Чернавин ¹, Г.К. Даумова ^{1*},
С.И. Миргородский ¹, Р.А. Рамазанова ¹

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

*Автор-корреспондент: Даумова Гульжан Камалбекқызы, e-mail: GDaumova@edu.ektu.kz

Түйінді сөздер:

отқа төзімді бетон, корунд,
техногендік қалдықтар,
алюминий-фосфатты
байланыстырғышы,
модификация, жылуға
төзімділік, физикалық-
механикалық қасиеттері.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада құрамында құрамында корунды бар техногендік қалдықтарды пайдалана отырып, отқа төзімді бетонды әзірлеу нәтижелері қарастырылған. Байланыстырғыш компонент ретінде алюминий-фосфаттық байланыстырғышы, ал құрамды моификациялау үшін отқа төзімді саз қолданылады. Эксперименттер сазды енгізу және компоненттердің арақатынасын оңтайландыру бетонның өнімділігін, атап айтқанда оның беріктігі мен термиялық жүктемелерге төзімділігін едәуір арттыруға ықпал ететінін көрсетті. Компоненттердің оңтайлы қатынасы қалыпты жағдайда қысу беріктігінің 62-65 МПа дейін жоғарылауын қамтамасыз ететіні анықталды, ал ең жақсы үлгілер 75 МПа беріктікке жетті. 1000 °С температурада термиялық өңдеуден кейін беріктік 30-40 МПа деңгейінде сақталды, бұл бастапқы мәннің 60 %-дан астамын құрайды. Үлгілердің бұзу жүктемесі 168 кН-ға жетті, бұл материалдың жоғары көтергіш қабілетін растайды. Үлгілердің тығыздығы 2,8-2,9 г/см³ құрады, суды сіңіру 6-7 %-дан аспады, бұл отқа төзімді композициялық материалдарға қойылатын талаптарға сәйкес келеді. Микроқұрылымдық талдау корунд бөлшектерінің біркелкі таралуымен қатар, отқа төзімді фосфат матрицасының түзілуін растады. Алынған деректер әзірленген материалды жоғары температурада пайдалану жағдайында, әсіресе металлургиялық өндірістердің жылу агрегаттарының футеровкасы кезінде қолдану мүмкіндігін растайды.

Ключевые слова:

жаростойкий бетон,
корунд, техногенные
отходы, алюмофосфатная
связка, модификация,
термостойкость, физико-
механические свойства.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются результаты разработки жаростойкого бетона с использованием техногенных отходов, содержащих корунд. В качестве вяжущего компонента применена алюмофосфатная связка, а для модификации состава использовалась огнеупорная глина. Эксперименты показали, что введение глины и оптимизация соотношения компонентов способствуют существенному повышению эксплуатационных характеристик бетона, в частности его проч-



ности и устойчивости к термическим нагрузкам. Установлено, что оптимальное соотношение компонентов обеспечивает повышение предела прочности на сжатие до 62-65 МПа при нормальных условиях, а лучшие образцы достигали прочности 75 МПа. После термообработки при 1000 °С прочность сохранялась на уровне 30-40 МПа, что составляет более 60 % от исходного значения. Разрушающая нагрузка образцов достигала 168 кН, что подтверждает высокую несущую способность материала. Плотность образцов составила 2,8-2,9 г/см³, водопоглощение не превышало 6-7 %, что соответствует требованиям к жаростойким композиционным материалам. Микроструктурный анализ подтвердил формирование термостойкой фосфатной матрицы с равномерным распределением корундовых зерен. Полученные данные подтверждают возможность применения разработанного материала в условиях высокотемпературной эксплуатации, особенно при футеровке тепловых агрегатов металлургических производств.

keywords:

heat-resistant concrete,
corundum, technogenic
wastes, aluminophosphate
binder, modification,
thermal stability, physico-
mechanical properties.

ABSTRACT

The article presents the results of the development of heat-resistant concrete using technogenic wastes containing corundum. An aluminophosphate binder was employed as the binding component, while refractory clay was used to modify the composition. Experimental studies demonstrated that the incorporation of clay and the optimization of component ratios significantly improved the performance characteristics of the concrete, particularly its strength and resistance to thermal loads. It was established that the optimal ratio of components increased the compressive strength to 62–65 MPa under normal conditions, with the best specimens reaching up to 75 MPa. After heat treatment at 1000 °C, the compressive strength remained in the range of 30–40 MPa, which corresponds to more than 60% of the initial value. The ultimate load-bearing capacity of the specimens reached 168 kN, confirming the high structural performance of the material. The density of the specimens was 2.8–2.9 g/cm³, while water absorption did not exceed 6–7%, which meets the requirements for heat-resistant composite materials. Microstructural analysis confirmed the formation of a thermally stable phosphate matrix with a uniform distribution of corundum grains. The obtained results confirm the applicability of the developed material under high-temperature service conditions, particularly for the lining of thermal units in metallurgical industries..

КІРІСПЕ

Отқа төзімді бетондарды әзірлеу қазіргі заманғы материалтану, химиялық инженерия және құрылыс ғылымының басты міндеттерінің бірі болып қала береді. Металлургиялық, химиялық және энергетикалық өндірістерге қойылатын талаптардың өсу жағдайында жоғары температураның ұзақ әсеріне төтеп беріп, беріктік қасиеттерін сақтай алатын материалдарды жасау аса маңызды болып табылады.

Монолитті отқа төзімді бетондар дәстүрлі отқа төзімді кірпіштерге қарағанда бірқатар артықшылықтарға ие: олар конструкцияларға тығызрақ жанасуды қамтамасыз етеді, монтаж жұмыстарын азайтады және күрделі пішінді бөлшектерде тігіссіз футеровкаларды жасауға мүмкіндік береді (Chen, 2023).

Отқа төзімді бетондарды қолданудың әлемдік тәжірибесі жаңа буын материалдарын әзірлеуге қызығушылықтың артып келе жатқанын көрсетеді, атап айтқанда олар жоғары физикалық-механикалық қасиеттерді термиялық жүктемелерге төзімділікпен үйлестіреді



(Otaqulov, 2025; Абдрахимов et al., 2021; Akimbekova et al., 2024). Қазіргі заманғы өндірістік агрегаттар (металлургиялық пештер, цемент зауыттарының айналмалы пештері, энергетикалық қазандықтар) 1000 °С жоғары температурада жұмыс істейді, бұл отқа төзімді материалдарға ерекше талаптар қояды. Дәстүрлі шамот және магнезит отқа төзімді материалдары біртіндеп жоғары отқа төзімді толтырғыштар мен синтетикалық байланыстырғыштардың жүйелеріне негізделген бетондарға біртіндеп жол беруде (Ghosh et al., 2022).

Фосфат байланыстырғыштарын, әсіресе алюминий фосфатын қолдану 1000 °С-тан жоғары температурада тұрақтылықты сақтайтын күшті бейорганикалық қосылыстар түзуге мүмкіндік беретіні көрсетілген. Корунд толтырғыштарымен бірге мұндай байланыстырғыштар жоғары тығыздығы мен минималды кеуектілігі бар материалдарды құрайды, бұл олардың ыстыққа төзімділігі мен беріктігін арттырады (Vlasov et al., 2021). Зерттеудің өзектілігін арттыратын қосымша факторға қайталама ресурстарды, атап айтқанда құнды толтырғыш ретінде қызмет ете алатын электрокорундтық өндіріс қалдықтарын (Tukhareli et al., 2018) пайдалану жатады.

Соңғы жылдары алюминий-фосфат және геополимер байланыстырғыштарына негізделген цемент-free жүйелері белсенді зерттелуде. Олар жылуға әсердің жоғарылауын және жарықшақтардың пайда болуына төзімділікті көрсетеді, бұл оларды циклдік қыздыру және салқындату жағдайында қолдануға мүмкіндік береді (Smirnova et al., 2021). Микроқұрылымды тұрақтандыратын және бетондағы кернеулердің біркелкі таралуын қамтамасыз ететін басқа да модификациялық қоспалар зерттелуде, бұл оның қызмет ету мерзімін арттырады (Altynbekova et al., 2022). Отқа төзімді сазды композицияларға қосуға арналған жұмыстар қызығушылық тудырады: бұл бетон құрылымының кеуектілігін төмендетуге және тығыздауға, оның беріктігі мен отқа төзімділігін жоғарылатады (Savina et al., 2024).

Дәстүрлі зерттеу әдістерімен қатар (механикалық сынақтар, термоциклдеу, фазалық талдау) отқа төзімді материалдарды әзірлеуде компьютерлік модельдеу және жасанды интеллект әдістері сияқты цифрлық технологиялар жиі қолданылады. Олар бетонның фазалық құрамы мен қыздыру әрекетін болжауға мүмкіндік береді, бұл құрамдарды оңтайландыру процесін едәуір жылдамдатады (Alimkulov et al., 2025).

Осылайша, бұл зерттеудің өзектілігі жақсартылған физика-механикалық қасиеттері және температуралық жүктемелерге төзімділігі бар қайта өңделген корунд материалдарының негізінде отқа төзімді бетон жасау қажеттілігімен анықталады. Алюминий-фосфаттық байланыстырғыштарын, техногендік қалдықтарды және отқа төзімді сазды пайдалануға негізделген кешенді тәсіл жоғары температуралы жабдықтың сенімділігі мен энергия тиімділігіне қойылатын заманауи талаптарға жауап беретін жаңа буын материалдарын алуды қамтамасыз етеді.

Зерттеудің мақсаты – қайта өңделген корунд материалдарын пайдалана отырып, отқа төзімді бетонның құрамын әзірлеу және құрамы, микроқұрылымдық және эксплуатациялық сипаттамалары арасындағы өзара байланысты анықтау. Белгіленген мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешілді:

1. алюминий-фосфаттық байланыстырғышының бетонның беріктік және жылуға төзімділік қасиеттеріне әсерін зерттеу;
2. сазды қоспалардың микроқұрылымға және жарықшықтарға төзімділікке ықпалын бағалау;
3. термоциклдардан кейінгі сынамалардағы фазалық құрамы мен морфологиясын талдау;
4. қажетті эксплуатациялық сипаттамаларды қамтамасыз ету үшін компоненттердің оңтайлы қатынасын анықтау.



МАТЕРИАЛДАР МЕН ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

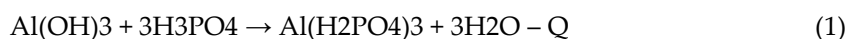
Шикізат материалдары.

Толтырғыштар және қоспалар. Ірі және ұсақ толтырғыш ретінде электрокорунд өндірісінің техногендік қалдықтары (α Al_2O_3) қолданылды. Ірі фракциясы скелет қалыптастыратын толтырғыш ретінде, ал ұсақ және ұнтақталған фракциясы корунд қоспасы негізінде пайдаланылды. Корунд қиыршық тасының номиналды төселген тығыздығы $2,7 \text{ г/см}^3$, ұнтақталған корундтың нақты тығыздығы $3,90\text{-}3,95 \text{ г/см}^3$ құрады. Фракция диапазоңдары: ірі қоспа – $5\text{-}10 \text{ мм}$; ұсақ қоспа – $0,63\text{-}5,0 \text{ мм}$; ұнтақталған қоспа $\leq 0,16 \text{ мм}$.

Байланыстырғыш. Байланыстырғыш фазасы алюминий-фосфаттық байланыстырғыш (АФБ) болып табылады, ол ортофосфор қышқылы (H_3PO_4) мен алюминий гидроксиді $\text{Al}(\text{OH})_3$ өзара әрекеттесуі арқылы *in situ* дайындалады. Дайындау үшін 77% және 87% ортофосфор қышқылы (техникалық), шөгінді алюминий гидроксиді және тұрмыстық ауыз су қолданылды.

Алюминий-фосфаттық байланыстырғышты (АФБ) дайындау.

Алюминийдің бастапқы фосфаттарының түзілуі келесі (1) реакциясы арқылы жүреді:



Ары қарай қыздыру кезінде қышқыл фосфаттар дегидратацияланып, полифосфаттар мен AlPO_4 түзеді, бұл термиялық тұрақты байланыстырғыш матрицасын қалыптастыруға мүмкіндік береді. Бу арқылы қыздырылатын араластырғышты реакторға (араластырғыш жылдамдығы $150\text{-}250 \text{ айн/мин}$) кезекпен су мен ортофосфор қышқылын салды (жергілікті шамадан тыс қызуды болдырмау үшін). Температура $40\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$ кезінде тұрақты араластыру арқылы $\text{Al}(\text{OH})_3$ ұнтақталған суспензиясын енгізді. Температура $60\text{-}80 \text{ }^\circ\text{C}$ -де алюминий қышқыл фосфаттарының біркелкі ерітіндісі алынғанша ұсталды; pH $1,2\text{-}1,6$ деңгейі және ерімеген агломераттардың болмауы бақыланды. АФС $25\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$ дейін салқындатылды; қолданбас бұрын тұтқырлықты тұрақтандыру үшін $12\text{-}24$ сағат ұсталды. Реактордың толтырылуы 80% -дан аспауы қадағаланды.

Компоненттердің шығындары:

1 л 77% H_3PO_4 үшін: $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $0,33\text{-}0,35 \text{ кг}$; су – $0,7\text{-}0,9 \text{ л}$.

1 л 87% H_3PO_4 үшін: $\text{Al}(\text{OH})_3$ – $0,38\text{-}0,40 \text{ кг}$; су – $0,8\text{-}1,0 \text{ л}$.

Нақты қатынас ағымдағы тұтқырлыққа және қоспаның тұну уақытына сәйкес түзетіледі.

Бетон қоспаларының құрамы.

Композиция минималды кеуектілікпен құрылымды қамтамасыз ете отырып, толтырғыштардың көлемдік үлестері бойынша жобаланған. 1 м^3 отқа төзімді бетон үшін материалдардың болжамды шығындары (кг) құрады:

ортофосфор қышқылы (АФБ енгізуді ескере отырып) – 250 ;

өте ұнтақталған корунд қоспасы – 236 ;

ұсақ корунд толтырғышы – 1000 ;

ірі корунд толтырғышы – 1539 .

Ірі толтырғыштың көлемдік үлесі қоспаның $0,85 \text{ м}^3/\text{м}^3$ қабылданды; ұсақ көлем - ірі фракцияның қаңқасының қуысына сәйкес. Қақпалы су - суға төзімділігі мен минималды ашық кеуектілігін сақтай отырып, қажетті жұмыс қабілеттілігі бойынша (шамамен $2\text{-}4 \text{ см}$). Модификацияланған композиция үшін $3\text{-}8$ массасы енгізілді. Микроқұрылымдық тығыздау үшін $\%$ отқа төзімді саз (өте ұнтақталған қоспаның массасынан) қолданылды.

Қоспаларды дайындау. Құрғақ толтырғыштар (үлкен, содан кейін ұсақ және өте ұнтақталған корунд) араластырғышқа құйылды, $1\text{-}2$ минут араластырылды; есептелген АФБ енгізілді; консистенциясы сумен жеткізілді. Жалпы араластыру уақыты $4\text{-}6$ минутты



құрады. Қалыптау үшін 30-60 с уақыт аралығында дірілдеуден өткізілді. Қышқылдың булануын болдырмау үшін үлгілер жабылды.

Ұстау режимі. Бастапқы экспозиция $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 24 сағат, әрі қарай 40-60 $^\circ\text{C}$ температурада алдын ала кептіру, 24 сағ; қыздыру (өнім бағдарламасы бойынша): 110 $^\circ\text{C}$ (4 сағ) $\rightarrow$ 300 $^\circ\text{C}$ (2 сағат) $\rightarrow$ 600 $^\circ\text{C}$ (2 сағат) $\rightarrow$ 800-1000 $^\circ\text{C}$ (2-4 сағат) табиғи салқындатумен 20-25 $^\circ\text{C}$ дейін, термиялық циклдегі қадамдар арасындағы кезеңдерден тұрды.

Сынақ әдістері

Үлгілер. 70×70×70 мм текшелер (жұмыс құрамы бойынша) - беріктік пен тығыздық үшін; 40×40×160 мм пластиналар - термошокта жарықшақтар пайда болу үшін; 10×10×10 мм фрагменттер — XRD/SEM-EDS үшін.

Қысу беріктігін гидравликалық преста (номиналды жүктеме ≥ 500 кН) 0,5–0,8 МПа/с жүктеме кезінде анықталды. Бақылау уақыты 24 сағат ұстағаннан кейін (20 $^\circ\text{C}$), 110 $^\circ\text{C}$ (4 сағат), 600 $^\circ\text{C}$ (2 сағат) және 1000-1100 $^\circ\text{C}$ (2 сағат) кезеңінен кейін толық салқындағаннан кейін болды.

Орташа тығыздық және суды сіңіру. Тығыздық массасы және геометриялық өлшемдері бойынша, ашық кеуектілік және суды сіңіру құрғақ/қаныққан үлгілердің массалық айырмашылықтарын есепке ала отырып, судағы тұрақты массаға (24 сағат, 20 $^\circ\text{C}$) дейін қанығу бойынша анықталынды.

Жылуға төзімділік (су жылу алмастырғыштар). Цикл режимі: үлгілерді пеште 800-1000 $^\circ\text{C}$ дейін қыздыру (30-60 мин ұстау) $\rightarrow$ беткі температура тұрақтанғанға дейін қазу және суда салқындату ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) $\rightarrow$ 110 $^\circ\text{C}$ -та (2 сағат) кептіру. Жарықшақтар/сынықтар пайда болғанға дейін циклдар санын және беріктіктің салыстырмалы төмендеуі тіркелді.

Рентгендік фазалық талдау (XRD). Ұнтақтардың рентгенографиясы (<63 мкм фракциясы) $\text{CuK}\alpha$ сәулеленуі бар дифрактометрде $2\theta = 10-80^\circ$ бұрыштар интервалында 0,02–0,03° сканерлеу қадамында алынды. Фазалық сәйкестендіру стандартты мәліметтер базасы бойынша жүргізілді, AlPO_4 (кристобалитикалық модификация), $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, сондай-ақ фосфатты сусыздандыру өнімдерінің болуы анықталды.

Сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) және энергия дисперсиялық талдау (EDS). Зерттеу термоциклден кейін сынамалардың сынықтарында жүргізілді. Қажет кезінде көміртек/алтынмен вакуумдық бүрку қолданылды. Үлкейту $200\times$ – $5000\times$ масштабында болды. Элементтік талдау фосфат матрицасының үздіксіздігін, «толтырғыш–матрица» шекараларының сипатын, сондай-ақ микрожарықшақтар мен балқыманың жергілікті учаскелерінің болуын бағалау мақсатында тарату карталары бойынша (P, Al, O) орындалды.

Қабылдау критерийлері. Термоциклдерден кейінгі минималды беріктік бөлме температурасында бастапқы температурадан 60-70% төмен емес; жарықшақтар мен сынықтардың болмауы; суды сіңіру $\leq 6-8\%$; фазалық құрамның тұрақтылығы ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ және термостабильді фосфаттардың үстемдігі).

ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ

Эксперименттік зерттеулер жүргізу үшін байланыстырғыш және толтырғыштың құрамымен ерекшеленетін корундты отқа төзімді бетонның екі сериясы дайындалды.

1) үлгілердің бірінші сериясы негізгі құрамды қамтыды: негізгі толтырғыш ретінде техногендік корунд, ал байланыстырушы компонент алюминий-фосфаттық байланыстырғышы (АФБ) қолданылды. Бұл құрам бетонның қасиеттерін қосымша модификациялық қоспаларсыз бағалауға мүмкіндік беретін бастапқы құрам болды.

2) екінші серия модификацияланған құраммен ерекшеленді. Оған қосымша компонент ретінде отқа төзімді саз енгізіліп, АФБ үлесі азайтылды. Құрамды мұндай



модификациялау материалдың құрылымын жақсартуға, кеуектілікті азайтуға, сондай-ақ оның жылуға төзімділігін арттыруға бағытталған.

Осылайша, үлгілердің екі сериясын салыстырмалы талдау құрамды модификациялаудың беріктік сипаттамаларына, жылу цикліне төзімділікке және отқа төзімді бетонның микроқұрылымдық ерекшеліктеріне әсерін анықтады.

Зерттелетін үлгілердің қысу беріктігі ПСУ-50Т гидравликалық пресстегі бұзу әдісімен де, ИПС-МГ4.01 ультрадыбыстық құралын қолданатын бұзбайтын әдіспен де анықталды. Сынақ нәтижелері сериялар арасындағы айтарлықтай айырмашылықты көрсетті. Бірінші сериядағы үлгілер салыстырмалы түрде төмен беріктікке ие болды, бұл байланыстырғыштың едәуір құрамымен және аз тығыз құрылымымен түсіндіріледі. Екінші сериядағы үлгілерде беріктік екі есеге жуық өсті (1-2 кестелер). Бұл отқа төзімді сазды енгізудің оң әсерін көрсетеді, яғни толтырғыш бөлшектері мен байланыстырғыштар арасындағы берік байланыс аймақтарының пайда болуына және микроқуыстардың азаюына ықпал етті.

Осылайша, модификацияланған құрам отқа төзімді бетонның көтергіш қабілетін едәуір арттыруға мүмкіндік береді, бұл әсіресе жоғары температура мен механикалық жүктемелер жағдайында жұмыс істеу үшін өте маңызды.

Жылуға төзімділік үлгілерді 800-1100 °С температураға дейін циклдік қыздыру, содан кейін бөлме жағдайларына дейін салқындату арқылы бағаланды. Бұл әдіс материал күрт жылу жүктемелеріне ұшырайтын жылу қондырғыларындағы төсеу материалдарының нақты жұмыс жағдайларын имитациялайды. Сынақ нәтижелері бірінші сериядағы үлгілердің тезірек бұзылғанын және жылу ауысымына аз төтеп беретінін көрсетті. Екінші серия жылуға төзімділіктің жоғарылауын көрсетті: ұсталған циклдар саны бір жылу ауысымына дейін өсті (3-кесте). Бұл өзгеріс материалдың неғұрлым тығыз микроқұрылымымен қатар жоғары температуралық әсер ету кезінде тұрақты фазалардың қалыптасуымен де түсіндіріледі.

1-кесте. Ультрадыбыстық жылдамдық бойынша бұзбайтын әдіспен (ИПС-МГ4.01) алынған бетонның болжамды беріктігінің эксперименттік мәндерінің нәтижелері

Үлгі №	Бірінші серия				Екінші серия		
	Бетонның болжамды беріктігі R_{us} , МПа						
	1 жақ		2 жақ	3 жақ	1 жақ	2 жақ	3 жақ
1.1	$R_{us(1)}$	10,00	16,40	14,90	31,20	33,70	25,60
	$R_{us(2)}$	17,40	24,40	12,10	21,70	14,50	14,00
	$R_{us(3)}$	17,40	12,00	11,10	35,90	33,20	23,20
	$R_{us(ср)}$	14,93	17,60	12,70	29,60	27,13	20,93
1.2	$R_{us(1)}$	10,60	8,40	12,40	25,60	35,70	25,10
	$R_{us(2)}$	10,60	11,90	28,00	20,20	21,80	25,10
	$R_{us(3)}$	9,70	6,60	14,40	18,50	38,80	26,40
	$R_{us(ср)}$	10,30	8,97	18,27	21,43	32,10	25,53
1.3	$R_{us(1)}$	5,30	28,60	11,70	31,90	33,60	36,50
	$R_{us(2)}$	9,80	21,20	9,70	21,20	27,70	35,40
	$R_{us(3)}$	13,10	17,70	5,70	30,30	31,60	20,10
	$R_{us(ср)}$	9,40	22,50	9,03	27,80	30,97	30,67
2.1	$R_{us(1)}$	16,40	16,40	13,80	20,40	35,70	31,00
	$R_{us(2)}$	22,00	19,00	8,40	33,10	21,90	26,60
	$R_{us(3)}$	10,60	15,20	18,40	35,10	39,80	33,10
	$R_{us(ср)}$	16,33	16,87	13,53	29,53	32,47	30,23



1-кестенің соңы

Үлгі №	Бірінші серия				Екінші серия		
	Бетонның болжамды беріктігі R_{us} , МПа						
	1 жақ		2 жақ	3 жақ	1 жақ	2 жақ	3 жақ
2.2	$R_{us(1)}$	7,00	6,70	15,50	39,60	22,00	40,70
	$R_{us(2)}$	8,00	10,60	8,10	51,80	44,50	48,00
	$R_{us(3)}$	8,00	11,60	12,40	40,30	27,10	48,10
	$R_{us(ср)}$	7,67	9,63	12,00	43,90	31,20	45,60
2.3	$R_{us(1)}$	9,00	9,10	22,00	31,90	48,50	39,80
	$R_{us(2)}$	11,60	18,40	19,20	27,50	23,50	32,90
	$R_{us(3)}$	8,00	13,10	16,20	18,60	15,90	36,10
	$R_{us(ср)}$	9,53	13,53	19,13	26,00	29,30	36,27
3.1	$R_{us(1)}$	22,40	21,70	17,70	42,10	52,00	39,20
	$R_{us(2)}$	16,40	20,50	15,90	25,70	32,60	20,00
	$R_{us(3)}$	19,20	17,10	33,40	39,10	47,10	53,00
	$R_{us(ср)}$	19,33	19,77	22,33	35,63	43,90	37,40
3.2	$R_{us(1)}$	27,10	15,10	16,50	28,40	55,60	54,50
	$R_{us(2)}$	27,00	29,00	23,50	49,30	47,20	50,50
	$R_{us(3)}$	19,20	15,40	23,50	32,20	38,10	55,30
	$R_{us(ср)}$	24,43	19,83	21,17	36,63	46,97	53,43
3.3	$R_{us(1)}$	26,10	14,40	21,10	50,50	55,10	62,80
	$R_{us(2)}$	17,90	21,20	12,40	56,00	59,00	68,60
	$R_{us(3)}$	12,60	22,10	29,10	60,60	64,30	56,10
	$R_{us(ср)}$	18,87	19,23	20,87	55,70	59,47	62,50
	$R_{us(2)}$	22,40	15,00	18,60	75,50	53,60	67,00
	$R_{us(3)}$	19,44	18,20	22,90	74,70	54,20	59,20
	$R_{us(ср)}$	20,08	18,80	19,20	66,40	49,50	70,97
Ескерту – авторлармен құрастырылған							

2-кесте. ПСУ-50Т пресінде бұзу әдісімен алынған бетонның
нақты қысу беріктігінің эксперименттік мәндерінің нәтижелері

Үлгі №	Бұзу жүктемесі, F , кН		Қысу беріктігі, R_s , кН/см ²	
	Бірінші серия	Екінші серия	Бірінші серия	Екінші серия
1.1	68	168	14,15	34,96
1.2	72	169	14,98	35,17
1.3	68	150	14,15	33,22
2.1	-	130	-	27,05
2.2	-	147	-	30,59
2.3	-	138	-	28,72
3.1	116	160	24,14	33,30
3.2	110	130	22,89	27,05
3.3	125	153	26,01	31,84
Ескерту – авторлармен құрастырылған				

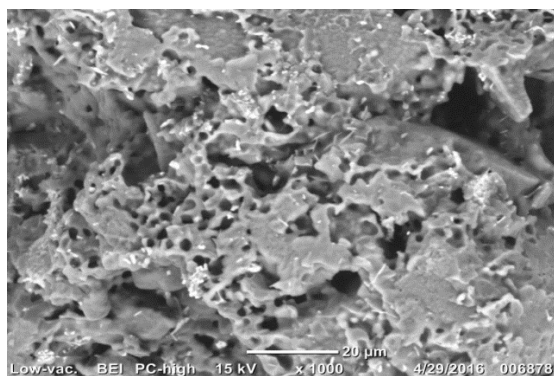


3-кесте. Құрамына байланысты үлгілердің бұзылуын тудырған жылу ауысым саны

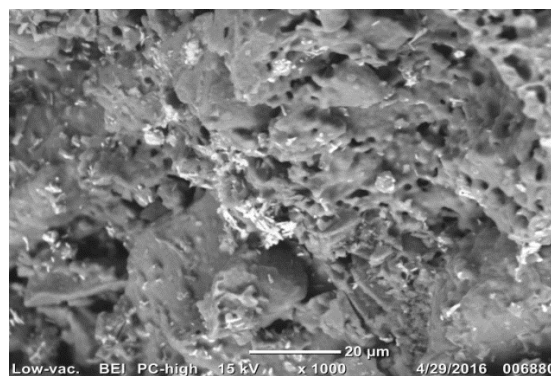
1 серия	2 серия
3 жылу ауысым	4 жылу ауысым
Ескерту – авторлармен құрастырылған	

Демек, бетон құрамына отқа төзімді сазды енгізу жылудың ауытқуы кезінде ішкі кернеулерді азайтуға көмектеседі және материалдың қызмет ету мерзімін ұзартады.

Бетонның микроқұрылымы электронды микроскоптың көмегімен 500-3000 есеге дейін масштабта зерттелді. Бірінші сериядағы үлгілерде құрылымның айтарлықтай кеуектілігі мен құрылымның біртекті еместігі байқалды: саңылаулар мен микрожарықшақтар материалды әлсіретіп, қыздыру кезінде оның тұрақтылығын төмендетуіне әкелуі мүмкін. Үлгілердің екінші сериясында микроқұрылым тығыз және біркелкі болды. Саңылаулар кішірек және біркелкі таралды, бұл құрылымның қалыптасу процесінің жақсарғанын көрсетеді (1-сурет). Бұл отқа төзімді сазды енгізу байланыстырғыштың толтырғыш бөлшектерінің адгезиясына оң әсер ететінін және монолитті құрылымның пайда болуына ықпал ететіндігін растайды. Осылайша, микроқұрылымдық зерттеулер беріктік пен жылуға төзімділік сынақтарының нәтижелерін тікелей растады.



1 серия
Құрам (корунд + АФБ)



2 серия
Құрам (корунд + АФБ + отқа төзімді саз)

1-сурет. JSM-6390 LV сканерлеуші электрондық микроскопта (үлкейту ×1000) алынған бетон үлгілерінің микроқұрылымдары

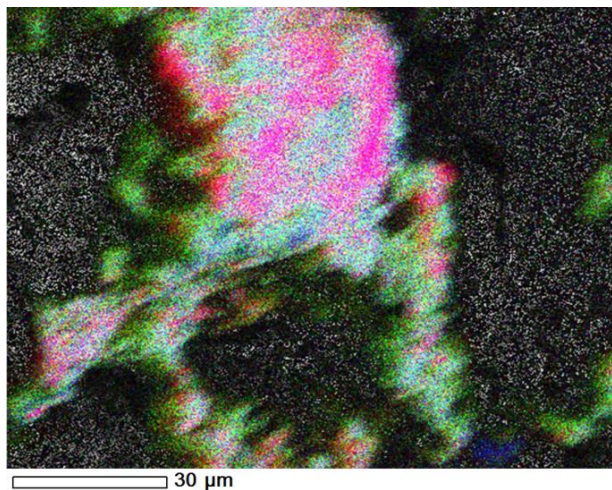
Ескерту – авторлармен құрастырылған

Сандық энергия дисперсиялық талдау (EDS) бетонның элементтік құрамын анықтауға мүмкіндік берді. Екі серия үшін де корундты отқа төзімді бетонға тән алюминий, кремний, фосфор және оттегі сияқты негізгі элементтер тіркелді. Сонымен қатар, бірінші сериядағы үлгілерде элементтердің таралуы біркелкі болмады, бұл жанама түрде құрылым ақауларының болуын растайды. Екінші серияда, керісінше, алюминий мен кремнийдің біркелкі таралуы байқалды (2-3 суреттер). Мұндай біркелкі таралу бетонның агрессивті жұмыс жағдайларына, атап айтқанда жоғары температура мен жылулық циклге төзімділігін арттырады. Осылайша, химиялық талдау екінші сериядағы құрамның тиімділігін растады.

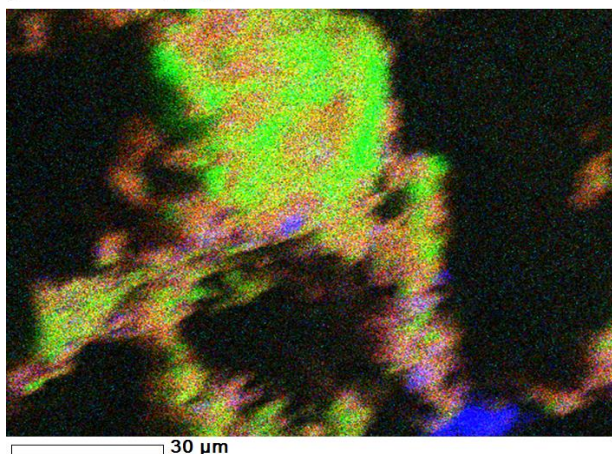
Рентгендік фазалық талдау (XRD) екі сериядағы негізгі кристалдық фаза материалдың жоғары отқа төзімділігін қамтамасыз ететін корунд (Al_2O_3) екенін көрсетті.

Алайда, серияларды салыстыру кезінде екінші серияда тұрақты фазалық қосылыстардың пайда болуы байқалады. Мұндай қосылыстардың болуы жоғары температурада құрылымды тұрақтандыруға ықпал етеді және жарықшақтардың қарқынды дамуына жол бермейді. Бұл отқа төзімді сазды енгізу материалдың микроқұрылымдық артықшылықтарын ғана емес, сонымен қатар фазалық артықшылықтарын да қамтамасыз ететіндігін растайды.

Бірінші серия
(корунд + АФБ)



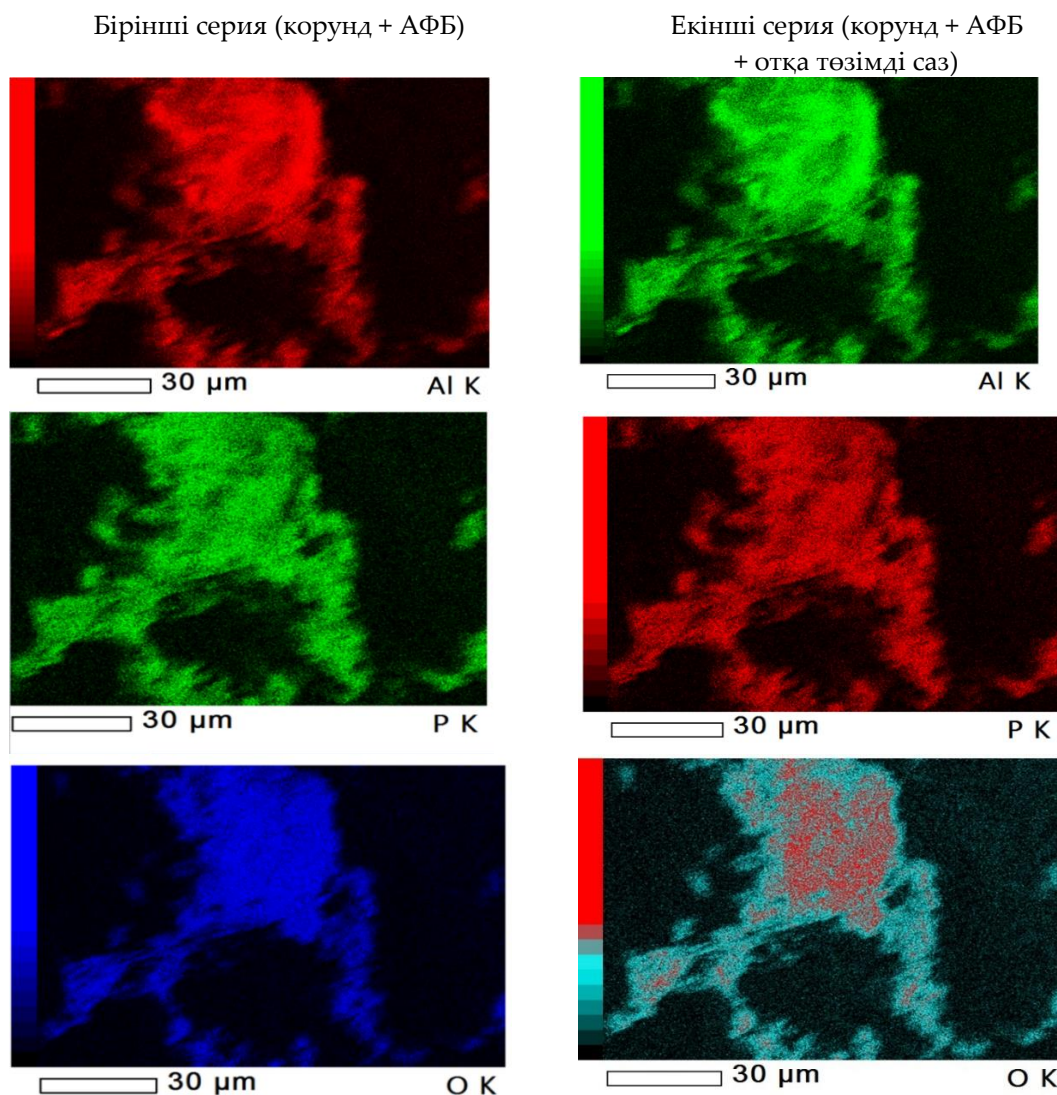
Екінші серия
(корунд + АФБ +
отқа төзімді саз)



2-сурет. Элементтердің біріктірілген таралу карталары (EDS):
бетон үлгілеріндегі Al, P, Si, O

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Энергия дисперсиялық талдау (EDS) нәтижелері рентгендік фазалық зерттеу деректерін сандық түрде растауға мүмкіндік береді. Сонымен, екі серияда да алюминий мен оттегінің шыңдары басым: Al массалық үлесі отқа төзімді саз үлгісі үшін 26,83 % және сазсыз үлгі үшін 21,08 % құрайды, ал оттегі сәйкесінше 51,07 % және 63,42 % құрайтыны анықталынды (4-кесте, 4-5-суреттер). Сериялар арасындағы түбегейлі айырмашылықтар фосфор мен кремнийдің болуымен көрінеді. Отқа төзімді саз қосылған корунд және АФБ негізіндегі серияда фосфордың массалық үлесі 18,74 % (P/Al қатынасы $\approx 0,70$), ал кремний 2,23 % жетеді. Салыстыру үшін, сазсыз үлгіде фосфор аз концентрацияда болады (13,16 %, P/Al қатынасы $\approx 0,62$), ал кремний 1,57 % деңгейінде анықталынды. Осылайша, сазды енгізу фазалық түзуші элементтердің (Si және P) үлесінің айтарлықтай өсуіне әкеледі, бұл қосымша алюминий-фосфат және силикат қосылыстарының түзілуін көрсетеді.



3-сурет. Энергия дисперсиялық талдау (EDS) деректері бойынша элементтердің таралу картасы: бетон үлгілеріндегі Al, P, O

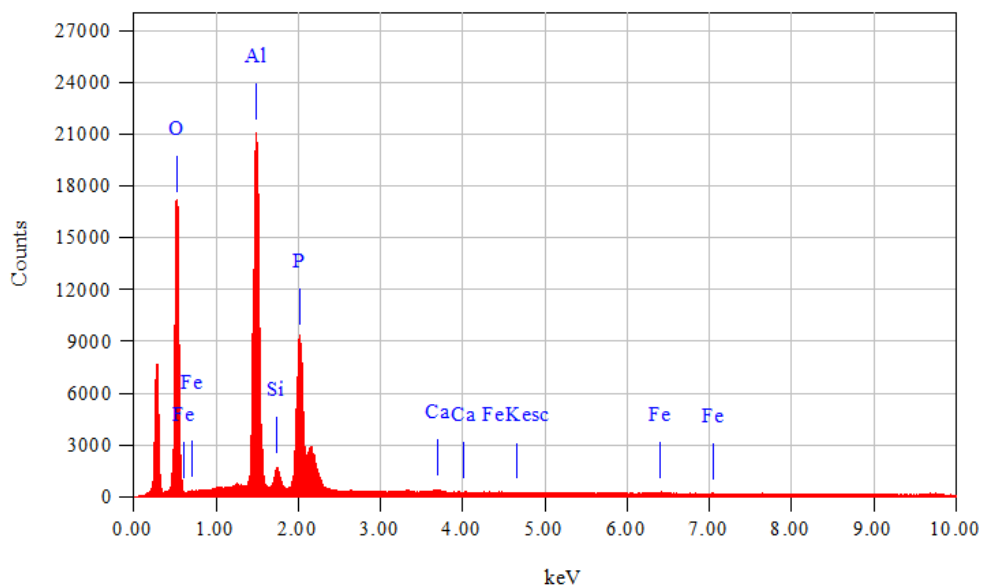
Ескерту – авторлармен құрастырылған

4-кесте. Корунд және АФБ негізіндегі отқа төзімді сазбен/сазбен қоспасыз бетон үлгілерінің энергия дисперсиялық талдау (EDS) нәтижелері

Үлгі сериясы	Элемент	Массалық үлесі, mass %	σ (статикалық қателігі)	Al-ге ара қатынасы
Бірінші серия (корунд + АФБ)	Al	21.08	± 0.06	1.000
	Si	1.57	± 0.02	0.075
	P	13.16	± 0.05	0.624
	O	63.42	± 0.13	3.010
Екінші серия (корунд + АФБ + отқа төзімді саз)	Al	26.83	± 0.14	1.00
	Si	2.23	± 0.07	0.083
	P	18.74	± 0.16	0.699
	O	51.07	± 0.10	1.900

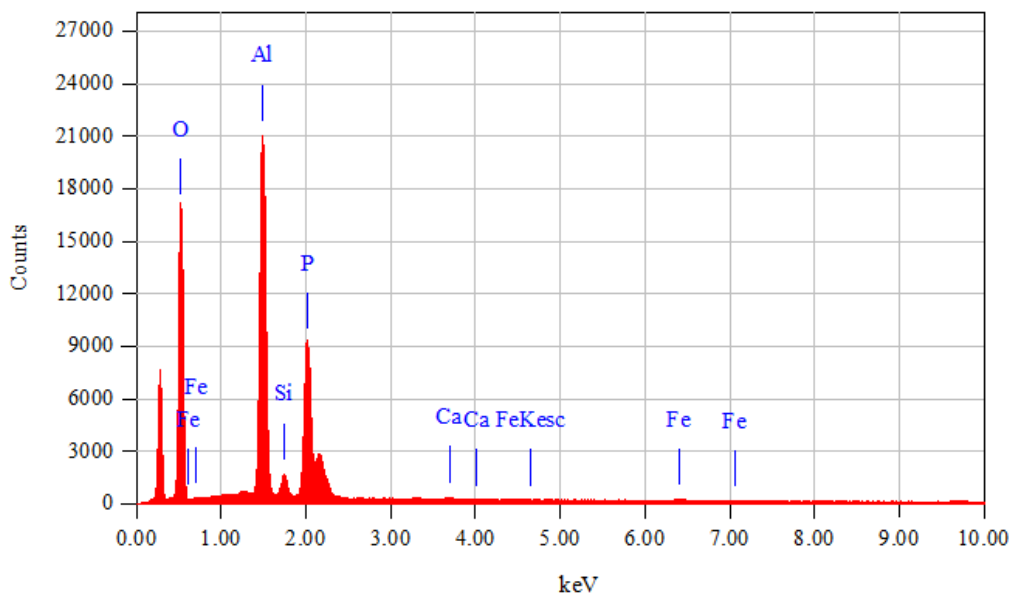
Ескерту – авторлармен құрастырылған

Бұл фазалардың болуы XRD-талдауының нәтижелеріне сәйкес келеді, мұнда екінші серия тұрақты құрылымдық қосылыстардың түзілуін көрсетеді. Бетон матрицасындағы фосфор мен кремнийдің көп болуы жоғары температуралық әсерлерде құрылымды тұрақтандыруға ықпал етеді, жарылуға бейімділікті төмендетеді және материалдың пайдалану төзімділігін арттырады. «Таза» (корунд+АФБ) құрамы оттегінің жоғары құрамымен және салыстырмалы түрде қарапайым фазалық құрамымен сипатталса, отқа төзімді саз қосылған серия фазалық және микроқұрылымдық ерекшеліктерін көрсете отырып, оның жақсартылған қасиеттерін айқындады.



4-сурет. Корунд және АФБ негізіндегі бетон үлгісінің энергия дисперсиялық (EDS) спектрі

Ескерту – авторлармен құрастырылған



5-сурет. Корунд, АФБ және отқа төзімді саз негізіндегі бетон үлгісінің энергия дисперсиялық (EDS) спектрі

Ескерту – авторлармен құрастырылған



НӘТИЖЕЛЕРДІ ТАЛҚЫЛАУ

Корундты отқа төзімді бетонның екі сериясын салыстырмалы талдау құрамдарды өзгерту оның физикалық-механикалық және пайдалану қасиеттеріне әсерін анықтауға мүмкіндік береді.

Ең алдымен, отқа төзімді сазды енгізу және алюминий-фосфат байланыстырғышы үлесінің төмендеуі бетонның қысу беріктігінің айтарлықтай артуына әкелді. Беріктіктің шамамен екі есеге артуын фазааралық өзара әрекеттесудің жақсаруымен түсіндіруге болады: саз құрылымдағы бос орындарды толтырады, ақауларды азайтады және материал ішіндегі жүктемелердің біркелкі таралуына ықпал етеді. Бұл алынған нәтиже алюминий-фосфаттық және алюминий-силикофосфаттық байланыстырғыштары бойынша заманауи зерттеулерге сәйкес келеді. Атап айтқанда, ғалымдар (Abyzov et al., 2024a) алюминий силикофосфаттық байланыстырғыштарын қолдану фосфатты бетондардың механикалық қасиеттерін едәуір жақсартуға және жоғары температураның әсері кезінде оларды тұрақтандыруға мүмкіндік беретіндігін анықтаған. Осылайша, ұсынылған құрамның микроқұрылымдық модификациясы бетонның көтергіш қабілетін едәуір арттыруға мүмкіндік берді.

Материалдың жылуға төзімділігі де өсті: екінші серияда үлгілер біріншіге қарағанда бір жылу ауысымына көбірек төтеп берді. Бұл нәтиже термиялық циклдегі ішкі кернеулердің төмендеуімен байланысты. Тығыз микроқұрылым температураның күрт өзгеруімен микрожарықшақтардың дамуына жол бермейді, ал отқа төзімді саздың болуы құрылымды тұрақтандыруға ықпал етеді. Демек, ұсынылған бетон құрамы жылу агрегаттарының футеровкасына тән температураның күрт өзгеруі жағдайында пайдалануға жақсы бейімделеді. Осындай тұжырымдар 1700 °C дейінгі температурада құрамдардың тұрақтылығын растайтын алюминий және алюминий силикаттық өнеркәсіптік қалдықтарға негізделген отқа төзімді фосфат желімін жасау бойынша жақында жүргізілген зерттеуде де (Abyzov et al., 2024b) анықталынды. Бұл циклдік жылу әсерінен олардың беріктігін арттыру үшін фосфаттық жүйелерде минералды қоспаларды қолданудың жоғары перспективасын растайды.

Микроқұрылымдық талдау құрамның өзгеруі мен материалдың ішкі ұйымдастырылуы арасындағы нақты корреляцияны көрсетті. Егер бірінші серияда саңылаулар мен гетерогенділік айқын байқалса, екіншісінде олар айтарлықтай азайып, құрылымы тығызырақ болды. Бұл сипаттама беріктік пен жылуға төзімділікті жақсартуға ықпал еткен құрамның өзгерісі екенін растайды. Ұқсас заңдылық цементсіз отқа төзімді бетондарға шолу жұмыстарында, атап айтқанда белсенді Al_2O_3 нанодисперсті SiO_2 -мен әрекеттескенде материалдың беріктігі мен жылуға төзімділігін арттыратын тұрақты муллит фазалары пайда болатыны (Pivinskii et al., 2020a) туралы атап өтілген. Зерттеулерімізде ұсынылған құрамда муллит негізгі фаза болмаса да, құрылымды тығыздау мен фазалық жүйені тұрақтандырудың байқалған әсерлері әдебиетте сипатталғанға ұқсас екенін атап өтуге болады.

Энергия дисперсиялық талдау (EDS) нәтижелерінен екінші сериялы үлгілердегі алюминий мен кремнийдің біркелкі таралуы кристалдық тордағы жергілікті кернеу концентрациясының төмендеуін көрсетеді, бұл өз кезегінде бетонның жоғары температураға төзімділігін арттырады. Бұл нәтиже отқа төзімді бетондарда минералды және техногендік қоспаларды қолдану туралы мәліметтермен байланысты тұрақты химиялық құрылымның қалыптасуы байқалатын (Shirani et al., 2021) жұмысқа сәйкес келеді.

Рентгендік фазалық талдау (XRD) негізгі кристалдық компонент ретінде отқа төзімділікті қамтамасыз ететін корунд болып қала беретінін растады. Алайда, екінші серия тұрақты фазалық қосылыстардың түзілуін тіркеді, бұл жоғары температура жағдайында



ұзақ уақыт жұмыс істегенде бетонның беріктігінің жақсаруына ықпал етеді. Аталған нәтиже балама гидравликалық байланыстырғыштар және модификациялаушы қоспаларды қолдану отқа төзімді фазалардың пайда болуына және отқа төзімді бетондардың ұзақ мерзімділігін арттыруға ықпал ететінін дәлеледеген зерттеушілердің (Pivinskii et al., 2020b) мәліметтеріне сәйкес келеді.

Алынған нәтижелер өзекті ғылыми тенденцияларға толық сәйкес келеді: отқа төзімді бетондардың құрамында қосымша минералды компоненттер мен өнеркәсіптік қалдықтарды пайдалану бір мезгілде пайдалану сипаттамаларын жақсартуға және технологияның экологиялық тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Дәстүрлі минералды толтырғыштар (шамот, муллит, жоғары глиноземді материалдар) қолданылған көптеген жарияланған жұмыстардан айырмашылығы, бұл зерттеуде алынған нәтижелердің практикалық маңыздылығы мен жаңашылдығын көрсететін техногендік корунд қолданылды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеулер техногендік корунд қалдықтары мен алюминий-фосфаттық байланыстырғыштарды пайдалану жоғары өнімділігімен сипатталатын отқа төзімді бетон алуға мүмкіндік беретінін көрсетті:

- орташа қысу беріктігі 30-35 МПа құрады, ал ең жақсы құрамдар 62-75 МПа дейін беріктікті көрсетті.

- 1000 °C температурада термиялық өңдеуден кейін беріктік 30-40 МПа деңгейінде сақталды, бұл бастапқы мәндердің 60 %-дан астамына сәйкес келеді.

- Үлгілердің бұзу жүктемесі 168 кН-ға жетті, материалдың тығыздығы шамамен 2,8-2,9 г/см³ құрады, суды сіңіру 6-7 %-дан аспады.

Сонымен, кешенді талдау отқа төзімді сазды енгізу арқылы құрамды модификациялау бірден келесі бірнеше артықшылықтар беретінін көрсетті:

- беріктіктің екі есе дерлік артуы;
- жылуға төзімділіктің артуы (бір жылу ауысымына);
- кеуектіліктің төмендеуі және тығыз микроқұрылымның қалыптасуы;
- негізгі элементтердің біркелкі таралуы;
- тұрақты фазалық қосылыстардың түзілуі.

Практикалық тұрғыдан алғанда, мұндай қасиеттер әзірленген корундтық отқа төзімді бетонды жоғары беріктік, жылулық циклге төзімділік пен ұзақ мерзімділіктің үйлесімі қажет болатын жылу агрегаттарының футеровкасында қолдануға арналған перспективалы материалға айналдырады. Техногендік корундты бастапқы шикізат ретінде пайдалану технологияның экономикалық және экологиялық тиімділігін арттырады, өйткені ол өндіріске өнеркәсіптік қалдықтарды қолдануға мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу сыртқы қаржыландыруды алған жоқ.

АЛҒЫС: Авторлар мақаланың сапасын жақсартуға ықпал еткен құнды ескертулер үшін анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар осы мақаланы әзірлеу барысында жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын, соның ішінде генеративті тілдік модельдерді пайдаланбағанын растайды. Барлық мәтіндік материалдар, деректер мен талдау нәтижелері авторлар тарапынан дербес дайындалды.



ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Chen, Sh. (2023). Review of heat resistant concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 2608, 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2608/1/012014>
- Otaqulov, B. (2025). Methods for Investigating the Physico-Mechanical Properties of Heat-Resistant Concrete. *International Journal of Artificial Intelligence*, 1(3), 337–340. <https://inlibrary.uz/index.php/ijai/article/view/80544>
- Абдрахимов, В.З., Абдрахимова, Е.С. (2021). Жаростойкий бетон на основе ортофосфорной кислоты, отходов цветной металлургии и химической промышленности. *Construction and Geotechnics*, 12(1), 72-85. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.1.06> // Abdrahimov, V.Z., Abdrahimova, E.S. (2021). Zharostojkij beton na osnove ortofosfornoj kisloty, othodov cvetnoj metallurgii i himicheskoy promyshlennosti. *Construction and Geotechnics*, 12(1), 72-85. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.1.06>
- Akimbekova, S., Aruova, L., Urkinbaeva, Zh., Nykiel, M. (2024). Heat-resistant concretes based on cement binders and waste from the metallurgical industry. *Technobius*, 4(4), 0068. <https://doi.org/10.54355/tbus/4.4.2024.0068>
- Ghosh, A., Sinhamahapatra, S., Tripathi, H.S. (2022). Refractories as Advanced Structural Materials for High Temperature Processing Industries. In: Bhattacharjee, D., Chakrabarti, S. (eds) *Future Landscape of Structural Materials in India*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8523-1_11
- Vlasov, A., Vlasova, E. (2021). On the technology of aluminosilicate and high-alumina phosphate hardening products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1015, 012088. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1015/1/012088>
- Tukhareli, V., Pushkarskaya, O., Tukhareli, A. (2018). Methodological approaches in assessing the possibility of using waste electrocorundum materials in concrete compositions. *Solid State Phenomena*, 284, 1030-1035. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.1030>
- Smirnova, O., Kazanskaya, L., Koplik, J., Tan, H., Gu, X. (2021). Concrete Based on Clinker-Free Cement: Selecting the Functional Unit for Environmental Assessment. *Sustainability*, 13, 135. <https://doi.org/10.3390/su13010135>
- Altynbekova, A., Lukpanov, R., Yenkebayev, S., Tsygulyov, D., Nurbayeva, M. (2022). Complex laboratory studies of modified additive influence on concrete physical and mechanical properties. *Geomate Journal*, 23(100), 26-33. <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/3641>
- Savina, L.K., Khonchik, I.V., Shulyk, I.G. (2024). Dependence of the properties of concrete samples from fireclay concrete mix before and after heat treatment on the amount of alumina cement and refractory clay additive. *Scientific Research on Refractories and Technical Ceramics*, 124, 41-53. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.124.05>
- Alimkulov, M., Apshikur, B., Goltsev, A., Chernavin, V., Chigambayev, T., Kunanbayev, A. (2025). Data-driven modeling and experimental validation of heat-resistant concrete for industrial furnace lining. *Vibroengineering Procedia*, 58, 354–360. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25013>
- Abyzov, V..A., Posadnova, N.E. (2024). Features of Hardening of Aluminosilicophosphate Binder in Cellular Concrete. *Construction Materials*, 1-2, 53-58. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-53-58>
- Abyzov, V.A., Posadnova, N.E. (2024). Development of Fire-Resistant Phosphate Adhesive Based on Alumina and Aluminosilicate Dispersed Industrial Waste. *Refract Ind Ceram*, 64, 550–554. <https://doi.org/10.1007/s11148-024-00888-4>
- Pivinskii, Y.E. (2020). Cement-Free Refractory Concretes. Part 4. Refractory Concretes based on Silica Sol Binders. *Refract Ind Ceram*, 61, 150–158. <https://doi.org/10.1007/s11148-020-00447-7>



- Shirani, K., Reisi, M., Savadkoohi, M.S. (2021). Eco-friendly High-Strength Refractory Concrete Containing Calcium Alumina Cement by Reusing Granite Waste as Aggregate. *Int J Concr Struct Mater*, 15, 48. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00483-8>
- Pivinskii, Y.E., Dyakin, P.V. (2020). Cement-Free Refractory Concretes. Part 5. Cement-Free Refractory Concretes Based on Hydraulic Alumina Binders. *Refract Ind Ceram*, 61, 374–383. <https://doi.org/10.1007/s11148-020-00489-x>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Серая Наталья Владимировна – химия ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Серая Наталья Владимировна – кандидат химических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Seraya Natalya Vladimirovna – Candidate of Chemical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: NSeraya@edu.ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7991-9129>



Чернавин Валерий Юрьевич – техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Чернавин Валерий Юрьевич – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Chernavin Valery Yurievich – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: VChernavin58@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2247-1458>



Даумова Гульжан Камалбеккызы – техника ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Даумова Гульжан Камалбеккызы – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Daumova Gulzhan Kamalbekkyzy – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: GDaumova@edu.ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6312-5343>



Миргородский Сергей Иванович – техника ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Миргородский Сергей Иванович – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Mirgorodsky Sergey Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: serg.mirg@yandex.ru,



Рамазанова Райгуль Амангельдиновна – техника ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Рамазанова Райгуль Амангельдиновна – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Ramazanova Raigul Amangeldinovna – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: RRamazanova@edu.ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6930-991X>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_130

FTAXP 44.41.31

ЭНЕРГИЯ ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ

TECHNOLOGICAL INSTALLATION FOR ENERGY PRODUCTION

К.К. Толубаева  ^{1*}, М. Камет  ²

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан,

²Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан

*Толубаева Канагат Камзановна, e-mail: KTolubaeva@edu.ektu.kz

Түйінді сөздер:

қондырғы, су, электр,
жылу, энергия, коллапс,
ротор, жылу
алмастырғыш.

ТҮЙІНДЕМЕ

Технологиялық қондырғының жұмыс қағидасы кавитация тудыратын асимметриялық сақиналы конденсациялық су коллапсының әсеріне негізделген. Технологиялық қондырғыны әзірлеудің негізгі мақсаты, ротордың жұмысын жақсарту және кавитацияны жылу энергиясын алу үшін қолдану. Жұмыс режиміне шыққаннан кейін, қолданыстағы электр қазандығымен салыстырғанда, технологиялық қондырғының көмегімен алынған жылу құны төмен болатынын көрсетті. Технологиялық қондырғының шығымы жарты жылда өтеледі. Энергия тапшылығы мен жеткізушілердің бағасының өсуіне, жылу және электр қуаты мен тұтыну көлемінің ұлғаюына байланысты, тұрақты электр энергиясының мен ыстық су өндіретін технологиялық қондырғының экспорттық әлеуеті жоғары болады. Технологиялық қондырғы жылу және электр энергиясын өндірудің бірегей көзі ретінде ұсынылады. Экология мен қоршаған ортаға зиян келтірместен, көмірсутек отындарын жақпай-ақ, тұтынушыларды электр энергиясымен және ыстық сумен қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Бірегей технологиялық қондырғының күтілетін экономикалық тиімділігі, техникалық, технологиялық, экологиялық және экономика жағынан жоғары деңгейде.

Ключевые слова:

установка, вода,
электричество, тепло,
энергия, коллапс, ротор,
теплообменник

АННОТАЦИЯ

Принцип работы технологической установки основан на воздействии асимметричного кольцевого конденсационного водяного коллапса, вызывающего кавитацию. Основная цель разработки технологической установки, совершенствование работы ротора и использовать кавитации для получения тепловой энергии. После выхода на рабочий режим, по сравнению с существующей электрической котельной показало, что полученное с помощью технологической установки стоимость тепла будет ниже. Выход технологической установки окупается за полгода. В связи с дефицитом энергии и ростом цен поставщиков, увеличением объемов тепловой и электрической энергии и потребления, экспортный потенциал технологической установки по производству устойчивой электроэнергии и горячей воды будет высоким. Технологическая установка предлагается как уникальный источник



производства тепловой и электрической энергии. Позволяет обеспечить потребителей электроэнергией и горячей водой, не нанося вреда экологии и окружающей среде, не сжигая углеводородное топливо. Ожидаемая экономическая эффективность уникальной технологической установки находится на высоком уровне в техническом, технологическом, экологическом и экономическом плане.

keywords:

installation, water,
electricity, heat, energy,
collapse, rotor, heat
exchanger

ABSTRACT

The principle of operation of the technological installation is based on the effect of asymmetric ring condensation water collapse, causing cavitation. The main objective of developing the technological installation is to improve the operation of the rotor and use cavitation to generate thermal energy. After reaching operating mode, a comparison with the existing electric boiler room showed that the cost of heat obtained using the technological installation would be lower. The technological installation pays for itself in six months. Due to energy shortages and rising supplier prices, increased heat and electricity volumes and consumption, the export potential of the technological facility for the production of sustainable electricity and hot water will be high. The technological installation is offered as a unique source of thermal and electrical energy production. It allows consumers to be supplied with electricity and hot water without harming the ecology and the environment and without burning hydrocarbon fuel. The expected economic efficiency of this unique technological installation is high in technical, technological, environmental and economic terms.

КІРІСПЕ

Мақалада динамикалық жылу электр генераторының технологиялық қондырғысында ыстық су мен электр энергиясын алу әдісі келтірілген.

Эксперименттік мәліметтер мен сандық модельдеудің нәтижелерін салыстыра отырып, тәжірибелік қосымшаларда гидродинамикалық кавитацияны қолдану аясын кеңейту ұсынылды. Алынған нәтижелерді модельдеу кезінде кавитаторлардың ықтимал ақаулары ескерілді. Жүргізілген зерттеулер кавитациялық саптамаларды әзірлеу үрдісін жеңілдетуге, гидродинамикалық шамаларын жылдам бағалауға, кавитацияны тәжірибеде қолдану үшін керек.

Сорғыларды жобалау кезінде сұйықтықтарды жоғары температурада өткізу үшін кавитациядан қорғау маңызды. Тұтынылатын энергия электр қозғалтқышының қуатынан емес, сұйықтықтың өзінен алынады немесе кавитация үрдісі кезде сұйықтықта сырттан пайда болады.

Көмірсутектерді қолданбай аз шығынмен ыстық су мен электр энергиясын алуға мүмкіндік беретін тәсілі қарастырылды. Ұсынылған технологиялық қондырғыда кавитациядан қорғалған гидроролик сорғысы орнатылған. Ротордың сорғысында қалақшалар ретінде жоғары жылдамдықпен айналатын гидравликалық ролик қолданылады. Су қарқынды айналғанда, яғни кернеуі теріс созылған күйде болады. Суды терең тазарту жүйесін жасаған кезінде, су созылады бірақ нашар қысылады.

Жетектің гидравликалық дистрибьюторында кавитациялық құбылыстардың болуы атқарушы гидравликалық қозғалтқыштың жоғары жылдамдықтары мен үдеулеріне, гидравликалық қозғалтқыштағы қысым айырмашылықтарының 0-ден 70 пайызға дейінгі диапазонындағы уақыт бойынша өзгертін жүктемеден тәуелсіз болды. Ағынды тұрақтандырудың әсері, талданатын құрылғылардың ағынды бөлігінде болатын



гидродинамикалық кавитацияның құбылыстарымен анықталатынын (Уколов және басқ., 2018) жазылған.

Энергия ресурстарын үнемдей отырып көмірсутектерді пайдаланбай ыстық су мен электр энергиясын алуға мүмкіндік беретін технологиялық қондырғыны ұсыну мақсатында осы мәселелер ұқсас ғылыми жұмыстар қарастырылды. Технологиялық құбырларды, гидравликалық жүйелер мен құрылғыларды құрастырумен, сынаумен және пайдаланумен айналысатын инженерлік-техникалық және ғылыми қызметкерлерге арналған.

Әдеби шолу. Кавитацияны зерттейтін эксперименттік қондырғылар туралы және гидравликалық кедергілердің түрлерінде кавитацияның пайда болуы жайлы (Arzumonov, 1978) жазылған.

Гидродинамикалық кавитацияның реактивті элементтердегі ағынды тұрақтандыру әсері және кавитация саны, модельдеу, ағынды тұрақтандыру, кавитациялық құбылыстың пайда болуы (Brennen, 1995; Федоткин және басқ., 2000) сипатталған. Кавитация кезінде пайда болатын шу және эрозиялық бұзылуы. қысымның жоғарылауы, материалдың бұзылуы көрсетілген. Кавитация гидравликалық машиналарда, сорғылар мен гидротурбиналарда, жылдам айналатын винттердің қалақтарында пайдалы әсер ету коэффициентінің төмендеуіне, кавитацияға ұшыраған бөліктерінің жойылуына әкеледіні талданған.

Кавитация әсерінің құрылғыдан шығу кезінде ағынды тұрақтандыру құбылысы және құрылғылардың жұмыс ерекшеліктері жазылған. Ағынды реттеу және құрылғының кавитация құбылысы (Brennen, 2014) сипатталған. Гидравликалық жетектегі ағынды тұрақтандыру тәсілі (Goroshkov және басқ., 1969) баяндалған. Құрылғыдағы қысым және кавитациялық ағындардың әсері (Gamynin, 1975; Pernik, 1966) жұмыстарда көрсетілген Эксперимент түрінде зерттеулер (Pearsall, 1972) жүргізіліп, бағдарлама көмегімен кавитацияның көріну аймақтарындағы ауытқуларға, эксперименттік болжамды деректерге кавитаторлардың сапасына және кавитациялық ағынға модельдеу арқылы талдау жүргізген. Кавитация құбылысын энергияның концентрациясы арқылы химиялық реакцияларды жылдамдату үшін (Osherovsky, 1970) қолданып, эксперименттік тұрғыдан кавитациялық көпіршіктер құлағанда сұйықтықтың кавитациялық қызатынын дәлелдеген. Қауіпсіз құрылғыларды модельдеу мақсатында, сұйықтықтың құйынды қозғалысының энергиясын жылуға айналдыр (Ахметов және басқ., 2012; Vivek және басқ., 2022) әдістері ұсынылған. Көпіршік динамикасы мен кавитациямен байланысты маңызды физикалық үрдістерді сипаттайтын, ағындарды зерттейтін нұсқаулықта (Бочаров және басқ., 1987; Некрасов 1967). сұйық пен тұрақты жүйелердегі көпіршіктердің динамикасын, өсуі, құлауы және тербелісі талқылаған.

Кавитациялық түрлендіргіштердің алғашқы тиімді модельдерінің бірі Григгс генераторы, ол бетінде тесіктері жоқ дискілі роторды қолданды. Айналмалы типтегі қондырғыларды қолдану күрделі, дәл калибрлеу және жұмыс кезінде геометриялық шамаларды сақтауды қажет. Кавитациялық жылу генераторлары қорап пен тетікбөлшектердің кавитациялық эрозиясына байланысты қызмет ету мерзімі 2-4 жыл. Жұмыс істегенде шу болады. Модельдің артықшылығы классикалық жылытқыштарға қарағанда өнімділігі 25 %.

Ю.С. Потаповтың молекулалық қозғалтқышы мен құйынды жылу генераторы Стирлинг қозғалтқышының тиімділігінен екі есе көп тиімділікпен отынсыз ауада және суда автономды жұмыс істейтіні ашық ақпарат көздерінде баяндалған.

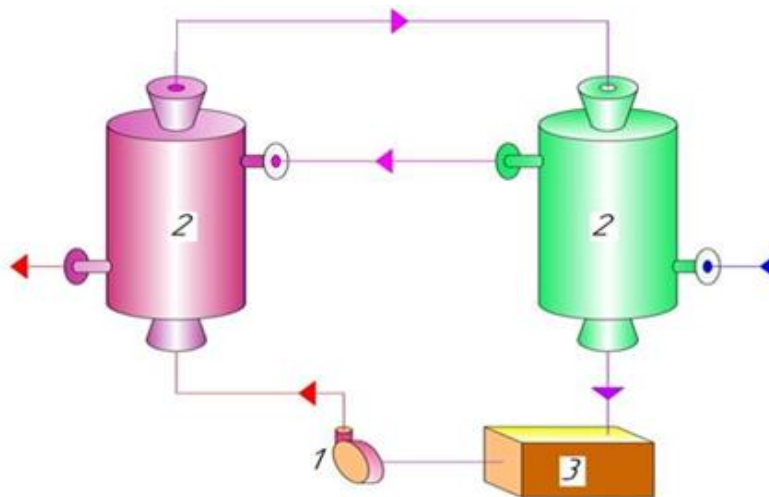
Ауада және суда жұмыс істейтін жылу электр станциясы отын үнемдеуді, қала жағдайында жылу трассаларын жөндеу және оларды төсеу мәселесін шешеді. Орталықтандырылмаған жылыту және ыстық сумен жабдықтау мемлекетке пайдалы.



ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Технологиялық қондырғы жабық жүйедегі ыстық сумен жабдықтайтын екі тізбекті бірлік болып табылады (Tolubayeva және басқ., 2024). Бірінші тізбекте арнайы дайындалған технологиялық су айналады. Қондырғының осы тізбегіне арнайы дайындалған технологиялық су құйылып баяу қыздырылады. Электр қозғалтқышының іске қосуға жұмсалатын қуаты шамамен 18кВт. Тізбегі технологиялық су температурасы 60 °С жеткеннен соң, су температурасы күрт көтеріле бастайды. Іске қосатын электр қозғалтқышына орнатылған ваттметр көрсеткісі 3,6 кВт-қа дейін түседі. Осы кезде екінші тізбекке су табиғи көзінен немесе орталықтандырылған жүйеден суық су беріледі. сонда қондырғы жылу бөле отырып, басқа қуатпен 76 кВт жұмыс істей бастайды.

Қондырғы жұмыс режиміне шыққан кезде генератордың роторы өзінің электр энергиясын өндіре бастайды, автоматты режимде жұмыс істей отырып, жылу және электр энергиясын өндіреді. Қондырғы жұмыс режиміне шыққан кезде іске қосу электр қозғалтқышының қуаты автоматты түрде тоқтан ажыратылады. Екі тізбекті қондырғының ораласу үлгісі 1-ші суретте көрсетілген.



1-сурет. Екі тізбекті қондырғы: 1-циркуляциялық сорғы;
2-жылу алмастырғыш; 3-араластырғыш бак)

Ескерту – автормен құрастырылған

Жылу және электр энергиясын өндіру үшін технологиялық қондырғыға суық су құйып, қыздырамыз. Технологиялық қондырғыда айналым сорғысы кавитациядан қорғалған. Сорғының соратын жеріндегі ағымдағы ағындар, су температурасы қандай болса да белгіленген деңгейге жетуге мүмкіндік береді.

Термодинамикадағы энергияның сақталу заңы бойынша сорғының электр қозғалтқышы бірдей қуатты тұтынуы керек. Егер жүйенің құрамындағы электр қозғалтқышының электр қуаты жүйеден шығатын энергия мөлшері мен желілік суға берілетін жылу мөлшері белгілі болса, онда бұл екі шама шығындарды бірге есептегенде сәйкес келуі керек

Сорғы айдалатын сұйықтықта жұмыс істеу үрдісінде бұрын ескерілмеген энергияның бөлінуі басталады және бұл энергия сұйықтықты жылытуға жұмсалады, содан кейін сорғы жұмыс істеген кезде алынған жылу энергиясының мөлшері электр қозғалтқышы жұмсайтын электр энергиясының мөлшерінен артық болады.

Сұйықтықты айдау кезінде қосымша энергия пайда болады. Сорғыда сұйықтық су мен сорғының құрылымдық элементтері арасындағы үйкеліс арқылы қызады.



Сұйықтықтағы қысымның өзгеруі оның термодинамикалық қызуына әкеледі. Сұйықтықты жылыту үшін электр қозғалтқышының энергиясы жұмсалады. Термодинамикалық параметрлерді қайта бөлу арқылы сұйықтықты айдау кезінде сыртқы энергия жұмсалмайды, конверсия еселігі бірліктен үлкен, кавитация энергиясы пайда болады.

Кавитациядан қорғау сұйықтықтарды жоғары температурада айдау үшін сорғыларды жобалау кезінде маңызды. Тұтынылатын энергия жетек электр қозғалтқышының қуатынан емес, сұйықтықтың өзінен алынады немесе кавитация процесі пайда болған кезде сұйықтыққа сырттан түседі. Биіктігі 1,5 м су дифференциалды манометрі алынды. түтіктің сыртқы диаметрі 10 мм, ішкі диаметрі 8 мм болды. дифманометрге нөлдік белгі бойынша су құйылды және Камовский сорғысы қолданылды, ол бірдей разряд пен ауа қысымын тудырады және шағын, жақсы бақыланатын ауа ағынына ие. Дифманометр шлангісін сорғының айдау фитингіне қосқан кезде дифманометрдегі су деңгейі оның сол жақ тармағында көтеріліп, оң жақ тармағында төмен түсіп, биіктіктер тең болды.

Биіктігі 1,5 м су дифференциалды манометрі алынды. түтіктің сыртқы диаметрі 10 мм, ішкі диаметрі 8 мм болды. дифманометрге нөлдік белгі бойынша су құйылды және Камовский сорғысы қолданылды, ол бірдей разряд пен ауа қысымын тудырады және шағын, жақсы бақыланатын ауа ағынына ие. Дифманометр шлангісін сорғының айдау фитингіне қосқан кезде дифманометрдегі су деңгейі оның сол жақ тармағында көтеріліп, оң жақ тармағында төмен түсіп, биіктіктер тең болды.

Дифманометр шлангісін оң жақ тармақтағы разряд фитингіне қосқанда, деңгей көтеріліп, сол жақта төмендеді және H_1 биіктігі 10÷30% H_2 биіктігінен жоғары болды. Дифманометр түтігінің ішкі диаметрі өзгермегендіктен, бұл жағдайда сұйықтықтың созылуына байланысты дифманометрдің оң жақ тармағындағы сұйықтық көлемінің ұлғаюы туралы айтуға болады. Судан шығатын ауа көпіршіктері байқалмады. Сұйықтықтың сығылуының төмен мәндерінде ол теріс кернеу күйінде болады, яғни ол созылады.

Теріс кернеу жағдайында судың тұтқырлықтың айқын анизотропиясы бар екендігі эксперименталды түрде анықталды. Гидроролик айналғанда су қабаттары арасында тангенциалды бағытта үйкеліс болмайды. Теріс кернеу жағдайында суды бұралу қарқындылығының өте жоғары мәндеріне айналдыруға болады. Бұл гидро роликті сорғыны дамытуға мүмкіндік береді. Гидравликалық роликті мойынтірек біліктің диаметрі 0,2-ден 4 метрге дейінгі кез-келген жүктеме мен біліктің айналу сандарында жұмыс істейді. Өзін-өзі орталықтандыратын мойынтірек тозбайды және майлауды қажет етпейді.

Гидророликтің көрсетілген сандарымен су қатты дененің қасиеттеріне ие болады. Гравитациялық күштердің әсерінен 1 литр судың салмағы 1 кг немесе 9,81 Н, ал дене салмағы:

$$P_i = V \cdot \rho_w \cdot g \quad (1)$$

мұндағы V – дене көлемі;

ρ_b – судың тығыздығы;

$g = 9,81$ м/сек².

Центрифугалық өрісте кернеу мәні центрифугалық үдеу болып табылады:

$$g = C_2 \varphi / R \quad (2)$$

мұндағы C_φ – айналмалы жылдамдық;

R – айналу шеңберінің радиусы.

Гидро роликті сорғы үшін технологиялық қондырғы, роликтің диаметрі 0,028 м және гидророликтің айналу саны 40 000 айн / мин, айналу жылдамдығы:



$$C\varphi = \frac{\pi \cdot 0.028m \cdot 40.000}{60} = 58,6 \text{ м/сек}$$

Центрифугалық үдеу $245\,282 \text{ м/сек}^2$ құрайды, бұл гравитациялық үдеуден 25000 есе үлкен және мұндай гидророликтің салмағы, оның диаметрі 0,028 м және ұзындығы цент= 0,4 м орталықтан тепкіш күштер өрісінде:

$$g = \frac{58.6^2}{0.028} = 245.285 \text{ м/с}^2$$

$$V = \pi \frac{Dr^2}{4} \cdot l = \pi \cdot \frac{(0.028)^2}{4} \cdot 0.4 = 0.000248 \text{ м}^3$$

$$P_i = V \cdot \rho_w \cdot g = 0.00028 \text{ м}^3 \cdot 1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 245,282 \text{ м/с}^2 = 60,382 \text{ Н}$$

Гравитациялық күштер өрісінде мұндай роликтің салмағы 2,41 Н болады.

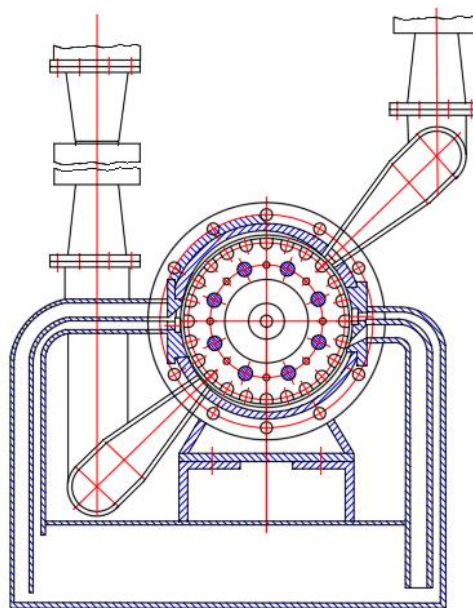
Гидророликтің центрифугалық күштер өрісіндегі салмағы 60382н гравитациялық күштер өрісіне ауысады, мұндағы үдеу $9,81 \text{ м/сек}^2$, содан кейін бұл гидророликтің массасы 6 155 кг болады, ал гидророликтің көлемі:

$V = \pi \cdot Dr^2 / 4 \times \ell = 0.000248 \text{ м}^3$ а масса - это $m = V \cdot \rho_w$, роликтің тығыздығы $25\,020\,325 \text{ кг/м}^3$.

Үш өлшемді кеңістікте гравитациялық күштер массаның болуына байланысты және кеңістік-уақыт қисықтығын тудырады және Эйнштейн теңдеулерімен анықталады. Технологиялық қондырғы элементтері центрифугалық және гравитациялық күштер өрісінде жұмыс істейтін бірнеше өрісті жүйелерде болатын құбылыстар.

Гидроролик сорғысында судың тығыздығы 1000 кг/м^3 , гидроролик бір сәтке материалдың қасиеттерін алады, болаттан үш мың есе тығыз немесе инерциялық жалған тығыздау эффектісі деп аталатын тығыздығы бар материал ретінде әрекет етеді.

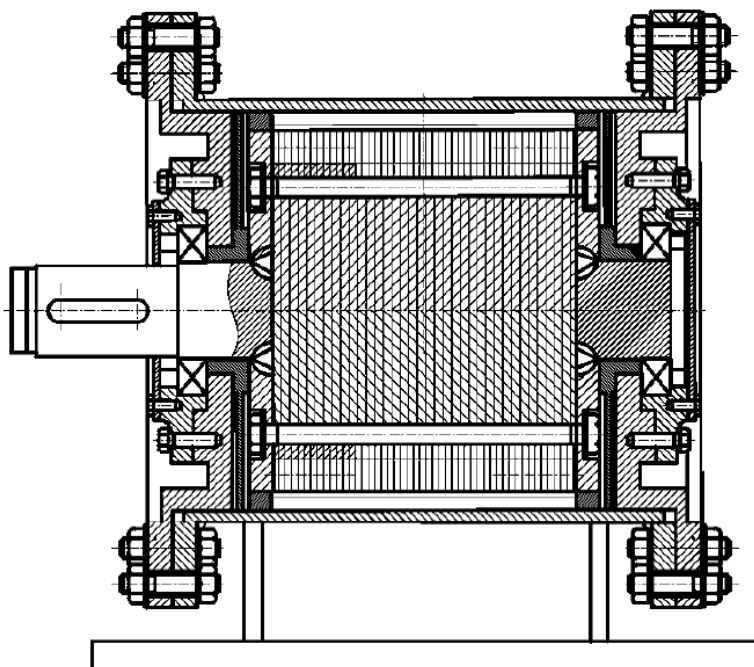
Классикалық, кәдімгі сорғы, асимметриялық сақиналы конденсация коллапсы, жұмыс аймағында шекаралық қабаттың болуы, жылу қондырғылары, конденсация және бу көпіршіктерінің құлауы – гидророликтер олардың корпустары мен ротор қалақтарының жұмыс беттерінде қарқынды эрозияға, тозуға, жұмыс беттерінің бұзылуына және жабдықтың тұтастай істен шығуына әкеледі. Коллапциялық динамикалық Жылу генераторы 2-ші суретте көрсетілген.



2-сурет. Динамикалық жылу генераторы

Ескерту – автормен құрастырылған

Кавитацияның қораптың жұмыс беттеріне және генератор роторының қалақтарына зиянды әсері толығымен алынып тасталды. Жоғары технологияларды, ғылыми-техникалық әзірлемелер мен сындарлы шешімдерді қолдану есебінен шекаралық қабаттың салдары жойылып, жылу және электр энергиясын тиімді алуға бағытталды. Көлденең қимасы бар жылу электр генераторының жалпы түрі 3-ші суретте көрсетілген.



3-сурет. Көлденең қимасы бар жылу электр генераторының жалпы түрі
Ескерту – автормен құрастырылған

Тік сызықты құлау камералары бар ротор негізгі орнату түйіні болып табылады. Тот баспайтын болаттан жасалған ротор бөлек дискілерден жиналады, олардың арасында электр оқшаулағыш тығыздағыштар бар. Дискілер шпилькалармен бекітіледі, олар сонымен қатар дискілердің металынан электр оқшаулағыш втулкалармен бөлінеді. Технологиялық су жылу электр генераторының бірінші тізбегіне құйылған, мономолекулалық құрылымы бар толығымен тұзсыздандырылған су. Су 33 изотоптан тұрады. Изотоптардың әрқайсысының молекуласында меншікті тербелістердің (тербелістердің) жеке жиілігі болады. Сақиналы конденсациялық коллапс процесін жүзеге асыру үшін, атап айтқанда, бұл процесс жылу электр генераторындағы жылу энергиясының негізгі шығымын береді, меншікті тербеліс жиілігі бірдей молекулалары бар су құрылымы қажет. Бір литр кәдімгі су шамамен 340 мл құрайды. моноқұрылымды су. Суды алудың технологиялық цикліне арнайы пішінді ыдыстарда бидистилдеу және мұздату кіреді. Мұздату белгілі бір температура аралығында жүзеге асырылады, содан кейін алынған мұздың қажетті бөлігі бөлінеді. Бұл су дистиллят сияқты диэлектрик.

Ротор камераларында судың құйылуы кезінде ротор материалы қатты электрленеді, трибоэлектрлік әсер береді, ротор электр конденсаторы сияқты, онда қуатты электростатикалық заряд жиналады. Су мен ротор материалының заряды бірдей болғандықтан, біраз уақыттан кейін су мен ротор материалының жанасуы, судың құлау камерасы бойымен қозғалуы тоқтайды. Байланыс микро-электростатикалық қабат арқылы жүзеге асырылады, су мен ротор материалы арасындағы үйкелісті жояды. Бұл факт



камералардың қабырғалы құлау аймақтарында шекаралық қабаттың пайда болуына және дамуына жол бермейді және гидрореликтерге кез-келген айналыммен айналуға мүмкіндік береді, яғни айналу микро-электростатикалық жастықта жүреді. Су мен электростатикалық жастық арасында үйкеліс болмайды.

Ротор қозғалтқыштан, бензо-дизель генератордан немесе айналу саны 3000 айн/мин электр қозғалтқышынан айналады. айналым роторда орналасқан құлау камераларында бірінші тізбектің технологиялық, жұмыс суының қарқынды қызуы жүреді, ол екі тізбекті инерциялық-құйынды жылу алмастырғыштарға түсіп, жылу алмастырғыштардың қабырғасындағы температура градиентіне байланысты екінші тізбектің желілік суын қыздырады. Циркуляционных камераларының құлауындағы технологиялық судың қозғалысы кезінде ротордың материалы қатты электрленеді. Трибоэлектрик әсер пайда болады. Ротор-қуатты электростатикалық заряд жиналатын электр конденсаторы.

Орнатудың прототипін сынау кезінде келесі параметрлер алынды:

- бірінші контурдағы судың максималды температурасы -118 °C;
- бастапқы судың қысымы -6,2 ата;
- қыздырылған желілік судың температурасы - 92 °C;
- желілік судың қысымы - 1 ата.

Қондырғының бірінші тізбегінде әлі жұмыс суы болмаған кезде іске қосу электр қозғалтқышының бос жүріс кезінде жұмсайтын қуаты $N = 4,6 \text{ кВт} - 4,8 \text{ кВт}$. Технологиялық қондырғының келесі негізгі элементі инерциялық құйынды жылу алмастырғыш.

Салқындатқыш-жылу генераторының бірінші тізбегінің суы жылу алмастырғышқа көрсеткісі бойынша, қатты бұралған күйде түседі. Содан кейін салқындатқыштың қозғалысы айнымалы қадаммен бұрандалы кірістіру арқылы жүреді, яғни ағынның бұралу бұрышы өзгереді. Салқындатқыштың қозғалысы ауыспалы бұрыштық үдеумен жүреді. Мұндай ағым жалған тығыздау әсерінің күрт өсуіне әкеледі және осы кезде жылу беру коэффициентінің айтарлықтай өсуіне әкеледі, бірінші тізбектің суынан жылу беру бетіне дейін. Жазық параллель ағын үшін судан қабырғаға жылу беру коэффициентін жеңілдетілген тәуелділіктен бағалауға болады:

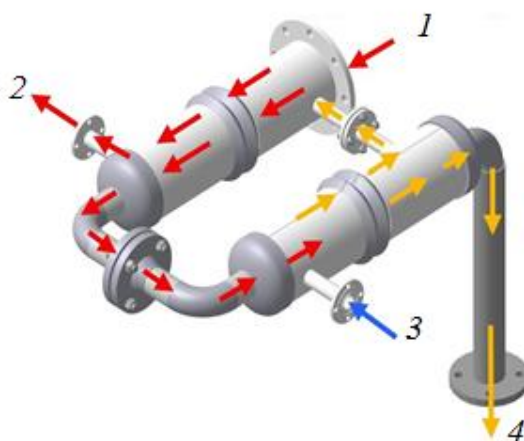
$$\alpha = 350 + 2100\sqrt{V} \quad (3)$$

мұндағы судың жылдамдығы $15 \text{ м/сек.} = 8483 \text{ Вт/м}^2$.

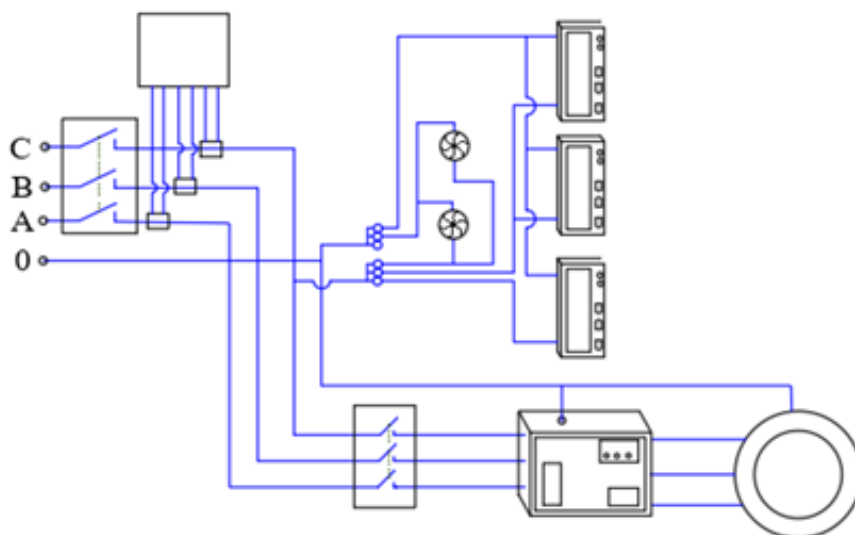
Айнымалы бұралу бұрышы бар сұйықтықтың бұралған ағындарында жылу алмасу тиімділігі 3÷4 есе артады (эксперименттік деректер). Сондықтан ішкі диаметрі 0,1 м және ұзындығы 1,0 м болатын бетінен салқындатқыш пен желілік су арасындағы орташа температура айырмашылығы 300-ге тең болса, $280\,000 \text{ Ккал/сағ}$ немесе 325 кВт/сағ дейін жылуды алып тастауға болады.

Жылу электр генераторында төрт жылу алмастырғыш орнатылған. Жылу алмастырғыштар толығымен алюминийден жасалған $\delta=4$. Қолданыстағы қаттылық шеттері жылу алмастырғыштарға 12 ата дейін жұмыс істеуге жеткілікті беріктік сипаттамаларына ие болуға мүмкіндік береді. Жинақтағы инерциялық құйынды жылу алмастырғыш 4-ші суретте көрсетілген. Жылу алмастырғыштарға желілік судың түсуі көрсеткі бойынша, $50\text{ °C} = 60\text{ °C}$ температурада, ал $90\text{ °C} - 95\text{ °C}$ температурада шығады.

Стандарт тарату қалқандары бар нысандарды электр қондырғысына ультра төмен немесе төмен кернеулі электр энергиясын беру үшін пайдаланылатын автономды электр желілері үшін қауіпсіздік пен орнату талаптарын белгілейді. Генератордың электр тізбегі 5-ші суретте көрсетілген.



4-сурет. Инерциялық құйынды жылу алмастырғыш
(мұндағы, 1-жылу электр генераторы; 2-ЫСЖ желісі; 3-С/С желісі; 4-араластырғыш бак)
Ескерту – автормен құрастырылған



5-сурет. Генераторды қосудың электр тізбегі
Ескерту – автормен құрастырылған

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Тәжірибелік қондырғыда эксперименттік нәтиже алынды, энергияны түрлендіру коэффициенті $K=21,43$ тең болды. Электр қазандығына қарағанда бірнеше есе тиімді екенін көрсетеді.

Кәдімгі электр қазандығында 75 кВт жылу қуатын алу үшін, 75 кВт электр қуатын жұмсау қажет (қазандықтың тиімділігін қоспағанда). Орташа 3,5 кВт электр энергиясын тұтынатын ұсынылған қондырғы орташа есеппен 75 кВт жылу энергиясын (немесе 64500 ккал/сағ) берді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Технологиялық қондырғы энергетика саласына, атап айтқанда жылу энергиясын электр энергиясына айналдыратын құрылғыларға жатады. Электр энергиясының тапшылығы жағдайында өте тиімді, үнемді және қоршаған ортаға әсері өте аз.



Технологиялық қондырғының артықшылығы:

- дәстүрлі отын түрлерін қолданбай ыстық су, жылу және электр энергиясын алу;
- кез-келген жеке тұрған ғимараттарды, әкімшілік, тұрғын ғимараттар кешендерін, коттедждерді, мектепке дейінгі және мектеп мекемелерін, ауруханаларды, орталық жылумен жабдықтау көздерінен алыс өнеркәсіптік, ауыл шаруашылығы және әскери нысандарды ыстық сумен, жылу және электр энергиясымен қамтамасыз ету;
- тұтынушыларға тұрақты, автономды, жылжымалы ыстық сумен жабдықтауды, жылу және электр энергиясының шығыны аз жылу және электр энергиясын жеткізу;
- технологиялық қондырғының көмегімен жылыту құны кәдімгі электр қазандығының жұмысынан 20 есе төмен;
- барлық көмірсутектерді (қатты, сұйық және газ тәрізділерді) қолданбау, атмосфераны зиянды қалдықтардан сақтау негізгі экологиялық мәселелерді шешу.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Мақала ШҚО бойынша шағын ЭКСПО-2014 көрмесі аясында "Болашақ энергиясы" инновациялық жобалар байқауының аясында дайындалды.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: ШҚО «Экологиялық қауіпсіздік орталығы» ЖШС жетекші маманы Филиппов Анатолий Александровқа зерттеуге қажетті ұсынымдар мен сынақ жұмыстарына көмектескені үшін алғысымды білдіремін.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Arzumanov, E. S. (1978). Cavitation in local hydraulic resistances. Moscow: Energia. 304 p.
- Brennen, C. E. (1995). Cavitation and bubble dynamics. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760> Available at: https://www.researchgate.net/publication/36721045_Cavitation_and_Bubble_Dynamics
- Brennen, C. E. (2014). Cavitation and bubble dynamics. Cambridge. 249 p.
- Goroshkov, A. S., & Goncharov, V. K. (1969). Emergence of qubit in liquid. Proceedings of the Acoustic Institute, VI, 30–38.
- Gamynin, N. S. (1975). Hydraulic drive of control systems. Moscow: Mashinostroenie. 376 p.
- Pernik, A. D. (1966). Problems of cavitation (2nd ed.). Leningrad.
- Pearsall, I. S. (1972). Cavitation. Mills & Boon. 80 p.
- Oshеровsky, S. H. (1970). Cavitation in generators. Energetika i elektrifikatsiya, (1).
- Ranade, V. V., Bhandari, V. M., & Nagarajan, S. (2022). Hydrodynamic cavitation: Devices, design and applications. India.
- Tolubayeva, K. K., & Blinaeva, E. V. (2024). Development of an ecologically clean technological unit for heat and electric power generation. News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences, 6(467), 167–181. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.468> Available at: <https://www.scopus.com/pages/publications/85219029046>
- Ахметов, Ю. М., Калимуллин, Р. Р., Константинов, С. Ю., Хакимов, Р. Ф., & Целищев, Д. В. (2012). Исследование гидродинамических и термодинамических процессов высоконапорного многофазного вихревого течения жидкости // Axmetov, Yu. M., Kalimullin, R. R., Konstantinov, S. Yu., Khakimov, R. F., & Tselishchev, D. V. (2012). Issledovanie gidrodynamiceskikh i termodinamicheskikh protsessov vysokonapornogo mnogofaznogo vykhrevogo techeniya zhidkosti [Study of hydrodynamic and



- thermodynamic processes of high-pressure multiphase vortex fluid flow]. Vestnik UGATU, 16(2), 163–168. (In Russ.)
- Бочаров, В. П. и др. (1987). Расчет и проектирование устройств гидравлической струйной техники. Киев: Техника. // Bocharov, V. P., et al. (1987). Raschet i proektirovanie ustroystv gidravlicheskoй struynoy tekhniki [Design of hydraulic jet devices]. Kiev: Tekhnika. (In Russ.)
- Пермяков, Г. С., & Целищев, Д. В. (2010). Исследование эффекта стабилизации расхода в струйных элементах // Permyakov, G. S., & Tselishchev, D. V. (2010). Issledovanie effekta stabilizatsii raskhoda v struynykh elementakh [Study of flow stabilization effect in jet elements]. Vestnik UGATU, 14(2), 21–29. (In Russ.)
- Промтов, М. А., & Акулин, В. В. (2006). Механизмы генерирования тепла в роторном импульсном аппарате // Promtov, M. A., & Akulin, V. V. (2006). Mekhanizmy generirovaniya tepla v roternom impulsnom apparate [Mechanisms of heat generation in rotary impulse device]. Vestnik TGTU, 12(2A), 364–369. (In Russ.)
- Промтов, М. А. (2008). Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Promtov, M. A. (2008). Perspektivy primeneniya kavitatsionnykh tekhnologiy dlya intensivatsii khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Prospects of cavitation technologies in intensifying chemical processes]. Vestnik TGTU, (4), 861–869. (In Russ.)
- Уколов, А. И., & Родионов, В. П. (2018). Верификация результатов численного моделирования и экспериментальных данных влияния кавитации на гидродинамические характеристики струйного потока // Ukolov, A. I., & Rodionov, V. P. (2018). Verifikatsiya rezultatov chislenного modelirovaniya i eksperimental'nykh dannykh vliyaniya kavitatsii na gidrodynamichekіe kharakteristiki struynogo potoka [Verification of numerical and experimental data on cavitation influence]. Vestnik MSTU im. N. E. Bauman. Ser. Estestvennye nauki, (4). (In Russ.)
- Федоткин, И. М., & Гулый, И. С. (2000). Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Ч. 2. Киев: АО «ОКО». // Fedotkin, I. M., & Gulyu, I. S. (2000). Kavitatsiya, kavitatsionnaya tekhnika i tekhnologiya, ikh ispol'zovanie v promyshlennosti. Ch. 2 [Cavitation, equipment and technology: Part 2]. Kiev: AO "OKO". (In Russ.)
- Целищев, В. А., & Целищев, Д. В. (2004). Состояние и проблемы разработки струйных гидравлических рулевых машин // Tselishchev, V. A., & Tselishchev, D. V. (2004). Sostoyanie i problemy razrabotki struynykh gidravlicheskih rulevykh mashin [Status and problems of jet hydraulic steering machine development]. Vestnik UGATU, 5(2), 89–98. (In Russ.)
- Целищев, В.А., & Целищев, Д.В. (2006). Гидравлическая машина со струйно-кавитационным регулированием // Tselishchev, V.A., & Tselishchev, D.V. (2006). Gidravlicheskaya mashina so struyno-kavitatsionnym regulirovaniem [Hydraulic machine with jet-cavitation regulation]. Vestnik UGATU, 7(2), 160–165. (In Russ.)



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Толубаева Канагат Камзановна – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Толубаева Канагат Камзановна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Tolubayeva Kanagat Kamzanovna – Candidate of Technical Sciences. associate professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: KTolubayeva@edu.ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4957-4674>.



Камет Мадина – PhD, Ғылыми-гуманитарлық ғылымдар мектебінің ғылыми қызметкері, Назарбаев Университеті, Астана қ., Қазақстан

Камет Мадина – PhD, научный сотрудник Школы естественных и гуманитарных наук Назарбаев Университета, г. Астана, Казахстан

Kamet Madina – Candidate of PhD in Mathematics, Research Assistant, School of Sciences and Humanities, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

ORCID <https://orcid.org/0009-0007-6970-8786>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_142

IRSTI 20.53.23

FILM BUSINESS PROCESSES AND AUDIO ENGINEERING PRINCIPLES IN THE CONSTRUCTION OF ANIMATED MEDIA

АНИМАЦИЯЛЫҚ МЕДИА ӨНДІРІСІНДЕГІ КИНО БИЗНЕС- ПРОЦЕСТЕРДІ ҚОЛДАНУ МЕН АУДИОИНЖЕНЕРИЯ ПРИНЦИПТЕРІ

КИНОПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССЫ И ПРИНЦИПЫ АУДИОИНЖЕНЕРИИ В СОЗДАНИИ АНИМАЦИОННЫХ МЕДИА

A. Aidarbekov ^{1,5*}, A. Ibraimov ², G. Murzabekova ¹, A. Aidarbekova ³, A. Temirbolat ⁴

¹S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan

²Maqsut Narikbayev University (KazGUU), Astana, Kazakhstan

³University of the People, Pasadena, USA

⁴Astana IT University, Astana, Kazakhstan

*Corresponding author: **Aidiye Aidarbekov**, e-mail: aidiye@yahoo.com

Keywords:

Animation, Sound Design,
Media, Business Processes,
Control Systems, Filmmaking
ICT, Audio Engineering.

ABSTRACT

Recognizing the significant role that animation plays in the world of entertainment and cultural exchange, this paper explores the potential of smaller animation projects as a platform for artistic expression and technological innovation. It also provides an analysis of existing publicly available products and aims to create a theoretical framework that combines film business processes, principles of animation and sound design to create engaging animated media projects. This work examines modern approaches to animation and sound design and their combined impact on content perception and engagement. It also discusses the potential application of these findings when creating media project and offers a qualitative analysis of current trends in hand-drawn animation and sound design. Furthermore, the paper offers a comprehensive approach to sharing smaller-scale media content in order to maximize the effectiveness of these projects. The creation of an experimental animated short film provides a practical example of this theoretical approach. This article is intended for a wide audience, including animators, directors, media technologists, as well as sound specialists planning to create their own projects in the future using film business processes and sound engineering principles. After reviewing the requirements of the project, it was determined that although the theoretical framework is ready to be used, each project should have a unique approach that relies not only on the studies presented here, but also on the correct use of available tools to achieve the best possible results.

Түйінді сөздер:

Анимация, дыбыстық
дизайн, медиа, бизнес-
процестер, басқару
жүйелері,
кинематография, аудио
инженерия, АҚТ.

ТҮЙІНДЕМЕ

Ойын-сауық пен мәдени алмасу әлемінде анимацияның маңызды рөлін мойындай отырып, бұл мақалада кішігірім анимациялық жобалардың көркемдік көрініс пен технологиялық инновацияларға арналған платформа ретіндегі әлеуеті зерттеледі. Ол сондай-ақ қолданыстағы жалпыға қол жетімді өнімдерді талдауды ұсынады және тартымды анимациялық медиа жобаларды жасау үшін анимация,



кинематографиялық бизнес-процестер және дыбыстық дизайн принциптерін біріктіретін теориялық базаны ұсынады. Бұл жұмыс анимация мен дыбыстық дизайнның заманауи тәсілдерін және олардың мазмұнды қабылдау мен қатысуға бірлескен әсерін қарастырады. Сондай-ақ, ол жобаларды құруда осы нәтижелердің ықтимал қолданылуын талқылайды және жасалған анимация мен дыбыстық дизайндағы заманауи тенденцияларға сапалы талдау ұсынады. Сонымен қатар, мақалада осы жобалардың тиімділігін арттыру үшін кіші масштабтағы медиа мазмұнды таратудың кешенді тәсілі ұсынылады. Эксперименттік анимациялық қысқаметражды фильм жасау осындай теориялық тәсілдің практикалық мысалы болып табылады. Бұл мақала аниматорларды, режиссерлерді және медиа мамандарды, сондай-ақ болашақта өз жобаларын жасауды жоспарлап отырған дыбыс инженерлерін қоса алғанда, кең аудиторияға арналған. Жобаның талаптарын зерттегеннен кейін, теориялық база пайдалануға дайын болғанымен, әр жоба тек осы жерде ұсынылған зерттеулерге ғана емес, сонымен қатар ең жақсы нәтижеге қол жеткізу үшін қолжетімді құралдарды дұрыс пайдалануға негізделген ерекше тәсілге ие болуы керек екендігі анықталды.

Ключевые слова:

Анимация, Звуковой дизайн, Медиа, Бизнес-процессы, Системы управления, Кинематография, Аудио инженерия, ИКТ.

АННОТАЦИЯ

Признавая важную роль, которую анимация играет в мире развлечений и культурного обмена, в этой статье исследуется потенциал небольших анимационных проектов как платформы для художественного самовыражения и технологических инноваций. В статье также представлен анализ существующих общедоступных продуктов и представлена теоретическая база, объединяющая принципы кинематографических бизнес-процессов, анимации и аудио дизайна для создания анимационных медиа-проектов. В этой работе рассматриваются современные подходы к анимации и звуковому дизайну и их совместное влияние на восприятие контента и вовлеченность. В ней также обсуждается потенциальное применение этих результатов при создании собственного проекта и предлагается качественный анализ современных тенденций в рисованной анимации и звуковом дизайне. Кроме того, в статье предлагается комплексный подход к распространению медиаконтента меньшего масштаба, чтобы максимально повысить эффективность этих проектов. Создание экспериментального анимационного короткометражного фильма является практическим примером такого теоретического подхода.

Эта статья предназначена для широкой аудитории, включая медиа специалистов, аниматоров, режиссеров, а также звукоинженеров, планирующих в будущем создавать свои собственные проекты. После изучения требований проекта было определено, что, хотя теоретическая база готова к использованию, каждый проект должен иметь уникальный подход, который опирается не только на представленные здесь исследования, но и на правильное использование доступных инструментов для достижения наилучших возможных результатов.

INTRODUCTION

Why in the modern era of technology and rapid growth of the media industry, creating animation projects develop progressively, and continue to be consumed more often by the whole



world? Huge box office cash gatherings, popular actors, famous directors with a well-thought-out plot, various age humor, as well as classic soundtracks – today are associated not only with the film industry but also align with animated multiplication. Concept of animation starts in each person's childhood, while remembering as television was invented most of generations were immersed in the world of animation, which could be cartoon fairy tale rolling on TV or even as perception of moving reality in an imagination.

The names of studios such as Disney, Universal and Ghibli have become synonymous with fantasy characters and quality animation, but behind historical glory - lays a tedious work from creating idea from scratch and developing them to small projects.

Stuart Blackton realized early on those animated films possessed immense potential beyond conventional live-action cinema. In particular, his movie titled *The Haunted Hotel* included impressive supernatural sequences, and convinced audiences and financiers alike that the animated film had unlimited potential (Wells, 2016). Which turned out to be the first animation concept created the field that is now known as stop motion animation. Stop motion animation was created by taking around 30 pictures and moving the object a several millimeters while taking another photograph. Those which created concept of played frames per second, now one of the main principles while creating an animation Times when animation ideas melted in the heads of creators and their realization required not only creativity, but also technical art - where the basics of field come to 12 principles of animations – book that stands as the ground for all animated projects all over the world (Zone, 2014).

LITERATURE REVIEW.

Animation principles, such as timing, spacing, and exaggeration, bring characters and objects to life on screen with a sense of realism and believability. On the other hand, we have equally significant tool as sound design, which sets the stage for the story by creating a unique atmosphere and evoking emotions through sound effects, music, and dialogue. While combining the principles of animation are the main foundation of the project, with high-quality sound design that enlivens and infuses the soul into the project - it can be shown that creating a small media project without the help of large industry companies can create a new future for individual animation developers.

Applicability of the content: The modern digital age is characterized by a growing interest in small form media systems similar as business commercials, short movies, and musical videos. In this environment, the effective combination of vitality and sound design principles plays a crucial part in shaping visually and aurally appealing content. The applicability of the study stems from the need to understand the introductory principles and their commerce to produce quality media products. As study by Erin Main et al. (2022) showed that the present creation of animation using low-cost and open-source products proves that small media animations can be made by following basic principles is possible (Main, 2007).

Work relevance. Animation is a mediating platform not only to entertain audiences, but it is also a creative way to distribute notions of nationhood and culture (Sayfo, 2022: 1124). Therefore, quality animation can be consumed in high volume and once popular, can be enjoyed worldwide (Thesen, 2020: 279). The creation of small animation projects provides a unique opportunity for animation artists to express themselves, overcome technical barriers and demonstrate their creative potential. These projects reflect the real interest of viewers and the potential for distributing animated content and crave for creative new topics in today's media environment.

Purpose of the work. The purpose of this study is to develop a theoretical frame grounded on the principles of action and sound design for the effective construction of small form media systems. To dissect the being styles in the field of vitality and sound design in small form media



systems and probe the impact of applying animation principles on content perception. Considering the relationship between sound design and emotional impact on the followership and developing on the optimal combination of action framework and sound design principles in specific media projects.

Research Design - Qualitative descriptive research

Descriptive research focuses on providing an accurate portrayal of the subject matter without influencing or manipulating it. In the context of this study, researchers will objectively analyze various aspects of animation and sound design in small media forms, examining how they are applied and their effectiveness in achieving desired outcomes.

The reason descriptive research design was chosen, is through this design it is possible to gain a comprehensive understanding of the principles of animation and sound design and their role in small media projects. By examining existing examples, collecting data, and analyzing trends, it can uncover patterns and insights that contribute to a deeper understanding of the subject matter.

Research methodology. In this research on the construction of short animation media projects, qualitative approach in form of case study as primary method was approached. This decision was informed by the nature of the research, which involves the analysis of animation projects - a domain where qualitative data collection is more suitable due to the subjective and artistic nature of the works involved. Qualitative case study analysis with comparative content analysis was made by following the course of the book by (Schreier, 2012).

MATERIALS AND METHODS

Filmmaking and Animation Techniques

Animated films, cartoons - "the field of cinematographic art, represented by films that are created by frame-by-frame shooting of successive phases of movement of drawn, pictorial (graphic animation) or volumetric-puppet (volumetric animation) images." (Manvell, Weis, 2025).

Japan has asserted its dominance in the global animation industry with remarkable prowess. Since the groundbreaking success of its inaugural anime, "The White Snake Enchantress", in 1958—a film lauded with awards from prestigious festivals in Venice, Mexico, and Berlin— Japanese animation has surged in popularity, achieving consistent international acclaim. A prime example of this triumph is "Spirited Away", which clinched an Oscar for Best Animated Feature Film and secured the top prize at the recent Berlin film festival. With a burgeoning reputation in anime production, Japan has emerged as a coveted destination for collaboration among European and American entertainment entities.

This surge in collaborative efforts has spurred the creation of diverse media formats, propelled by technological advancements and the widespread accessibility of the internet. Consequently, there has been a notable reduction in media consumption time, coupled with a surge in the production of animated content.

Delving into the traditional techniques of animation, Beesley (2004) describes the meticulous process involved. Traditional animation necessitates the creation of countless frames, each meticulously hand-drawn to portray incremental changes from the preceding frame. (Beesley, 2004) Animators meticulously craft storyboards to outline the animation sequence, with each frame capturing a pivotal moment in the narrative.

Traditional hand-drawn animation:

According to description of Beesley, A. (2004) – "Traditional animation requires the creation of hundreds, thousands, or even millions of frames, each sequentially hand drawn to show a subtle change from the last frame. Animators used storyboards to draw out the animation where each frame on the storyboard would represent a piece of the action." (Beesley, 2004)

Digital graphics or computer animation:

Utilizing computer-generated animation is the foundation of the technology. The way that object models move is determined by the animators' desires.

Because of the innovative technology employed and the strong emotional elements present in every character, it is currently regarded as the most successful animation technique in history. "Computer animation is defined as a deceptive method of movement created with computer devices, displayed on a screen, and recorded with a recording device." (Beesley, 2004)

Mixed hand drawn - digital animation:

As name mentions after combining 2 styles that mentioned above creating on two-dimensional computer animation uses 2D bitmap graphics or 2D vector graphics. The use of a number of traditional animation production techniques combined with the functions of computer software, makes animation production more convenient than the traditional hand-painted method.

The 12 principles of Animation

Animation is based on 12 principles formulated by pioneers such as Frank Thomas and Ollie Johnston. These principles include timing, spacing, exaggeration, etc. Timing and spacing define the rhythm of movement, and hyperbole gives the character dynamics, bringing it to life on screen with a sense of reality and authenticity. (White, 2009)

For smaller media projects, adhering to animation principles is essential to creating compelling content. For example, using turns and stretching will improve the fluidity of characters in short animations, capturing the audience's attention and effectively conveying emotion.

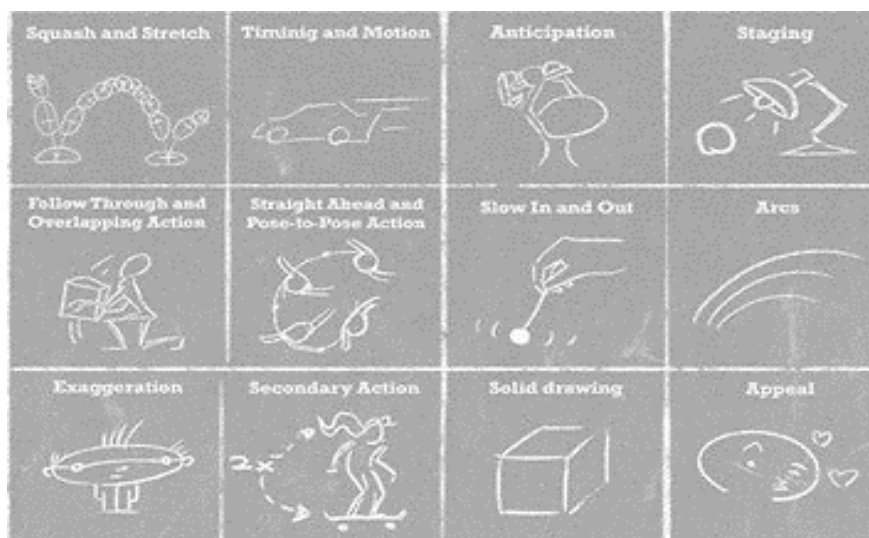


Figure 1. The 12 principles of animation

Note – compiled by the author (Thomas and Johnston)

The study is based on a historical analysis of the evolution of animation principles and their practical application in the creation of small media forms. By analyzing the nuances of each principle, it aims at a comprehensive understanding of the impact of content on perception.

Media systems Principles of Animation vitality, as the art of making images move, plays a crucial part in creating dynamic and engaging media content.

Let's look at the introductory principles of animation, including figure, magnification, weight distribution and timing, and their impact on the bystander's emotional experience. Applying Vitality to Media Systems explores how these principles can be successfully



incorporated into different types of small media systems. Consider examples of successful use of dynamism in short films, commercials, and multimedia donations.

According to Whitaker (2019), "In animation, time is an important factor in giving meaning to movement. More continuous drawing can create the illusion of movement, but animation is achieved by understanding how an object interacts with its surroundings over time. Inspired by Newton's first laws of motion, animation focuses on movement itself, the forces of nature and the subtle emotions and intentions of living characters" (Whitaker, Halas, 2002) describing the crucial importance of timing and its ignorance that could affect the quality of the work, even if application of 12 principles of animation.

The process of developing animated projects

The process of independently creating a small animated film involves several stages: idea, structure, storyboarding, character design and development, rough animation, film review, clean-up of animation, coloring, voiceover, sound superimposition, music, final editing, etc. (Murray, 2010) Each stage is necessary for the organizational integration of animation and sound design principles. Expand the capabilities of individual animation developers: In this study, the combination of animation and sound design principles allows individual developers to explore the practical application of theoretical knowledge throughout the creative process without the need for support from large industry sectors. By applying a practical approach to the scientific understanding of how theoretical principles are translated into practical independent animation projects, we take into account the problems encountered, the creative decisions made and the overall impact on the final product.

The initiation of a unique show idea is often driven by personal passion and individuality. The envisioned show should encapsulate the creator's identity, interests, and distinctive style. This personalized vision will naturally attract an audience, as the authenticity and originality of the idea can be best realized by its originator. For instance, Steve Hillenburg's background in marine biology uniquely qualified him to create the underwater world of SpongeBob SquarePants, combining his storytelling talent with his fascination for marine life. Similarly, Matt Groening drew inspiration from his own family to develop the iconic characters in The Simpsons, infusing the show with personal anecdotes and humor.

To begin the creative process, it is beneficial to imagine an animated show that feels inherently personal, as if it were an extension of oneself. This imagined show should provoke curiosity and engagement, reflecting the creator's hobbies, environment, or relationships. Whether it is grounded in reality or ventures into the bizarre, the essence of the idea should be something that deeply resonates with the creator. At this stage, the structure is secondary to the vision; the focus should be on what elicits genuine amusement and excitement for the creator.

A critical tool in the development process is the sketchbook, which serves as a repository for spontaneous ideas and visual experimentation. Another pivotal question to consider is why the idea necessitates animation and how the medium can be exploited to enhance the concept. Animation allows for anthropomorphism, exaggerated visual elements, and a dynamic presentation that other mediums may not accommodate as effectively. Shows like The Simpsons rely heavily on animation to deliver quick-witted dialogue and visual gags, demonstrating the unique advantages of the medium.

As the creative process progresses, it is essential to distill the myriad of ideas into a core concept that defines the series' unique identity. This core theme should be a reflection of the creator's interests and should be engaging enough to sustain long-term creative investment. It might explore a central conflict, such as a rat aspiring to be a chef in Ratatouille, or a family of superheroes trying to live a normal life in The Incredibles. The development of this core idea involves identifying the "hook"—the distinctive element that makes the series stand out and serves as the foundation for the narrative structure. (Murray, 2010).



Research and Case Study

To achieve the goals of this study, the following research methodologies have been employed: secondary data analysis, qualitative approach in form of case study, qualitative comparative content table.

Research design

According to Creswell (2023) The methods used for gathering, analyzing, interpreting, and reporting data in qualitative research are distinct from those in traditional quantitative approaches. Qualitative research typically involves purposeful sampling, gathering open-ended data, analyzing text or visual materials, presenting information through figures and tables, and providing personal interpretations of the findings. (Creswell, Creswell, 2018) In this research on the construction of short animation media projects, qualitative approach in form of case study as our primary method was approached. This decision was informed by the nature of our research, which involves the analysis of animation projects—a domain where qualitative data collection is more suitable due to the subjective and artistic nature of the works involved. Animation projects, including short films, are inherently prioritized creative visual style expression and storytelling over evaluating animation projects strictly through quantifiable metrics, such as dates and figures, which may not capture the essence of their artistic merit and impact. The qualitative case study method allows us to delve deeply into individual cases - specifically, existing short films - as examples of the construction and design of animation media projects. Through content analysis of these cases, we can examine the intricate details of each film, including animation techniques, narrative structures, sound design elements, and artistic choices. By focusing on qualitative data collection through the case study approach in our 3 short animation cases in YouTube platform and meets all the criteria, we can uncover insights and patterns that quantitative methods alone may overlook. This qualitative analysis enables us to understand the nuances of animation construction and design, as well as the artistic decisions that shape the final product.

Sampling

Purposive sampling - in order to acquire extra data as part of our process, sampling is an essential step of writing research. Our main source of data will be animated video productions, which will be our main focus. A wide range of items are included in the category of animated video, such as music videos, ads, instructional videos, animated short films, student theses, and commercial pilots. These various formats present various angles for content examination. Furthermore, these diverse forms offer different perspectives for content analysis. In addition, we chose a particular streaming video service as the main platform, YouTube, because of its widespread popularity. One important criterion for the qualitative evaluation of the chosen media forms is the quantity of viewers they attracted; this indicates that a large audience has accepted the product. Therefore, it is essential to our study to ascertain the viewership as well as guarantee that every project represents a unique variation from media chosen in this study.

A purposive sampling strategy was chosen through a purposive selection process that ensures that the selected materials directly reflect the principles and techniques being studied. Purposive selection makes it possible to choose animation projects that fit this need, given the emphasis on brief media forms, which makes them more appropriate for analysis within the study's framework. This tactic also makes it simpler to locate pertinent content in media content databases by giving access to a variety of animation projects and sound design samples. Researchers make sure that a sizable audience is covered and concentrate on publicly launched projects that adhere to high standards of professionalism and quality, given the sample's popularity and audience involvement. All things considered, the purposive sampling approach guarantees a methodical and focused selection procedure, guaranteeing that the chosen animation projects and sound design samples are extremely pertinent to the research subject.



Used Key words: animated movie, short animation, musical animation, animated cartoon, animated musical video, animation short film, animation, sound design, media projects.

Case Study

Data is gathered via the internet to procure media content that aligns with specific criteria. The primary databases utilized for this data collection included the video hosting platform YouTube, where the designated keywords were employed to locate relevant materials. Closed videos with restriction in using their work and copyright laws prohibiting the distribution of work were not permitted to use. Considering all information above, satisfying all the criteria listed.

Criteria for choosing Case Studies:

1. Fits the context of the hand drawn or computer animated work.
2. Duration of the animation can be considered “short” for media form (maximum duration of 30 minutes)
3. The accessibility of materials within YouTube’s media content database.
4. The extent of audience reach (with a minimum of 9 million views).
5. The materials have been officially used for commercial or artistic purposes.

{1} According to studies of et al. Beesley.A (2004) “Hand-drawn animation has historically been fundamental to the animation process, involving the meticulous creation of each frame, one by one, where individual cells are painstakingly drawn and redrawn before being photographed and presented in rapid succession.” or by using Computer Animation “The computer interpolates them from the key frames reducing much of the tedium and monotony of the animation process”. (Beesley, 2004)

{2} According to Patricia Cooper, Ken Dancyger (2012) “For our purposes, we consider a short film to be one of 30 minutes or less, as films longer than that usually need a secondary, or minor, plotline to sustain audience interest...” consideration for short movies will include only works that by timeline is shorter than 30 minutes. (Cooper, & Dancyger, 2012)

{3} Given the great diversity of content on YouTube, our characterization is done on three different datasets, namely, popular videos that appear on the worldwide top lists maintained by YouTube; videos that were removed from the system due to copyright violation; and, a dataset of videos sampled according to a random procedure

{4} By the mention in work about work of Youtube algorithms by Figueiredo, F., Almeida, J. M., Gon calves, M. A., & Benevenuto, F. (2014) it is ever so difficult to find and filter relevant content to oneself, but nevertheless, some pieces of content (or objects) succeed in attracting the attention of millions of users, while most remain obscure. This leads to the heavy tailed characteristic of content popularity, where a few objects become very popular while most of them attract only a handful of views. This means that the quality of short films is not solely dependent on the number of views and can be selected by a wide margin without having an exact quality stamp, ranging from 9 million views to several hundred million. (Figueiredo, et. al., 2014).

7 cases for study were found:

– The case of the winner of best Student film Award in View Conference 2018, work of students collaboration in famous French University “GOBELINS” – named Best Friend. A short movie telling us a story about a near future, where a lonely man is addicted to a product called “Best Friend” which offers him perfect virtual friends struggling from the product that offers him this happiness of lie.

– The case of popular Japanese musician EVE and his musical/animation company: The lyrics touch on the themes of self-reflection with the question of “Who am I?” and the inner struggle of a person with identification of himself. The narrator struggles with the contradictions between being true to his own self and meeting public expectations, expressing a sense of



emptiness and a desire for authenticity. The song also talks about the complexities of relationships, emotions and the impact of past experiences in people's lives.

To a large extent, the idea is based on Hoffmann's theory of drama. Where one of them suggests that when we are born, we are pushed onto the stage called everyday life, and when we are in the company of other people, we find ourselves "in the foreground." We act in front of others, just like the other person you interact with. And we learn our own roles by watching others act out theirs.

– The case of individual Anime of - Shingo Tamagawa named "Puparia". From practical part it is really short considering full story but because of abstractionism and malicious art style and work it has stunning point that "Quality is better than quantity in anti-national world where everybody simplifies the style for the sake of keeping up with the weekly series schedule."

Where author had a strong feeling that all the values that shaped our world were fading away. That the things we relied on and used to rely on were beginning to crumble. He believed that many have had this feeling - even before the coronavirus. According his words on an interview he have been constantly haunted by that feeling for several couple years. By that he wanted to make a story, or a world, or something that would envelop people who see things differently, that would give them support.

– The case of indie rock group SIAMES's animated music video called "The Wolf": The story is narrated by 3 different characters who, in their own way, run away from the same wolf, which increases in number the further they run. Each person can have a problem that creates a wolf, where one of them is the beginning of an alcoholic drink, the other girl has a lit cigarette that can be personified as habits, each of the characters had different reactions to the wolf. As if showing how one defenselessly fears his problem by fully accepting it, another character aggressively smashes his skateboard to smithereens without even being surprised by the appearance of ailments where in the end they are united by escaping from their problems. But as soon as the escape route was completely blocked, we can see how only he remains to fight and accepting his fate, one of the main characters goes to fight through tears in his eyes.

– The case of the animated short movie by Pixar, "Kitbull" directed by Rosana Sullivan as part of the SparkShorts series, highlights a poignant story of an unlikely friendship between a stray kitten and a neglected pit bull in San Francisco's Mission District. Inspired by Sullivan's fascination with cat videos and the contrast between self-perception and reality, "Kitbull" explores themes of companionship, compassion, and resilience. Diverging from Pixar's traditional 3D animation, the film employs a 2D hand-drawn aesthetic, posing significant challenges for the production team, who successfully brought Sullivan's vision to life by meticulously crafting each frame to convey raw emotion and authenticity. Set against the backdrop of Sullivan's own experiences in San Francisco, the film's detailed sound design adds depth and realism. The narrative follows the journey of the timid kitten and the gentle pit bull as they form a bond through playful interactions, face challenges, and ultimately find a loving home together, demonstrating the power of empathy and understanding. "Kitbull" showcases Pixar's commitment to innovation and creativity, resonating with audiences through its animation, evocative sound design, and heartfelt linear narrative.

– The case of the animated short movie by Rachel Kim, a student at CalArts University, "Diamond Jack" exudes charm and nostalgia through its captivating animation and storytelling. The film's painterly backgrounds and warm color palette create a sense of coziness and familiarity, while the textured details in the settings add depth and interest. Despite some less refined line work, which complements the film's high-energy atmosphere, "Diamond Jack" successfully engages viewers with its contrasting visual elements, engaging plot, and carefully crafted soundtrack, making it a delightful cinematic experience.



– The case of the 3D animated short pilot of the series "Amazing Digital Circus" illustrates the story of six individuals trapped in a virtual world controlled by an AI named Kane, who takes the form of a ringmaster. The audience is introduced to this unsettling environment through the eyes of the protagonist, Remember, a 25-year-old woman who arrives at the circus with no memory of how she got there. The pilot's immense popularity can be attributed to its strong execution and strategic marketing, including voice acting in 18 languages and subtitles in 16, ensuring a global reach. The series captivates with its vibrant 3D animation, reminiscent of Looney Tunes, and its eerie undertones, creating a blend of children's fiction and horror that resonates with fans of similar genres like "Five Nights at Freddy's" and "Poppy Playtime". Created and directed by Gooseworx and produced by Glitch Productions, "Amazing Digital Circus" premiered on YouTube to great acclaim, featuring a unique cast of characters and exploring themes of fear and colorful scheme of interesting characters in mysterious world.

RESULTS AND DISCUSSION

Criteria for comparative content analysis - the translation and subtitles of animated films, especially subtitles, is crucial in maintaining the original's aesthetic and emotional appeal. Studies collected on films from Pixar including "Inside Out" and "Coco" highlights importance of translation practices and how it can affect audience reception. (Lin, 2023: 85). Based on the book - creating animated cartoons with character - aside from strengthening your overall skills, directing and producing new animated film gives the extremely valuable, hands-on experience in every area that would come into play when doing the show: writing the story and the gags, designing characters, storyboarding, color, timing, layout, sounds effects, music, and ultimately, having released product.

PART - 1								QUALITATIVE COMPARATIVE TABLE	
Name	Best Friend	Puparia	Dramaturgy	The Wolf	Kitbull	Diamond Jack	Amazing Digital Circus	Meaning of figures according Schreier (2012):	
Narrative structure	Linear	Non - Linear	Non - Linear	Linear	Linear	Linear	Linear		
Plot	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	absent -	✗
World build	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	present -	✓
High-quality details	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓	present -	✓
Unexpected aspects of the narrative	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	Acquires superior quality in accordance with criterion in study materials	
Consistent unique style	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
12 principles of animation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

Figure 2. Qualitative comparative analyse chart

Note – compiled by the author

Based on these components of the book several of them was chosen for comparative content analysis table including: writing the story as story world, gags as comic relief, character design and color combined as consistent unique style, and music as background music, with sound effects as if it already is.

PART - 2		QUALITATIVE COMPARATIVE TABLE						
Name	Best Friend	Puparis	Dramaturgy	The Wolf	Kitbull	Diamond Jack	Amazing Digital Circus	Meaning of figures according Schreier (2012):
Comic relief	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	absent - ✗
Background music	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	present - ✓
Sound effects	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	present - ✓
Best animation	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	Acquires superior quality in accordance with criterion in study materials
Dialogs	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	
Text or subtitles	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	
Voiceover surrounding	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	

Figure 3. Qualitative comparative analyse chart

Note – compiled by the author

Based on these components of the book several of them was chosen for comparative content analysis table including writing the story as story world, gags as comic relief, character design and color combined as consistent unique style, and music as background music, with sound effects as if it already is.

After conducting a detailed content analysis above, it can be noted that in most cases a linear narrative structure is used, which provides a structure of the story that is understandable to the viewer, consisting of 3 points: the beginning, the climax and the end. For my story, it might be more logical to use a linear structure, which will be used, but because of the growth of the main character, it will be linear only regarding the memories of the main character and will return her from reality to flashbacks and back forward, which transforms into a nonlinear narrative structure in total. Timing will be divided into 3 points with longing of 1 minute each. The story will show 3 minor characters important to the plot and each will have their own arc for showcase. As for the real time we will be introduced to an adult main character with her companion who will represent the evil or at least twofold impression for the viewer's interpretation of what was it.

As mentioned in the book of Pixar short films "Lassater insists that the one of the keys to believability in any animated films is the use of organic shapes" (Rahmah, I., Mustofa, D. A., & Nisa, 2021: 107). According to Rahmah, D. A., Mustofa, M., & Nisa, I. (2021) there are several kinds of characters based on the differentiation of characterization, namely main character & peripheral character, protagonist & antagonist character, flat character & round character, and static character & developing character (Rahmah, I., Mustofa, D. A., & Nisa, 2021: 111). Character design had 3 phases of firstly creating basic connecting idea, recycling of the previous ideas and creating more characters, and final design by combining everything that came before using shape and form language to tell the story. We can observe the creation evolution in images below. As shown in work of Suckfull, M. (2010) "The repetition of this motive enables the spectator to recognize that it is always the same protagonist, even though the daughter's age and appearance change." (Suckfüll, 2010: 69) This means even through the character aging, the repetition of some action can show to the viewer the same intentional idea that the main character does not change and it is still her.



Figure 4. Process of creation 180 frames

Note – compiled by the author

In summary, the successful development of small form media projects necessitates the integration of sound design techniques and animation principles. This integration unlocks the full potential of visual and auditory mediums, enhancing the creative landscape and profoundly connecting with audiences through synergistic storytelling, emotional resonance, artistic expression, and audience engagement. The case studies "Best Friend" and "Dramaturgy" which are examined, demonstrate how carefully applying animation and sound design principles can have transformative effects and confirm their importance as essential tools in today's media environment.



Figure 5. Layers for coloring process

Note – compiled by the author

CONCLUSION

In conclusion, after conducting these studies, it can be confirmed that the basic creation of an animated film is based on 2 aspects: the use of old animation principles and sound design in the form of voice-over music in order to affirm the emotional wave and mood of the film. But this



does not deny the fact that every created film should have a single style of presentation and, conversely, shows the beauty of an artistic look that fully represents the creator and his idea through presentation with its style. It is possible to create an animated film alone without financial support, but it will take a lot of time and effort, it is recommended to have at least a small team of 6 people where everyone will be responsible for their craft together creating excellent media forms that resist low wages, censorship and large conglomerates.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: No funding was received for the preparation of this article.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to colleagues for methodological support and helpful discussions, as well as to anonymous reviewers for valuable comments that helped improve the quality of the article.

STATEMENT ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: No artificial intelligence (AI) technologies were used at any stage in the preparation of this article.

REFERENCES

- Wells, P. (2016). *The fundamentals of animation*. Bloomsbury Publishing. ISBN: 978-1472575272. Retrieved December 14, 2024, from <https://www.perlego.com/book/394867/the-fundamentals-of-animation-Pdf>
- Zone, A. (2014). The 12+2 character animating principles. Animation World Network. Retrieved December 14, 2024, from <https://www.awn.com/forum/thread/1020963>
- Main, E. (2007). *Storytelling: The creation of animation (Senior Honors Theses and Projects)*. Retrieved December 14, 2024, from https://digitalcommons.lib.uconn.edu/srhonors_theses/82
- Sayfo, O. (2022). Identity matters: The cultural logics of animation production and distribution in the Arab world. *International Journal of Communication*, 16, 1109–1126. Retrieved December 14, 2024, from <https://ijoc.org/index.php/ijoc/article/view/16394>
- Thesen, T. P. (2020). Reviewing and updating the 12 principles of animation. *Animation*, 15(3), 276–296. <https://doi.org/10.1177/1746847720969919>
- Schreier, M. (2012). *Qualitative content analysis*. SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781526435026>
- Manvell, R., & Weis, E. (n.d.). Animation in motion-picture technology. *Encyclopaedia Britannica*. Retrieved December 14, 2024, from <https://www.britannica.com/technology/motion-picture-technology/Animation>
- Beesley, A. (2004). *Animation: A study and comparison of concepts and software issues (Senior Honors Theses and Projects)*. Retrieved December 14, 2024, from https://digitalcommons.lib.uconn.edu/srhonors_theses/5
- White, T. (2009). *How to make animated films: Tony White's complete masterclass on the traditional principles of animation*. Routledge. ISBN: 978-0240810331. Retrieved December 14, 2024, from <https://www.routledge.com/How-to-Make-Animated-Films-Tony-Whites-Complete-Masterclass-on-the-Traditional/White/p/book/9780240810331>
- Whitaker, H., & Halas, J. (2002). *Timing for animation*. Focal Press. ISBN: 978-0240517148. Retrieved December 14, 2024, from <https://archive.org/details/timingforanimation>
- Murray, J. (2010). *Creating animated cartoons with character*. Watson-Guption. ISBN: 978-0823024866. Retrieved December 14, 2024, from <https://www.amazon.com/Creating-Animated-Cartoons-Character-Developing/dp/0823024861>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. SAGE Publications. ISBN: 978-1506386706. Retrieved December 14, 2024, from <https://us.sagepub.com/en-us/nam/research-design/book255675>



- Cooper, P., & Dancyger, K. (2012). Writing the short film. Routledge. ISBN: 978-0240805887. Retrieved December 14, 2024, from <https://www.routledge.com/Writing-the-Short-Film/Cooper-Dancyger/p/book/9780240805887>
- Figueiredo, F., Almeida, J., Gonçalves, M. A., & Benevenuto, F. (2014). On the dynamics of social media popularity: A YouTube case study. ACM Transactions on Internet Technology, 14(4), Article 24. <https://doi.org/10.1145/2665065>
- Lin, J. (2023). An analysis of subtitle translation in Pixar animated films from the perspective of reception aesthetics: A case study of "Inside Out" and "Coco." Frontiers in Art Research, 5(16), 83–87. <https://doi.org/10.25236/FAR.2023.051615>
- Rahmah, I., Mustofa, D. A., & Nisa, M. (2021). An analysis of the characterization of the characters in the short movie entitled "Ibu." British (Jurnal Bahasa dan Sastra Inggris), 10(2), 103–113. <https://doi.org/10.31314/british.10.2.103-113.2021>
- Suckfüll, M. (2010). Films that move us: Moments of narrative impact in an animated short film. Projections, 4(2), 50–74. <https://doi.org/10.3167/proj.2010.040204>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Aidarbekov Aidiye – PhD Candidate, Researcher at S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Senior Lecturer of School of Creative Industry at Astana IT University, Teaching Professor of International School of Journalism at Maqsut Narikbayev University, Astana, Kazakhstan

Айдие Уланбекулы Айдарбеков – PhD Candidate, С.Сейфуллин атындағы қазақ агротехникалық зерттеу университетінің ғылыми қызметкері, Astana IT University Креативті индустрия мектебі аға оқытушысы, Maqsut Narikbayev University-дің Халықаралық журналистика мектебінің Teaching Professor-ы, Астана қ., Қазақстан

Айдие Уланбекулы Айдарбеков – PhD Candidate, научный сотрудник Казахского агротехнического исследовательского университета имени С.Сейфуллина, Senior Lecturer Школы креативной индустрии Astana IT University, Teaching Professor Международной школы журналистики Maqsut Narikbayev University, Астана, Казахстан

e-mail: aidiye@yahoo.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7197-1638>



Ibraimov Almabek – Senior Lecturer of International School of Journalism at Maqsut Narikbayev University, Astana, Kazakhstan,

Алмабек Ерболатұлы Ибрайымов – Maqsut Narikbayev University-дің Халықаралық журналистика мектебінің Senior Lecturer-і, Астана қ., Қазақстан,

Алмабек Ерболатұлы Ибрайымов – Senior Lecturer Международной школы журналистики Maqsut Narikbayev University, Астана, Казахстан,

e-mail: ibraimov.almabek@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1749-8565>



Murzabekova Gulden – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of ICT department at S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan,

Мурзабекова Гульден Еслямбековна – ф.-м.ғ.к., С. Сейфуллин атындағы қазақ агротехникалық зерттеу университетінің АКТ кафедрасының профессоры, Астана қ., Қазақстан,

Мурзабекова Гульден Еслямбековна – кандидат физико-математических наук, профессор кафедры ИКТ Казахского агротехнического исследовательского университета им. С. Сейфуллина, Астана, Казахстан,

e-mail: guldenmur07@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9807-5200>



Aidarbekova Anel – MSc in Informational Technology, University of the People, Pasadena, USA,

Айдарбекова Анель – Ақпараттық технологиялар магистранты, University of the People, Пасадена, АҚШ,

Айдарбекова Анель – Магистрант информационных технологий, University of the People, Пасадена, США,

e-mail: anelikaidarbekova@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9076-8030>



Temirbolat Aliya – BSc in Media Technology of School of Creative Industry at Astana IT University, Astana, Kazakhstan,

Темирболат Алия – Астана ІТ Университетінің Креативті индустрия мектебінің «Медиа-технологиялар» мамандығының түлегі, бакалавр, Астана, Қазақстан,

Темирболат Алия – Выпускник Школы креативной индустрии Astana IT University по специальности «Медиа-технологии», бакалавр, Астана, Казахстан,

e-mail: a.temirbolat@astanait.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6985-7774>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_157
IRSTI 47.47; 28.23.37

ENERGY EFFICIENT ALGORITHM FOR TRANSMISSION PARAMETER SELECTION IN LORA WIRELESS NETWORKS

LORA СЫМСЫЗ ЖЕЛІЛЕРІНДЕ ЖІБЕРУ ПАРАМЕТРІН ТАҢДАУДЫҢ ЭНЕРГИЯНЫ ҮНЕМДЕЙТІН АЛГОРИТМІ

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ LORA

A.B. Bolatbek ¹, B.N. Zholamanov ^{1*}, M.K. Nurgaliyev ¹, A.K. Saymbetov ¹,
G.M. Abzhanova ¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: Batyrbek Zholamanov, e-mail: zholamanov.batyrbek@kaznu.kz

Keywords:

LoRa, energy efficiency, wireless sensor networks, XGBoost, packet delivery ratio (PDR).

ABSTRACT

Wireless communication technologies play a key role in providing efficient and reliable Internet of Things (IoT) networks. Among them, Long Range (LoRa) technology and the LoRaWAN protocol are widely known for their ability to provide long-range communications with low power consumption and cost-effectiveness. One of the main challenging issues in deploying autonomous wireless networks is the ongoing need to optimize transmission parameters to minimize node energy consumption (EC) and maximize packet delivery ratio (PDR). This study introduces a novel transmission parameter selection algorithm such as Spreading Factor (SF) and Transmission Power (TP), leveraging machine learning (ML) methods such as XGBoost, GRU, and RBFN. The algorithm predicts the distance to a node based on the received RSSI, and subsequently forecasts EC and PDR, substantially enhancing network performance. The proposed approach demonstrates high prediction accuracy, achieving 99%, while reducing EC by 20.43% and increasing the PDR by 23.72% compared to the traditional adaptive data rate (ADR) algorithm.

Түйінді сөздер:

LoRa, энергия тиімділігі, сымсыз сенсорлық желілер, XGBoost, пакеттерді жеткізу коэффициенті (PDR).

ТҮЙІНДЕМЕ

Сымсыз байланыс технологиялары Заттар Интернеті (IoT) желілерінің тиімді және сенімді жұмысын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Олардың ішінде, ұзақ қашықтықтағы байланыс мүмкіндігін, төмен қуат тұтыну мен экономикалық тиімділікті қамтамасыз ететін Long Range (LoRa) технологиясы мен LoRaWAN хаттамасы кеңінен танымал. Автономды сымсыз желілерді іске асырудағы негізгі мәселелердің бірі – түйіндердің энергия тұтынуын (EC) азайту және пакеттерді жеткізу коэффициентін (PDR) барынша арттыру үшін жіберу параметрлерін оңтайландыру қажеттілігі болып табылады. Бұл зерттеу барысында машиналық оқыту (ML) әдістерін, соның ішінде XGBoost, GRU және RBFN қолдана отырып, Spreading Factor (SF) және Transmission Power (TP) сияқты жіберу параметрлерін таңдау үшін жаңа алгоритм ұсынылды. Алгоритм қабылданған RSSI негізінде түйінге



дейінгі қашықтықты болжайды және содан кейін ЕС және PDR болжамдарын жүргізеді, сол арқылы желінің жұмысын айтарлықтай жақсартады. Ұсынылған әдіс жоғары болжам дәлдігін көрсетіп, 99 %-ға жетті, ал дәстүрлі адаптивті деректер жылдамдығы (ADR) алгоритмімен салыстырғанда ЕС-ті 20,43 %-ға төмендетіп, PDR-ді 23,72 %-ға арттырды.

Ключевые слова:

LoRa,
энергоэффективность,
беспроводные сенсорные
сети, XGBoost,
коэффициент доставки
пакетов (PDR)

АННОТАЦИЯ

Технологии беспроводной связи играют ключевую роль в обеспечении эффективных и надежных сетей Интернета вещей (IoT). Среди них технология Long Range (LoRa) и протокол LoRaWAN широко известны своей способностью обеспечивать связь на больших расстояниях с низким энергопотреблением и экономической эффективностью. Одной из основных сложных проблем при развертывании автономных беспроводных сетей является постоянная необходимость оптимизации параметров передачи для минимизации энергопотребления узла (ЕС) и максимизации коэффициента доставки пакетов (PDR). В этом исследовании представлен новый алгоритм выбора параметров передачи, такой как коэффициент распространения (SF) и мощность передачи (TP), использующий методы машинного обучения (ML), такие как XGBoost, GRU и RBFN. Алгоритм предсказывает расстояние до узла на основе полученного RSSI, а затем прогнозирует ЕС и PDR, существенно повышая производительность сети. Предлагаемый подход демонстрирует высокую точность прогнозирования, достигая 99%, при этом ЕС снижается на 20,43% и PDR увеличивается на 23,72% по сравнению с традиционным алгоритмом адаптивной скорости передачи данных (ADR).

INTRODUCTION

Nowadays, with the rapid growth of IoT applications, there is an increasing demand for high connectivity over long distances while minimizing energy consumption (EC). Consequently, LoRa technology and LoRaWAN protocol have become preferred solutions for establishing networks that enable long-distance communications with low power usage. However, despite these advantages, optimizing transmission parameters continues to be a major challenge for further reducing node EC and enhancing overall network efficiency.

Considerable attention is devoted to studying transmission parameters and their impact on network efficiency. In articles (Porobić et al., 2021; Bor & Roedig, 2017), authors highlight the significance of selecting correct value of bandwidth (BW), SF and TP parameters to achieve optimal network performance. These parameters are critical for ensuring the sustained reliability of LoRaWAN networks, particularly in urban and rural areas (Griva et al., 2023). In (Ghaderi & Amiri, 2024), the authors focus on modeling and analyzing how various transmission parameters influence the reliability and efficiency of networks.

In addition, the ADR data transmission algorithm, is employed in order to improve the energy efficiency of LoRa wireless networks in (Peruzzo & Vangelista, 2018). The standard ADR mechanism can be enabled to adjust the SF assignment and transmit power, based on the SNR readings obtained from the received signal. This algorithm plays an essential role in managing data transfer rate and transmitter power within LoRaWAN networks. The study in (Slabicki, Premasankar & Di Francesco, 2018) discusses how adaptive parameter configuration can improve network performance in dense IoT deployments. In contrast, authors in [Ksiazek & Grochla, 2021] investigates flexibility of the ADR algorithm and its impact on network performance under various operating conditions. However, the ADR algorithm exhibits several limitations, which



led to further research in this area. Recent studies have introduced improved versions of the ADR algorithm, including ND-ADR, ADR-MIN, and EARN (Park et al., 2020). These advanced approaches utilize the average Signal-to-Noise Ratio (SNR) to adjust data transmission parameters, leading to enhanced PDR and reduced EC (Babaki, Rasti & Taskou, 2020; Jiang et al., 2021).

Optimizing parameters for LoRa wireless network nodes involves utilizing one of three ML methods: supervised learning, unsupervised learning, and reinforcement learning. In supervised learning, one of the network parameters, such as SF or TP, is most often selected and these parameters are predicted based on known data using regression or classification (Cuomo, Garlisi, Martino & Martino, 2020). In addition, regression and classification are used to predict collisions. Reinforcement learning provides a natural framework for optimizing parameters by allowing a wireless network node (agent) to interact with its environment. Through feedback mechanisms, such as rewards or penalties, the agent learns to identify the optimal parameters for efficient message transmission (Minhaj et al., 2023; Chen et al., 2022). Additionally, unsupervised learning is utilized to determine the most efficient operating modes of network nodes (Alenezi, Chai, Jimaa & Chen, 2019).

Therefore, much of the effort in optimizing parameters for LoRaWAN wireless networks involves reaching a compromise between two contradictory parameters: EC and PDR. Reducing EC typically involves reducing TP, which in turn decreases the success rate of message delivery.

MATERIALS AND METHODS

The study is structured into two main stages: online and offline. The online stage involves three simulations of wireless networks, as illustrated in Figure 1. Optimizing network parameters is crucial to reduce EC and increase PDR. This optimization involves studying the interdependence of various parameters. As shown in Figure 1, the study utilizes four different simulations (Sim1, Sim2, Sim3, and Sim4) within the OMNeT++ environment using the FLoRa library, which incorporates essential parameters based on results of physical experiments.

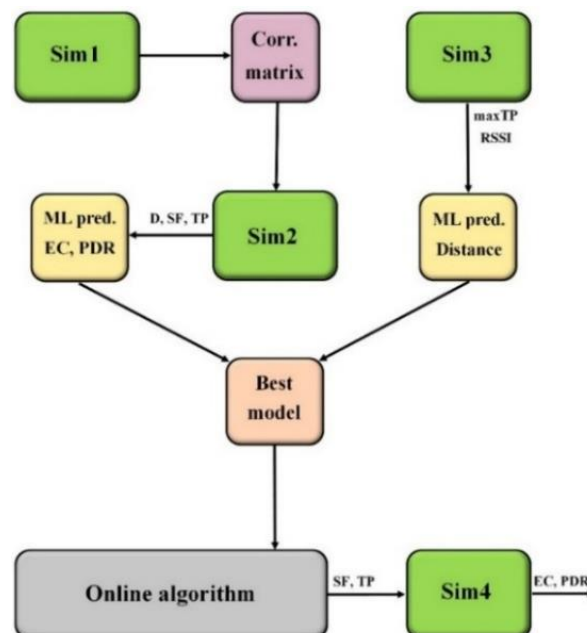


Figure 1. General structure of the study

Note: compiled by the authors



Sim1 is intended for constructing a correlation matrix (Corr. matrix), showing the degree of interrelation of network parameters. Then, data collection for ML is essential to achieve accurate predictions of network parameters under varying conditions, conducted specifically during the Sim2 phase. The model that exhibits the highest predictive performance (Best model) is subsequently employed in collaboration with an online algorithm to identify the most optimal network parameters. Sim3 is designed to collect data to create a model that predicts the transmitter-receiver distance based on Received Signal Strength Indication (RSSI) at maximum TP. The distance prediction results are the input data for the best model, the output of which is the predicted PDR and EC for a given distance and various TP and SF options. The algorithm determines the most optimal values of the SF and TP parameters. Finally, it is essential to evaluate the effectiveness of the predicted parameters for a specific network configuration. This is achieved by simulating Sim4 with the algorithm-selected network parameters and assessing the efficiency of the proposed system using the ADR algorithm.

The simulation Sim1 was performed using various numbers of nodes and gateways, where each node transmits messages to the gateways using different parameter combinations. This approach enabled the collection of a comprehensive dataset, enhancing our understanding of the correlation between PDR and EC in LoRa networks. The simulation results are presented as a correlation matrix in Figure 2.

The correlation matrix illustrates how the average EC and variance (σ) of all nodes depend on several parameters during message transmission: bandwidth (BW), coding rate (CR), SF, TP, number of nodes (N), and number of gateways (GW). Analysis of the matrix reveals that SF and TP exert the most significant influence on node EC.



Figure 2. Correlation matrix

Note: compiled by the authors

The SF parameters ranged from 7 to 12, covering all available options. The transmit power varied between 2 dBm and 14 dBm. The maximum power is sufficient for successful message transmissions even from the most remote node. The simulation area spans 350 by 350 meters, with the receiving gateway positioned at coordinates 100 by 100 meters. The lognormal distribution model was used as a signal propagation model. The number of LoRa nodes for data collection in the selected area is 1046.



To collect the database, the parameters SF, TP and Distance will be employed as input value for the Sim2 simulation. During the three-day simulation period, each node will send 216 messages. This is essential for a more precise evaluation of EC and PDR. The time between message arrivals follows an exponential distribution with a mean value of 1000 seconds. When calculating a node's total EC, factors such as each message's sending power, airtime, and additional parameters are taken into account. EC and PDR were obtained as output data, as shown in the block diagram in Figure 3.

Table 1. Simulation parameters in OMNeT++

Parameter	Value
Simulation time	3 d
Simulation area	350 x 350 m
Number of nodes	1046
Spreading Factor SF	[7-12]
Transmit Power TP	[2-14] dBm
Path loss	$PL(d_0) = 127.41$, $d_0 = 40$, $n = 2.08$, $\sigma = 3.57$
Receiver sensitivity	-137 dBm
Carrier frequency	868 MHz
Bandwidth BW	125 kHz
Coding Rate CR	4/8
<i>Note: compiled by the authors</i>	

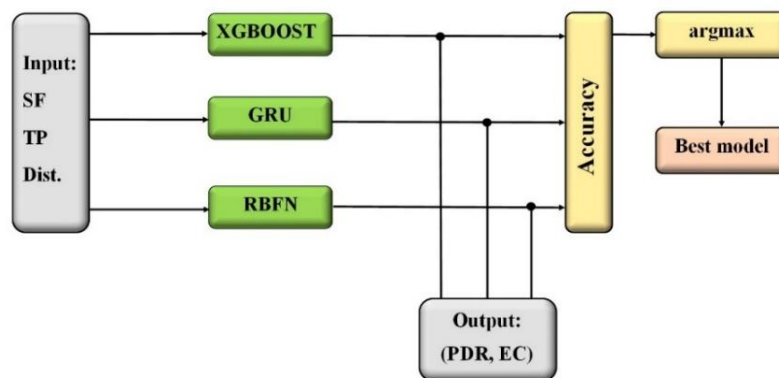


Figure 3. Block-diagram of data collection for ML

Note: compiled by the authors

XGBoost, RBFN, and GRU were used to predict PDR and EC. 85% of the data was used for model training, while the remaining 15% was reserved for the testing phase. Prediction accuracy will be evaluated using R2, MAE, MSE, and RMSE parameters.

The OMNeT++ network simulator provides the ability to calculate the RSSI for each Lora node. It uses several path loss models along the path to estimate the decrease in power of a radio signal as it propagates from the transmitter to the receiver. One example of such a model is the LogNormal Shadowing Model, which considers both deterministic path loss and random signal fluctuations caused by obstacles and reflections.

The lognormal distribution model is an extension of the free space model. It adds a random component to the logarithmic distance function to account for shading. The model equation is presented below:



$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (1)$$

where: $PL(d)$ – path losses over distances d ;

$PL(d_0)$ – losses at reference distance d_0 ;

n – attenuation coefficient;

X_σ – random value, normally distributed with zero mean and standard deviation σ .

The lognormal distribution parameters were set as follows: $PL(d_0)=127.41$, $d_0=40$, $n=2.08$, and $\sigma=3.57$. In article (Slabicki, Premsankar & Di Francesco, 2018), a comparative evaluation of the lognormal distribution model implemented in OMNeT++ using real-world data is presented. The study demonstrate that the model achieves high accuracy in simulating signal attenuation in both urban and suburban environments. These parameters were calibrated based on measurements from various settings and showed favorable performance when compared to actual data.

For the Sim3 simulation, 100 nodes were installed in the selected area. In the OMNeT++ environment, the powers of the received signals were obtained for each node. Leveraging the chosen signal propagation model, it becomes feasible to calculate the distance to a node transmitting at a known power level of 14 dBm.

The proposed algorithm for optimizing the SF and TP parameters is the generation and enumeration of all possible options and the selection of the best depending on the necessary requirements as depicted in Figure 4. The operation requires only the power of the initially received RSSI signal, which is used to determine the distance, as outlined in section 2.5. Based on the obtained distance value, various parameters such as SF and TP are selected. The resulting data list is sent to the best model as input, yielding outputs for EC and PDR.



Figure 4. Algorithm for optimizing SF and TP parameters

Note: compiled by the authors

As can be seen from Figure 4, the best model predicts output values for EC and PDR. Subsequently, the results from the best model are sent to the filter, the algorithm of which is shown in Figure 5.

Figure 5 illustrates the operational concept of the proposed filter. Initially, the filter takes as input a dataset comprising 78 lines (D, SF, TP, EC, PDR). Subsequently, the PDR values of each row go through the conditions >5 , >25 , >30 , >40 , >50 , >75 , >80 , as well as the maxPDR function, which from the entire list returns the row with the maximum PDR value and the corresponding TP and SF values. Rows meeting these conditions proceed to the next stage, while those not meeting the conditions remain in the input list. This filtering approach effectively establishes a lower threshold for PDR values. After each condition for the lower PDR threshold, the resulting dataset is further filtered based on minimum EC using the minEC function. As a result, for each range of PDR values, the minimum EC value and the corresponding SF and TP values are determined.

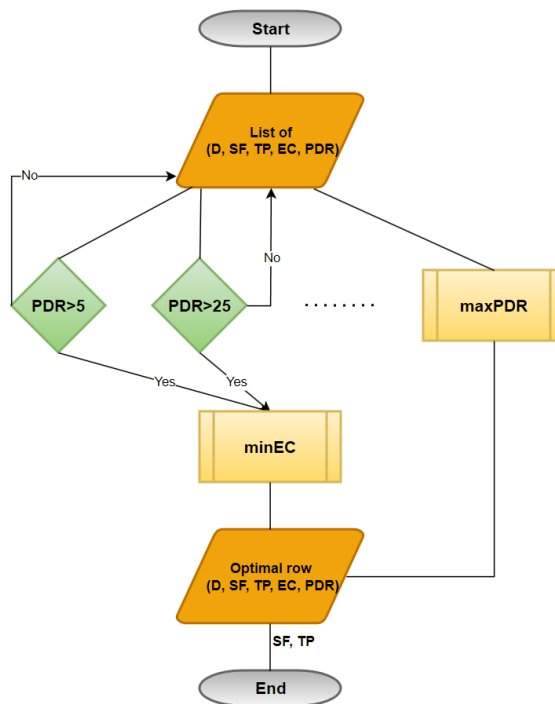


Figure 5. Filter block diagram

Note: compiled by the authors

RESULTS AND DISCUSSION

XGBoost demonstrated the best performance in predicting EC, PDR, and distance. The results were as follows: prediction_EC (R2 Score - 0.99999, MAE - 3.97440, MSE - 6.16825, RMSE - 7.85382) and prediction_PDR (R2 Score - 0.99557, MAE - 1.71041, MSE - 6.11819, RMSE - 2.47349).

Table 2 presents the performance metrics of three models (XGBoost, GRU, and RBFN) in predicting values for the variables EC and PDR.

Table 2. Prediction accuracy of EC, PDR and Distance in ML models XGBoost, GRU and RBFN

	Performance metrics	EC	PDR	Distance
XGBoost	R ²	0.99999	0.99557	0.99571
	MAE	3.97440	1.71041	4.75846
	MSE	6.16825	6.11819	65.40882
	RMSE	7.85382	2.47349	7.45037
GRU	R ²	0.98685	0.97253	0.97520
	MAE	0.95878	4.62209	6.75299
	MSE	1.90047	38.26388	116.23087
	RMSE	1.37857	6.18578	10.78104
RBFN	R ²	0.99837	0.99428	0.98162
	MAE	0.31358	1.99114	6.18024
	MSE	0.24126	7.91164	87.68931
	RMSE	0.49118	2.81276	9.18952

Note: compiled by the authors



The XGBoost model exhibited outstanding results with R2 Score close to 1 for all variables and the lowest MAE, MSE, and RMSE values, indicating its exceptional accuracy. The GRU model showed slightly lower accuracy with R2 Score ranging from 0.97253 to 0.98685, along with higher MAE, MSE, and RMSE errors. The RBFN model also demonstrated high accuracy with R2 Score between 0.98162 and 0.99837, and moderate MAE, MSE, and RMSE values, which were lower than GRU but not as superior as XGBoost in some instances.

RSSI values are essential for predicting the distance between the transmitter and the gateway. We have gathered RSSI values from 100 test nodes with a maximum transmit power of 14 dBm. The predicted distances from the XGBoost, GRU, and RBFN models were compared with distances acquired from OMNeT++.

All models demonstrated very high prediction accuracy, as shown in Table 2, with XGBoost achieving the best performance (R2 Score: 0.99571, MAE: 4.75846, MSE: 65.40882, RMSE: 7.45037). Using these predictions, the distance to the node after the initial message transmission can be calculated. In subsequent steps, this distance will be utilized in the proposed algorithm. Figure 6 illustrates the relationship between distance and received signal power for various ML methods.

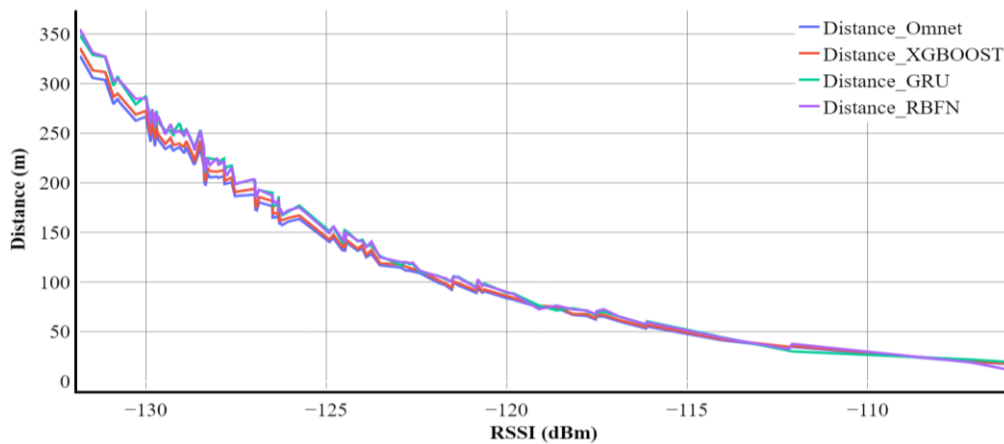


Figure 6. Dependence of distance on received signal power

Note: compiled by the authors

In order to evaluate the performance of the proposed algorithm, a Sim4 benchmark simulation were conducted using 100 test nodes with varying filter parameters. The ADR algorithm was used for comparison. The obtained results were presented in Table 3 for diverse filter settings.

Figure 6 illustrates the accuracy of EC and PDR results from GRU, XGBoost, and RBFN predictions compared to OMNeT++ simulations across various minimum PDR threshold values. The graphs highlight that XGBoost and RBFN models exhibit high accuracy. However, as the minimum PDR threshold increases, the alignment between model predictions and OMNeT++ simulations decrease, particularly evident in the PDR plot (Figure 7b). The highest accuracy is observed at a minimum PDR threshold of >80. Thus, we can conclude that the trained XGBoost and RBFN models demonstrate robust predictive capabilities."

Using the obtained models and the proposed algorithm, we made a comparison with traditional ADR, for which we carried out a simulation of Sim4 with 100 nodes that sent 216 packets over 3 days. Packets were sent with an exponential distribution and an average time between sendings of 1000 seconds. Figure 7 shows the gain of the XGBoost and RBFN models compared to the ADR algorithm depending on the value of the minimum PDR threshold.

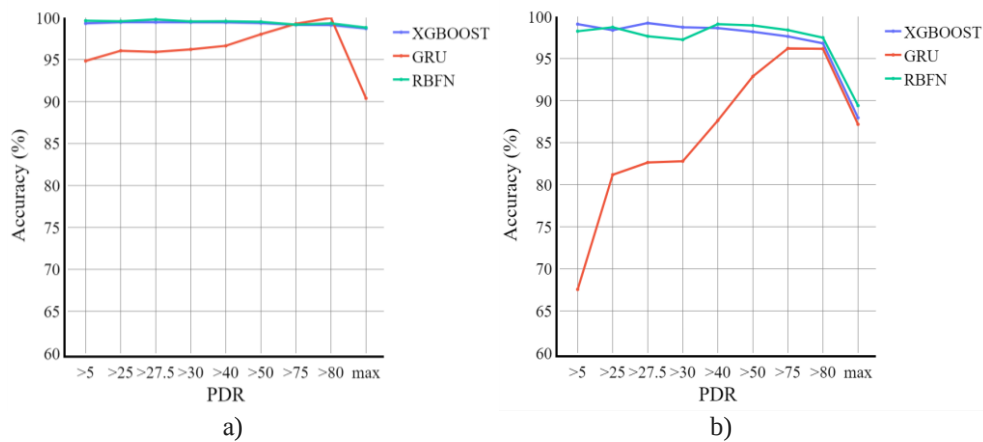


Figure 7. Determination of accuracy between filter result and OMNeT++ a) EC b) PDR

Note: compiled by the authors

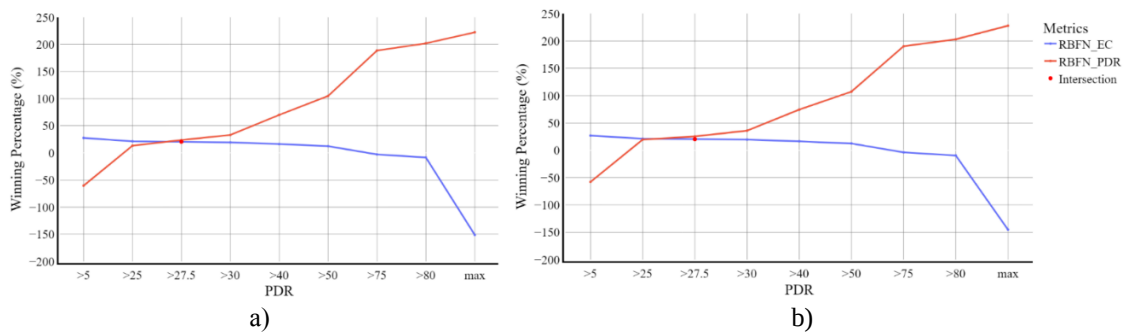


Figure 8. Determination of optimal filter parameters: a) XGBoost, b) RBFN

Note – compiled by the authors

From the graphs, it is obvious that increasing the minimum PDR threshold enhances the success rate while reducing EC. The equilibrium point occurs where the PDR and EC graphs intersect at the lower filter threshold of minPDR > 27.5. At this point, we achieve improvements in both EC and PDR. In the optimal prediction model, XGBoost, the success rate in EC was 20.43% higher and in PDR was 23.72% higher compared to ADR. Moving towards an increase in the lower PDR threshold will lead to an increase in the network PDR, but the EC also increases, which is undesirable for network efficiency. Conversely, when moving towards a lower PDR threshold, most messages will not be delivered, even though it improves energy efficiency.

The main difference of our approach is its ability to find the optimal balance between EC and performance, which significantly improves the overall efficiency of the LoRaWAN network. Our proposed method not only improves EC and PDR, but also has high accuracy in predicting optimal parameters. We selected ML methods due to their ability to efficiently process large amounts of data and accurately predict parameters, making them ideal for optimization problems in dynamic and resource-intensive networks.

CONCLUSION

This paper introduces an optimization algorithm for SF and TP parameters in LoRaWAN wireless networks using different ML methods. XGBoost, GRU, and RBFN techniques were utilized to predict optimal parameters, where XGBoost demonstrated the highest accuracy, accounting for 99.5%. The results indicate that our optimized algorithm enhanced energy efficiency by 20.43% and improved PDR value by 23.72% compared to traditional ADR methods.



The key finding of this research is to reach balance between EC and PDR, which can considerably enhance the overall performance of the LoRaWAN network. We proposed an optimal lower limit of PDR that achieves a trade-off between EC and PDR compared to traditional ADR. The relevance of the study lies in its contribution to optimizing LoRaWAN network parameters, which is essential for the long-term and reliable operation of IoT devices.

The obtained data was processed and validated in the OMNeT++ simulator using the FLoRa library. The simulation results are consistent with the model prediction results.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant AP19678552).

REFERENCES

- Porobić, V., Todorović, I., Isakov, I., Kyslan, K., & Jerkan, D. (2021). Integrated framework for development, emulation, and testing of high-level converter control functions for distributed generation sources. IEEE Access, 9, 145852-145865. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3123162>
- Bor, M., & Roedig, U. (2017, June). LoRa transmission parameter selection. In 2017 13th International conference on distributed computing in sensor systems (DCOSS) (pp. 27-34). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DCOSS.2017.10>
- Griva, A. I., Boursianis, A. D., Wan, S., Sarigiannidis, P., Psannis, K. E., Karagiannidis, G., & Goudos, S. K. (2023). LoRa-based IoT network assessment in rural and urban scenarios. Sensors, 23(3), 1695. <https://doi.org/10.3390/s23031695>
- Ghaderi, M. R., & Amiri, N. (2024). LoRaWAN sensor: energy analysis and modeling. Wireless Networks, 30(2), 1013-1036. <https://doi.org/10.1007/s11276-023-03542-y>
- Peruzzo, A., & Vangelista, L. (2018, November). A power efficient adaptive data rate algorithm for LoRaWAN networks. In 2018 21st international symposium on wireless personal multimedia communications (WPMC) (pp. 90-94). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WPMC.2018.8713092>
- Slabicki, M., PremSankar, G., & Di Francesco, M. (2018, April). Adaptive configuration of LoRa networks for dense IoT deployments. In NOMS 2018-2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (pp. 1-9). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NOMS.2018.8406255>
- Ksiazek, K., & Grochla, K. (2021, June). Flexibility analysis of adaptive data rate algorithm in lora networks. In 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC) (pp. 1393-1398). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IWCMC51323.2021.9498664>
- Park, J., Park, K., Bae, H., & Kim, C. K. (2020). EARN: Enhanced ADR with coding rate adaptation in LoRaWAN. IEEE Internet of Things Journal, 7(12), 11873-11883. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3005881>
- Babaki, J., Rasti, M., & Taskou, S. K. (2020, August). Improved configuration of transmission variables for LoRaWAN in high-noise channels. In 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEE50131.2020.9260713>
- Jiang, C., Yang, Y., Chen, X., Liao, J., Song, W., & Zhang, X. (2021). A new-dynamic adaptive data rate algorithm of LoRaWAN in harsh environment. IEEE Internet of Things Journal, 9(11), 8989-9001. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3118051>
- Cuomo, F., Garlisi, D., Martino, A., & Martino, A. (2020). Predicting LoRaWAN behavior: How machine learning can help. Computers, 9(3), 60. <https://doi.org/10.3390/computers9030060>
- Minhaj, S. U., Mahmood, A., Abedin, S. F., Hassan, S. A., Bhatti, M. T., Ali, S. H., & Gidlund, M. (2023). Intelligent resource allocation in LoRaWAN using machine learning techniques. IEEE Access, 11, 10092-10106. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3240308>



- Chen, M., Mokdad, L., Charmois, C., Ben-Othman, J., & Fourneau, J. M. (2022, May). An mdp model-based initial strategy prediction method for lorawan. In ICC 2022-IEEE International Conference on Communications (pp. 4836-4841). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9838364>.
- Alenezi, M., Chai, K. K., Jimaa, S., & Chen, Y. (2019, October). Use of unsupervised learning clustering algorithm to reduce collisions and delay within LoRa system for dense applications. In 2019 international conference on wireless and mobile computing, networking and communications (WiMob) (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2019.8923515>.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Bolatbek Askhat – PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

Болатбек Асхат Бауыржанұлы – PhD студент, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

Болатбек Асхат Бауыржанұлы – PhD студент, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
e-mail: bolatbek.askhat@kaznu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7613-5507>



Zholamanov Batyrbek – PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

Жоламанов Батырбек Нұрыллаұлы – PhD студент, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

Жоламанов Батырбек Нұрыллаұлы – PhD студент, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
e-mail: zholamanov.batyrbek@kaznu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8206-7425>



Nurgaliyev Madiyar – PhD, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

Нұрғалиев Мадияр Кәменұлы – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

Нұрғалиев Мадияр Кәменұлы – PhD, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
e-mail: madiyar.nurgaliyev@kaznu.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6795-5384>



Saymbetov Ahmet – Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

Саймбетов Ахмет Куанышбаевич – профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

Саймбетов Ахмет Куанышбаевич – профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

e-mail: asaymbetov@kaznu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3442-8550>



Abzhanova Gulnaz – Master student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

Әбжанова Гүлназ Мақсатбекқызы – магистрант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

Әбжанова Гүлназ Мақсатбекқызы – магистрант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

e-mail: abzhanova_gulnaz2@kaznu.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3113-2997>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_169
IRSTI 28.23.29

A CNN-LSTM HYBRID MODEL FOR PREDICTING AIR QUALITY AND DETECTING ANOMALIES WITH GAUSSIAN APPROXIMATION

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ CNN-LSTM ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА И ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ С ПОМОЩЬЮ ГАУССОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ

ГАУСС ЖУЫҚТАУЫН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ АУА САПАСЫН БОЛЖАУ ЖӘНЕ АНОМАЛИЯЛАРДЫ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ГИБРИДТІ CNN- LSTM МОДЕЛІ

Y. Vays ¹, A. F. Omojola ¹, S. Rakhmetullina ¹, A. Urkumbayeva ^{1*}

¹D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

*Corresponding author: Full name, e-mail: Urkumbayeva Aliya, aurkumbaeva@edu.ektu.kz

Keywords:

Air quality, Machine learning, Atmospheric pollution, Environmental monitoring, Anomaly detection.

ABSTRACT

Air pollution is a global issue affecting the health of people, the sustainability of the environment, and the planning of urban areas. The present work utilises a smart air quality data monitoring analysis system that uses machine learning algorithms in forecasting and studying atmospheric pollution concentration. Multi-pollutant forecasting in Ust-Kamenogorsk utilises the collaborative use of LSTM and CNN. The Gaussian approximation is used in detecting outliers and meteorological input is added in order to support predictive precision. The LSTM-CNN blended model was utilized in predicting the concentration of different contaminants, including PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO, and O₃. The predictive accuracy of the model was average, considering its Root Mean Squared Error (RMSE) of 0.3297. Mean absolute error (MAE) was 0.2741, indicating differences in prediction ability among contaminants. However, R² score at -0.3210 suggests that the model needs to be tuned for greater predictability. Identification of outliers was done through residual analysis, which provided a 1.0 recall but poor precision of 0.0676, indicating high false positive rate. Despite its limitations, the model has the capacity to anticipate air quality in real time and detect anomalies. Future enhancements will include hyperparameter optimization, the addition of new data sources, and the refining of the anomaly detection method for greater accuracy and dependability. This contribution goes toward the development of intelligent air quality monitoring technologies to support data-driven environmental management and policy.

Түйінді сөздер:

ауа сапасы, машиналық оқыту, атмосфераның ластануы, қоршаған ортаны бақылау, ауытқуларды анықтау.

ТҮЙІНДЕМЕ

Ауаның ластануы – адам денсаулығына, қоршаған ортаның тұрақтылығына және қалалық аумақтарды жоспарлауға әсер ететін жаһандық мәселе. Бұл жұмыста Өскемен атмосферасындағы ластанушы заттардың шоғырлануын болжау және зерттеу үшін машиналық оқыту алгоритмдерін (LSTM және CNN) пайдаланатын



ауа сапасының мониторингі деректерін талдаудың зияткерлік жүйесі қарастырылады. Гаусс жуықтауы шығарындыларды анықтау үшін қолданылады және болжамның дәлдігін қолдау үшін метеорологиялық деректер қосылады. LSTM-CNN аралас моделі PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO және O₃ сияқты әртүрлі ластаушы заттардың шоғырлануын болжайды. Модельді болжау дәлдігі орташа, оның орташа квадраттық қателігі (RMSE) 0,3297, орташа абсолютті қателік (MAE) 0,2741, бұл болжамды деректердегі дәлсіздікті көрсетеді. Дегенмен, R² -0,3210 көрсеткіші болжам дәлдігін жақсарту үшін модельді одан әрі реттеу қажет екенін көрсетеді. Шығарындыларды анықтау қалдықтарды талдау арқылы жүргізілді, ол 1,0 қайтарып алуды қамтамасыз етті, бірақ 0,0676 дәлдігі төмен, бұл жалған позитивтердің жоғары пайызын көрсетеді. Шектеулерге қарамастан, модель нақты уақыт режимінде ауа сапасын болжауға және ауытқуларды анықтауға қабілетті. Әрі қарай жақсартулар гиперпараметрлерді оңтайландыруды, жаңа деректер көздерін қосуды және дәлдік пен сенімділікті арттыру үшін ауытқуларды анықтау әдісін нақтылауды қамтиды. Бұл мақала деректерге негізделген экологиялық менеджмент пен саясатты қолдау үшін ауа сапасын бақылаудың интеллектуалды технологияларын әзірлеуге бағытталған.

Ключевые слова:

качество воздуха,
машинное обучение,
загрязнение атмосферы,
мониторинг
окружающей среды,
обнаружение аномалий.

АННОТАЦИЯ

Загрязнение воздуха – глобальная проблема, влияющая на здоровье людей, устойчивость окружающей среды и планирование городских территорий. В данной работе рассматривается интеллектуальная система анализа данных мониторинга качества воздуха, использующая алгоритмы машинного обучения (LSTM и CNN) для прогнозирования и изучения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере Усть-Каменогорска. Гауссова аппроксимация применяется для обнаружения выбросов, а метеорологические данные добавляются для поддержки точности прогноза. Смешанная модель LSTM-CNN прогнозирует концентрацию различных загрязняющих веществ, включая PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO и O₃. Точность прогнозирования модели средняя, ее среднеквадратичная ошибка (RMSE) 0,3297, средняя абсолютная ошибка (MAE) 0,2741, что указывает на неточность в предсказанных данных. Однако показатель R² -0,3210 свидетельствует о том, что модель нуждается в дальнейшей настройке для повышения точности прогноза. Идентификация выбросов проводилась с помощью анализа остатков, который обеспечил 1,0 отзыв, но низкую точность в 0,0676, что указывает на высокий процент ложных срабатываний. Несмотря на ограничения, модель способна прогнозировать качество воздуха в реальном времени и выявлять аномалии. Дальнейшие усовершенствования будут включать оптимизацию гиперпараметров, добавление новых источников данных и доработку метода обнаружения аномалий для повышения точности и надежности. Данная статья направлена на разработку интеллектуальных технологий мониторинга качества воздуха для поддержки экологического менеджмента и политики на основе данных.

INTRODUCTION

Air pollution is one of today's most pressing environmental challenges. Air quality should be evaluated and assessed on a regular basis to ensure better living circumstances. The US Environmental Protection Agency (EPA) uses the air quality index (AQI) to standardize air



quality. However, AQI demands precise and reliable sensor data as well as complicated calculations, which portable air quality measuring equipment cannot provide. Air pollution is a major environmental concern that affects millions of people throughout the world (Singh and Singh, 2017; Manisalidis et al. 2020). Increased industrialization and urbanization in the past decades have resulted in excessive emissions of air pollutants such as particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), and ozone (O₃) (Hoque et al. 2020; Meo et al. 2024; Meo et al. 2024). These air pollutants have serious health impacts, from respiratory and cardiovascular diseases to other chronic diseases. Further, air pollution speeds up environmental deterioration by altering climatic patterns and breaking down ecosystems. The need for reduced air pollution necessitates the development of advanced monitoring and forecasting systems that give policymakers and urban planners timely and accurate information.

Traditional air quality monitoring is based on stationary sensor networks that collect information from various points (Mihaita et al. 2019). While these systems are able to offer location-specific pollution measurements, they are associated with many limitations including the need for extensive maintenance, spatially limited coverage, and the slowness of data processing. Historically, there are traditional forecast models based on statistical and regression-based methods incapable of addressing complex inter-relationships among numerous different contaminants and weather indicators (Zhang et al. 2022). There is an interesting alternative presented by machine learning with the help of big data to discover complex patterns and enhance predictability accuracy (Qolomany et al. 2019; Ahmad et al. 2022).

Development in artificial intelligence and machine learning over the past couple of years has made it possible to develop very complex models that can quite effectively predict air quality (Tien et al. 2022; Ma et al. 2019). Deep learning techniques, such as Long Short-Term Memory (LSTM) and Convolutional Neural Networks (CNN), have been found to perform well in the process of time-series analysis and spatial data feature extraction of pollution data. The work employs the synergy of sequence learning with LSTM and feature learning with CNN to create a cost-effective and scalable model for air quality monitoring. In addition to pollutant concentration estimation, the model employs anomaly detection techniques for identifying unexpected surges in pollution levels, hence improving air quality estimation accuracy.

As a result of increased industrialization and urbanization, air pollution has become a serious issue necessitating effective and scalable monitoring strategies. Installing and maintaining conventional air quality monitoring stations is excessively expensive in most locations, particularly developing countries. Secondly, existing predictive techniques are rudimentary regression schemes that are devoid of the potential to capture the intricate spatiotemporal relationships of contaminants. With advancements in machine learning, in particular deep learning, it is now possible to use it to create data-driven predictive models to improve air quality monitoring and forecasting.

The motivation behind this work is the requirement for an intelligent system not only to predict pollutant concentration but also to identify anomalies that can indicate spikes in pollution or sensor malfunction. The industrially polluted region of Ust-Kamenogorsk is an ideal case study to experiment with the techniques described above. The use of LSTM networks for learning temporal patterns and CNNs for feature learning improves predictability, whereas Gaussian approximation ensures robust anomaly detection.

The research contribution presents a new hybrid model that maximizes multi-pollutant prediction by combining CNN for feature learning and LSTM for sequence modeling of time. The model improves its predictive accuracy and robustness by including climatic factors like temperature, humidity, wind speed, and atmospheric pressure. The research suggests an anomaly detection system that detects anomalies in the pollution pattern and sends an early



warning for unexpected air quality incidents. It is learned and tested on air quality records from Ust-Kamenogorsk, depicting its usability in real-world environmental monitoring. Performance of the model is compared by RMSE (0.3297), MAE (0.2741), and R^2 (-0.3210) to know where improvement would be needed.

LITERATURE SURVEY

Unnikrishnan and Rajeswari (2024) developed an ambient air pollution early warning system and a daily Air Quality Index (AQI) forecasting system over road networks. Their approach integrates a Gaussian dispersion model and a deep learning algorithm for modeling pollutant dispersion and predicting AQI values more accurately. The model effectively captures pollution dynamics caused by vehicle emissions and environmental factors. However, a key gap is the model's use of static emission rates and limited real-time traffic variability, which can undermine prediction robustness for dynamic traffic regimes. In addition, the model's scalability to larger and more complicated urban domains was not explored to the greatest degree. Future research should investigate adaptive models that use real-time traffic data, feature dynamic emission inventories, and test the system across a range of urban domains to provide enhanced reliability and generalization.

Borah (2024) implemented a Deep Learning-Based Anomaly Detection Approach for Air Pollution Assessment. A deep learning approach was proposed for detecting anomalies in air quality monitoring. To detect spatiotemporal anomalies, we used a combination of CNNs and LSTM networks. The model has a 96% recall rate but has moderate false positive rates. Deep learning algorithms are capable of detecting air pollution anomalies. Real-time implementation is a significant computing difficulty.

Wei et al. (2023): LSTM-Autoencoder-Based Anomaly Detection for Indoor Air Quality Time Series Data. I proposed an LSTM-Autoencoder model for detecting abnormalities in indoor air quality time-series data. Deep learning-based LSTM-Autoencoders were used for time series prediction. For air quality anomaly detection, we achieved an F1-score of 0.87. Deep learning approaches were demonstrated to be beneficial for detecting unanticipated pollution incidents. The anomalies identified were not interpretable, and they could not be explained.

Nguyen et al. (2023) introduced an air pollution forecast model based on a Long Short-Term Memory Bayesian Neural Network (LSTM-BNN). The method combines the temporal sequential learning capability of LSTM networks and the Bayesian inference to produce point forecasts and uncertainty estimation. The method was implemented on actual air quality data and outperformed regular LSTM and deterministic models in forecasting accuracy and uncertainty estimation. Performance showed that LSTM-BNN performed better than benchmarks for pollutant concentration estimation such as PM_{2.5} and NO₂. Its most notable limitation stated was the tremendous computational cost using Bayesian neural networks, limiting real-time deployment. Future work must involve alleviating computational cost and exploration of light-weight Bayesian architecture to enable rapid and scalable deployment in real air quality sensing systems.

El-Shafeiy et al. (2023) investigated real-time anomaly detection for water quality sensor monitoring using a multivariate deep learning technique. We proposed a deep learning approach for detecting anomalies in water quality sensors in real time. Used a multivariate LSTM-based anomaly detection framework. Accuracy in detecting anomalies exceeded 93%. Deep learning models were shown to be excellent at detecting anomalies in environmental monitoring. Applied to water quality monitoring, with little direct relevance to air pollution data.

Gilik, Ogrenici, and Ozmen (2022) proposes a hybrid deep learning model combining Convolutional Neural Networks (CNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) networks for air quality prediction. Spatial features are extracted using CNN, and temporal dependencies in the data are modeled using LSTM, achieving greater prediction accuracy compared to classical



machine learning and individual deep learning models. The method is tested on real datasets and performs better. However, one of the largest gaps in the research is the absence of detailed exploration of external influencing variables such as meteorological variables and sudden environmental events, which can significantly impact air quality but were not meaningfully integrated into the model. The applicability of the model across geographical locations is also untested. Future research must focus on incorporating larger-scale contextual information, enhancing the robustness of models to varying environmental conditions, and developing lightweight architectures that can be deployed in real time.

Zhang, Han, Li, and Lam (2022) proposed Deep-AIR as a hybrid CNN-LSTM model for accurate forecasting and estimation of metro cities for air pollution and metro cities' air quality. The CNN identifies spatial features from heterogeneous city urban data, and the LSTM depicts temporal changes in air quality. The model was tested and trained on large data sets from a range of monitoring stations in urban areas, with both higher spatial resolution and accuracy than current models. Results showed that Deep-AIR was able to detect both local gradients of pollution and larger temporal trends. A significant limitation was that the model relied on dense sensor networks, so it was less well-suited for use in areas with low data coverage. Future studies need to concentrate on improving the generalization model using sparse data and applying transfer learning techniques in a bid to tailor the model to other diverse urban environments with limited retraining.

Goh et al. (2021) created a real-time in-vehicle air quality monitoring system using a machine learning prediction algorithm. Created a real-time air quality monitoring system for vehicle applications. Machine learning regression techniques, such as Random Forest and Gradient Boosting, were used to estimate indoor vehicle air pollution concentrations. With an accuracy of 85%, the system correctly determined and predicted air pollution concentrations in automobiles. The researchers emphasized the importance of in-vehicle pollution monitoring, particularly for urban passengers. The data was limited to controlled studies in specific vehicle types, reducing its applicability to real-world driving settings.

Jesus, G., Casimiro, A., & Oliveira (2021) Machine Learning for Reliable Outlier Detection in Environmental Monitoring Systems. We used machine learning to investigate outlier detection in air sensor pollution data. For detecting abnormal levels of pollution, Isolation Forest and One-Class SVM were used. Outliers were detected in 95% of cases with few false positives. Machine learning was shown to be a solid method to distinguish sensor errors from true pollution anomalies. Multi-modal sensor data fusion and ensemble techniques were not investigated.

Dai, Huang, Wang, Zeng, and Zhou (2021) introduced an air pollutant concentration predictive model, which is a combination of multi-scale one-dimensional Convolutional Neural Networks (CNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) networks. Temporal and spatial patterns of air quality data are expected to be learned by the model. Spatial patterns of various scales are learned by multi-scale CNN, and temporal relationships are learned by LSTM. The method was applied to Xi'an, China, air quality observations with the primary pollutants like PM_{2.5} and PM₁₀. The result indicated that the model introduced in this paper performed better than typical machine learning methods and isolated deep learning models. The study acknowledged limitations like the model's reliance on historical data without taking external dynamic variables like weather conditions and urban activities into consideration. Future studies should focus on incorporating real-time socio-economic and environmental data for further improvement in the performance of predictions and resilience.

Zhang et al. (2019), Predictive Data Feature Exploration-Based Air Quality Prediction Method. To improve the precision of air quality prediction, we proposed a new feature selection technique. Combination of feature engineering and ensemble learning approaches. Improved air quality forecast precision by 12% compared to baseline models. Feature selection considerably

enhances the precision of predicted values in machine learning models. Computationally expensive, needing plenty of resources to train.

SUMMARY OF LITERATURE

Current machine learning-based air quality monitoring models are promising but have limitations, including the inability to handle intricate pollutant interactions, high computational cost, a lack of real-time deployment, and the inability to differentiate between real anomalies and sensor faults. Although deep learning models such as CNN and LSTM enhance accuracy, they are plagued by explainability and scalability problems. Generalizability is limited by the fact that many research concentrate on particular contaminants or indoor air quality. Furthermore, it can be challenging for anomaly detection methods to distinguish between real pollution incidents and sensor malfunctions. This study develops a scalable and interpretable CNN-LSTM-based model with Gaussian approximation for improved real-time anomaly detection and air quality prediction in order to get over these restrictions.

MATERIAL AND METHODS

The study makes use of meteorological factors including temperature, humidity, wind speed, and atmospheric pressure as well as air quality measurements for pollutants like PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO, and O₃ from monitoring stations in Ust-Kamenogorsk. The following is how the data is preprocessed. The CNN+LSTM Deep Learning workflow is shown in figure 1.

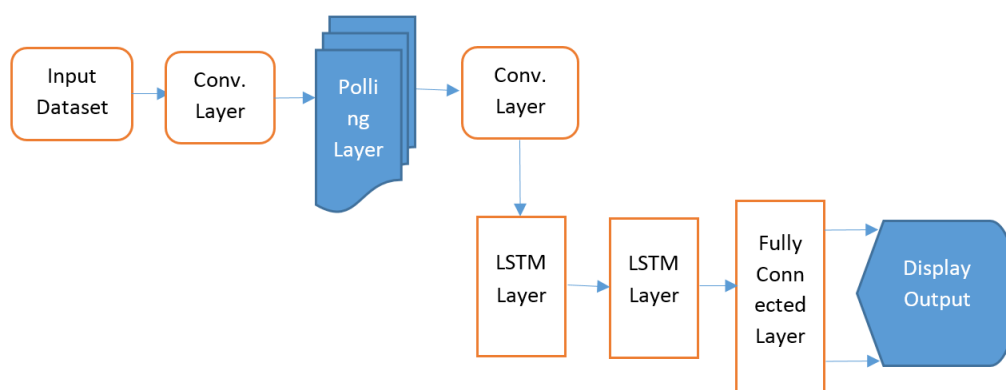


Figure 1. CNN+LSTM workflow

Note – compiled by the authors

Normalization: Pollutant values between 0 and 1 are normalized using min-max scaling.

Handling Missing Data: Linear interpolation is used to fill in missing numbers.

Time-Series Structuring: To create sequences for model training, a sliding window procedure is used.

CNN-LSTM with Gaussian Approximation Model Architecture

The following are included in the hybrid model in the suggested work:

CNN Layers: Use 1D convolutional layers to extract spatial information from air quality data.

Long-term temporal relationships in pollution trends are captured by LSTM layers.

Fully Connected Layers: Predict pollution with multiple outputs.

Gaussian Approximation: Used to identify anomalies by looking at residual model prediction errors.



Algorithm 1: The model Used in the Study

Input: Time series data on air quality is taken in by the input layer.

Output: Performance Evaluation.

Step 1: Start

Step 2: Conv1D Layer: Acquires knowledge of spatial dependencies (64 filters, kernel size 3, ReLU activation).

Step 3: Additional spatial patterns are extracted by the Conv1D Layer (32 filters, kernel size 3, ReLU activation).

Step 4: Long-term dependencies in pollutant concentrations are modeled by the LSTM Layer (64 units).

Step 5: Pollutant concentration forecasts are produced by the fully connected dense layer (6 units).

Step 6: The Gaussian Approximation Layer calculates residuals in order to identify anomalies.

Step 7: Stop

Training and Evaluation of the Model. Mean Squared Error (MSE) is the training loss function. Adam is an optimization algorithm with a 0.001 learning rate.

Model evaluation metrics include R2, Mean Absolute Error (MAE), and Root Mean Squared Error (RMSE).

Evaluation of Anomaly Detection: F1-score, precision, and recall are used to gauge detection accuracy.

RESULT AND DISCUSSION

The CNN-LSTM hybrid model for air quality prediction is demonstrated in algorithm 1. An input layer that takes in a time-series data set of pollutant levels over time (24,6) is proposed. Short oscillations are identified with the assistance of the Conv1D layers, where spatial correlations between the air quality are learned from the data. The LSTM layer is best for predictions as it can capture long dependence on pollution rates. For various contaminants, the thick output layer produces multi-class predictions as displayed in Figure 2.

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_layer_1 (InputLayer)	(None, 24, 6)	0
conv1d_2 (Conv1D)	(None, 24, 64)	1,216
conv1d_3 (Conv1D)	(None, 24, 32)	6,176
lstm_1 (LSTM)	(None, 64)	24,832
dense (Dense)	(None, 6)	390
Total params: 32,614 (127.40 KB)		
Trainable params: 32,614 (127.40 KB)		
Non-trainable params: 0 (0.00 B)		

Figure 2. Multi Pollutant Prediction

Note – compiled by the authors



The 32,614 total parameters demonstrate the model's complexity without making it computationally expensive. By removing surprise deviations, the Gaussian Approximation is integrated into anomaly detection, improving reliability. This model efficiently captures geographical and temporal correlations in air quality data, a major improvement over conventional machine learning methods. Figure 3 displays the Training versus the Validation Loss Plot.

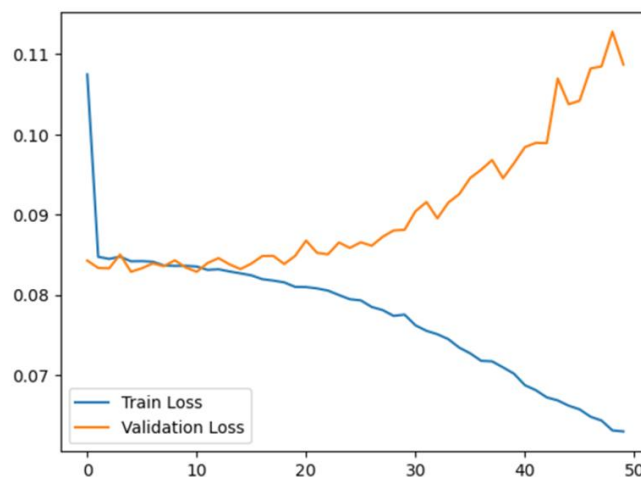


Figure 3. Training and Validation Loss Plot

Note – compiled by the authors

Train loss (blue) and validation loss (orange) are shown against 50 epochs in the second graph, which displays the model's learning curve. The initial drop of the two lines indicates good learning. However, after about 15 epochs, there are indications of overfitting as the validation loss begins to rise while the train loss continues to fall. When a model overfits, it performs well on training data but poorly on fresh, unseen test data. Regularization strategies including early halting, dropout layers, and hyperparameter adjustment can help to lessen this problem. The model may be memorizing patterns instead of generalizing, which is a problem that requires more fine-tuning, as evidenced by the steady increase in validation loss. The Actual and predicted PM2.5 Level figure is shown in figure 4.

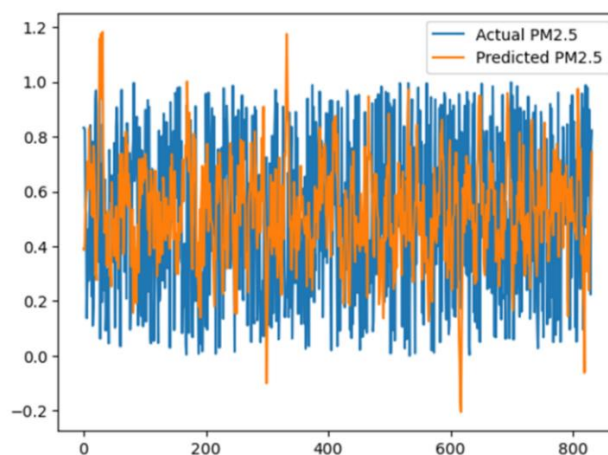


Figure 4. Actual and Predict PM2.5 Levels

Note – compiled by the authors



A comparison of the projected and actual PM2.5 levels is shown by this plot. The blue line represents the model's prediction, while the orange line represents the actual PM2.5 measurement. Although the model typically tracks the trend of the real data, there are occasional peaks and troughs where it deviates. Moderate accuracy is indicated by the RMSE value of 0.3297 and the MAE value of 0.2741. Conversely, negative R2 values (-0.3210) indicate that the model is poorly fitted and that adjustment is necessary. The variance in PM2.5 concentration is influenced by external environmental conditions, and accuracy can be improved by include more robust feature selection, such as wind speed or vehicle density. The DBSCAN clustering anomalies detection is shown in figure 5.

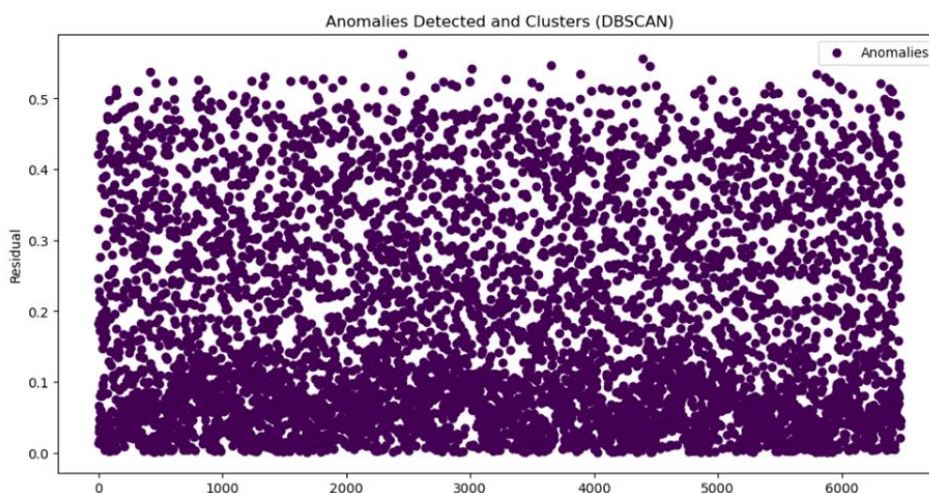


Figure 5. Anomalies detected using DBSCAN Clustering

Note – compiled by the authors

The plot uses the DBSCAN clustering algorithm to exhibit the anomalies (purple dots) that were found. Extreme deviations were identified using residual analysis, which is calculated by subtracting the observed value from the anticipated value. Anomalies were three standard deviations from the mean residual value. To detect noise and group similar abnormalities, DBSCAN was employed. However, DBSCAN's efficacy was limited since either only one cluster was found or the outliers were categorized as noise. This suggests that either the data did not contain distinct anomaly patterns or the DBSCAN hyperparameters (min_samples and eps) were not properly configured. The model had a very high recall in properly identifying anomalies (recall = 1.0), but it also produced a large number of false positives, as evidenced by the poor F1-score value of 0.0676 and low accuracy of 0.1342. More sophisticated techniques like autoencoders or isolation forests could be used to detect anomalies more effectively.

DISCUSSION

Pollutant concentrations such as PM2.5, PM10, NO2, SO2, CO, and O3 were predicted using the hybrid LSTM-CNN model. The following performance indicators were noted throughout the model's training and testing:

1. Root Mean Squared Error (RMSE): The model's RMSE of 0.3297 indicated a moderate level of prediction error. Although this suggests that the model can accurately depict the pollutant concentration trend, it could be improved to lower the inaccuracy.

2. MAE (Mean Absolute Error): The model's average prediction error is approximately 27.4%, with an MAE of 0.2741. This shows that the model can estimate pollutant quantities, but it also shows that prediction accuracy varies throughout contaminants.



3. R^2 (R-Squared): A score of -0.3210 for R^2 suggests that the model does not match the test data adequately. R^2 negative values typically indicate that the model's prediction is worse than the average of the actual values. This suggests that the model still need fine-tuning to improve prediction accuracy.

4. Test Loss: With a test loss of 0.1087, the overall model loss is rather small, but it does highlight areas for performance improvement.

KEY FINDINGS

The growing validation loss indicates that to avoid overfitting, regularization techniques like dropout layers and early stopping must be used.

Although it needs more accurate peak value projections, the CNN-LSTM model can identify pollution patterns. To reduce prediction errors, feature engineering may entail including more environmental variables.

Reasonable anomaly segmentation could not be produced using DBSCAN clustering. Anomaly classification would be enhanced by additional techniques like hybrid models or dynamic thresholding.

The model shows promise for monitoring air quality in real-time, but it needs to be optimized for application in different metropolitan locations.

THREAT TO VALIDITY

The validity of this study is threatened by issues with model development, statistical results, generalizability, and data dependability. Missing values and sensor errors compromise internal validity, while the data's spatial specificity restricts outward validity. Due to the underrepresentation of significant environmental variables, feature selection compromises construct validity. Overfitting and low precision (0.0676) in identifying anomalies put statistical validity at risk, increasing the likelihood of false positives. Validation is further limited by the absence of labeled anomaly data. Future research should focus on enhancing robust validation methods, feature selection, hyperparameter tweaking, and diverse datasets.

CONCLUSION

The study recommended developing a CNN-LSTM hybrid model for anomaly detection and air quality prediction that incorporates an in-painted Gaussian approximation. With a reasonable RMSE of 0.3297 and MAE of 0.2741, the model demonstrated efficacy in learning the trend of pollutants and may be used as a real-time air quality forecasting model. The model functioned well overall, despite the negative R^2 (-0.3210) value suggesting room for improvement to boost prediction accuracy. The anomaly detection process based on DBSCAN clustering has a 1.0 recall rate, a poor precision of 0.0676, and a significant rate of false positives. Overfitting was shown by the validation loss curve, indicating that while the model did well on training data, its generalization ability is still lacking. Despite these obstacles, this study presents data-driven strategies for reducing environmental pollution and aids in the development of machine learning-enhanced air quality monitoring systems. Future research should focus on using transfer learning and integrating additional environmental elements (such as traffic congestion and industrial toxins) to raise forecast accuracy to improve the system's efficiency and scalability as suggested.

To strengthen the model and avoid overfitting, dropout layers, early halting, and hyperparameter adjustment are used.



REFERENCES

- Ahmad, T., Madonski, R., Zhang, D., Huang, C., & Mujeeb, A. (2022). Data-driven probabilistic machine learning in sustainable smart energy/smart energy systems: Key developments, challenges, and future research opportunities in the context of smart grid paradigm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112128>
- Borah, A. (2024). Deep Learning based Anomaly Detection Approach for Air Pollution Assessment. *IEEE Transactions on Big Data*.
- Dai, H., Huang, G., Wang, J., Zeng, H., & Zhou, F. (2021). Prediction of air pollutant concentration based on one-dimensional multi-scale CNN-LSTM considering spatial-temporal characteristics: A case study of Xi'an, China. *Atmosphere*, 12(12), 1626. <https://doi.org/10.3390/atmos12121626>
- El-Shafeiy, E., Alsabaan, M., Ibrahim, M. I., & Elwahsh, H. (2023). Real-time anomaly detection for water quality sensor monitoring based on multivariate deep learning technique. *Sensors*, 23(20), 8613. <https://doi.org/10.3390/s23208613>
- Gilik, A., Ogrenci, A. S., & Ozmen, A. (2022). Air quality prediction using CNN+ LSTM-based hybrid deep learning architecture. *Environmental science and pollution research*, 1-19. DOI: 10.1007/s11356-021-16227-w
- Goh, C. C., Kamarudin, L. M., Zakaria, A., Nishizaki, H., Ramli, N., Mao, X., ... & Elham, M. F. (2021). Real-time in-vehicle air quality monitoring system using machine learning prediction algorithm. *Sensors*, 21(15), 4956.
- Hoque, M. M., Ashraf, Z., Kabir, H., Sarker, E., & Nasrin, S. (2020). Meteorological influences on seasonal variations of air pollutants (SO₂, NO₂, O₃, CO, PM_{2.5} and PM₁₀) in the Dhaka megacity. *Am. J. Pure Appl. Biosci*, 2(2), 15-23. DOI:10.34104/ajpab.020.15023
- Jesus, G., Casimiro, A., & Oliveira, A. (2021). Using machine learning for dependable outlier detection in environmental monitoring systems. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 5(3), 1-30. <https://doi.org/10.1145/3445812>
- Ma, J., Cheng, J. C., Lin, C., Tan, Y., & Zhang, J. (2019). Improving air quality prediction accuracy at larger temporal resolutions using deep learning and transfer learning techniques. *Atmospheric Environment*, 214, 116885.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 8, 14. doi: 10.3389/fpubh.2020.00014
- Meo, S. A., Salih, M. A., Alkhalifah, J. M., Alsomali, A. H., & Almushawah, A. A. (2024). Effect of air pollutants particulate matter pm_{2.5}, pm₁₀, carbon monoxide (co), nitrogen dioxide (no₂), sulfur dioxide (so₂), and ozone (o₃) on fractional exhaled nitric oxide (feno). *Pakistan Journal of Medical Sciences*, 40(8), 1719. doi: 10.12669/pjms.40.8.9630
- Meo, S. A., Salih, M. A., Alkhalifah, J. M., Alsomali, A. H., & Almushawah, A. A. (2024). Environmental pollutants particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), Carbon Monoxide (CO), Nitrogen dioxide (NO₂), Sulfur dioxide (SO₂), and Ozone (O₃) impact on lung functions. *Journal of King Saud University-Science*, 103280. DOI: 10.26355/eurrev_202401_35079
- Mihăiță, A. S., Dupont, L., Chery, O., Camargo, M., & Cai, C. (2019). Evaluating air quality by combining stationary, smart mobile pollution monitoring and data-driven modelling. *Journal of cleaner production*, 221, 398-418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.179>
- Nguyen, H. A., Ha, Q. P., Duc, H., Azzi, M., Jiang, N., Barthelemy, X., & Riley, M. (2023). Long short-term memory Bayesian neural network for air pollution forecast. *IEEE Access*, 11, 35710-35725.
- Qolomany, B., Al-Fuqaha, A., Gupta, A., Benhaddou, D., Alwajidi, S., Qadir, J., & Fong, A. C. (2019). Leveraging machine learning and big data for smart buildings: A comprehensive



- survey. IEEE Access, 7, 90316-90356.
- Singh, R. L., & Singh, P. K. (2017). Global environmental problems. Principles and applications of environmental biotechnology for a sustainable future, 13-41.
- Tien, P. W., Wei, S., Darkwa, J., Wood, C., & Calautit, J. K. (2022). Machine learning and deep learning methods for enhancing building energy efficiency and indoor environmental quality—a review. Energy and AI, 10, 100198. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100198>
- Unnikrishnan, A., & Rajeswari, S. (2024). Forecasting Daily Air Quality Index and Early Warning System for Estimating Ambient Air Pollution on Road Networks Using Gaussian Dispersion Model with Deep Learning Algorithm. Tehnički glasnik, 18(4), 549-559.
- Wei, Y., Jang-Jaccard, J., Xu, W., Sabrina, F., Camtepe, S., & Boulic, M. (2023). LSTM-autoencoder-based anomaly detection for indoor air quality time-series data. IEEE Sensors Journal, 23(4), 3787-3800.
- Zhang, Q., Han, Y., Li, V. O., & Lam, J. C. (2022). Deep-AIR: A hybrid CNN-LSTM framework for fine-grained air pollution estimation and forecast in metropolitan cities. IEEE Access, 10, 55818-55841.
- Zhang, Q., Han, Y., Li, V. O., & Lam, J. C. (2022). Deep-AIR: A hybrid CNN-LSTM framework for fine-grained air pollution estimation and forecast in metropolitan cities. IEEE Access, 10, 55818-55841. Doi:10.1109/ACCESS.2022.3174853
- Zhang, Y., Wang, Y., Gao, M., Ma, Q., Zhao, J., Zhang, R., ... & Huang, L. (2019). A predictive data feature exploration-based air quality prediction approach. IEEE Access, 7, 30732-30743.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Вайс Юрий Андреевич – техника ғылымдарының кандидаты,
Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен қ., Қазақстан

Вайс Юрий Андреевич – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Vays Yuriy Andreevich – Candidate of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: YuVais@edu.ektu.kz,
ORCID: 0000-0002-2964-8260,



Омоджолла Айогоке Феликс – Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Омоджолла Айогоке Феликс – Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

Omojola Ayogoke Felix – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: felixayogoke1@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0297-6044>



Рахметуллина Сәуле Жәдігерқызы – техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Рахметуллина Сауле Жадыгеровна – кандидат технических наук, Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

Rakhmetullina Saule Zhadygerovna – Candidate of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: SRakhmetullina@edu.ektu.kz,

ORCID: 0000-0002-1729-3343



Уркумбаева Алия Муратовна – техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Уркумбаева Алия Муратовна – кандидат технических наук, Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Urkumbayeva Aliya Muratovna – Candidate of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: aurkumbaeva@edu.ektu.kz,

ORCID: 0009-0008-9630-6448



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_182

IRSTI 20.15.13

COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMIZATION MODELS FOR RESOURCE ALLOCATION IN UNCERTAIN IT ENVIRONMENTS

АНЫҚТАЛМАҒАН ІТ ОРТАЛАРЫНДА РЕСУРСТАРДЫ БӨЛУДІҢ ОҢТАЙЛАНДЫРУ МОДЕЛЬДЕРІНЕ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ІТ-СРЕДЫ

N.S. Yesmukhamedov¹, S.Z. Sapakova¹, B.K. Sinchev¹, N.S. Yesmukhamedov¹

¹International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

* Corresponding author: Saya Sapakova, e-mail: s.sapakova@iitu.edu.kz

Keywords:

optimization, resource allocation, dynamic problems, mathematical models, integer programming, multi-agent systems, Markov processes.

ABSTRACT

This study addresses the challenge of resource allocation in dynamic and uncertain environments by evaluating five mathematical models: Markov Decision Process (MDP), Integer Programming, Multi-Agent Systems, Scheduling Problems, and Assignment Models. The relevance of this problem lies in the need for effective decision-making tools under time and resource constraints, particularly in IT and service-oriented industries where operations are often unpredictable and require adaptive optimization strategies. The main aim of this research is to perform a comparative analysis of the selected models using performance metrics such as execution time, cost, and memory consumption. The research methodology involves conducting a series of simulations on synthetically generated datasets that reflect realistic operating conditions in terms of workload variability, task dependencies, and limited resources. Results indicate that Integer Programming delivers the lowest solution cost but requires significantly more execution time, making it suitable for scenarios where accuracy outweighs speed. On the other hand, MDP and Multi-Agent models offer faster computation and flexibility, but with relatively higher solution costs. Scheduling and Assignment Models demonstrate a balanced trade-off but are less scalable under complex constraints. These findings highlight the inherent trade-off between time efficiency, computational complexity, and solution optimality. The proposed comparison contributes to identifying suitable approaches based on task-specific priorities and operational goals. The theoretical significance of the work lies in the integration of multiple optimization techniques into a structured comparative framework, enhancing the understanding of model behaviour under uncertainty. The practical contribution focuses on guiding system architects and decision-makers in selecting the most appropriate modelling tools for real-time systems in IT and service environments. Future work will explore enhancements to scalability, hybrid modelling strategies, and adaptive algorithms to support industrial-scale implementations with dynamic data inputs.



Түйінді сөздер:

оңтайландыру,
ресурстарды бөлу,
динамикалық есептер,
математикалық
модельдер, бүтін
сандармен
программалау, көп
агентті жүйелер,
Марков процесстері.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл зерттеу жұмысы динамикалық және белгісіз ортада ресурстарды бөлудің тиімді жолдарын қарастырып, бес түрлі математикалық модельге салыстырмалы талдау жүргізуді мақсат етеді. Қарастырылған модельдер: Марков шешім қабылдау процесі (MDP), бүтінсандық бағдарламалау, көпагентті жүйелер, жоспарлау есептері және тағайындау модельдері. Зерттеліп отырған мәселенің өзектілігі – IT және қызмет көрсету салаларында уақыт пен ресурстар шектеулі жағдайда тиімді шешім қабылдау құралдарының қажеттілігінде. Бұл салада процестер жиі өзгеріп отырады, сондықтан оңтайландыруға бейімделген тәсілдер қажет. Зерттеудің негізгі мақсаты – көрсетілген модельдерді орындау уақыты, шешім құны және жад пайдалану сияқты критерийлер бойынша салыстыру. Зерттеу әдістемесі – нақты жағдайларды ескере отырып жасалған синтетикалық деректер негізінде бірқатар модельдеу тәжірибелерін жүргізуге негізделген. Нәтижелер бүтінсандық бағдарламалау моделінің шешімнің ең төменгі құнын қамтамасыз ететінін көрсетті, бірақ оны орындау уақыты басқа әдістерге қарағанда көбірек. MDP және көпагентті жүйелердің орындалу жылдамдығы жоғары, бірақ шешім құны қымбатырақ. Жоспарлау және тағайындау модельдері нәтижелері орташа, алайда күрделі жағдайларда масштабталуы қиындау. Зерттеудің теориялық маңыздылығы – бірнеше оңтайландыру әдістерін салыстырмалы құрылымға біріктіру. Ал практикалық маңыздылығы – нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін жүйелер үшін модельдерді таңдауға әдістемелік негіз беруінде. Болашақта зерттеу бағыттары модельдердің икемділігін және өндірістік ауқымдағы бейімделу мүмкіндіктерін арттыруға бағытталады.

Ключевые слова:

оптимизация,
распределение
ресурсов,
динамические задачи,
математические
модели, целочисленное
программирование,
мультиагентные
системы, марковские
процессы.

АННОТАЦИЯ

Данное исследование посвящено решению задачи распределения ресурсов в условиях динамичной и неопределённой среды путём сравнительного анализа пяти математических моделей: марковский процесс принятия решений (MDP), целочисленное программирование, многоагентные системы, задачи расписания и модели назначения. Актуальность проблемы заключается в необходимости эффективных инструментов поддержки принятия решений в условиях ограниченности времени и ресурсов, особенно в IT-сфере и сервисных отраслях, где процессы часто носят нестабильный характер и требуют адаптивных подходов к оптимизации. Цель исследования – провести сопоставительный анализ указанных моделей по таким критериям, как время выполнения, стоимость решения и потребление памяти. Методология исследования включает серию симуляционных экспериментов на синтетически сгенерированных данных, отражающих реальные условия функционирования: изменчивую нагрузку, зависимость задач и ограниченные ресурсы. Результаты показали, что модель целочисленного программирования обеспечивает наименьшую стоимость решения, но требует больше времени на выполнение, что делает её применимой в сценариях, где приоритетом является точность. Модели на основе MDP и многоагентного подхода демонстрируют более быстрое выполнение, но с повышенными затратами. Модели расписания и назначения показывают сбалансированные результаты, но хуже масштабируются при усложнении



условий. Выводы исследования подчёркивают необходимость выбора модели на основе приоритетов – скорости или минимизации затрат. Теоретическая значимость работы заключается в объединении различных методов оптимизации в единую сравнительную структуру. Практическая ценность состоит в предоставлении рекомендаций по выбору подходящих инструментов моделирования для систем реального времени. В дальнейшем планируется расширение масштабируемости моделей и интеграция адаптивных алгоритмов для промышленного применения.

INTRODUCTION

Modern IT services operate in conditions of high variability: tasks enter the system at random times, performers have different availability and qualifications, and requirements for deadlines and priorities can quickly change. Such features are typical for technical support, cloud infrastructure maintenance, DevOps process support and other areas of IT services. In these conditions, it becomes critically important to effectively distribute tasks between available performers, minimizing response time, reducing costs and adhering to service level agreements (SLAs).

Traditional methods of work allocation, based on static information and predetermined schedules, are ineffective in the presence of incomplete or constantly changing information. This creates a need for new mathematical models and optimization methods that can take into account the dynamic nature of the environment, uncertainty, and the stochastic nature of incoming tasks.

The objective of this study is to develop and analyze mathematical models of task distribution in an IT environment with dynamic parameters, as well as to compare various optimization approaches: from classical heuristics and linear programming methods to stochastic models such as Markov decision processes (MDP) and modern reinforcement learning algorithms. The proposed models are focused on practical application in real-time systems and are aimed at improving the efficiency and sustainability of IT process management.

The problem of efficient task allocation among agents in dynamic and distributed computing environments remains one of the central challenges in the field of optimization and intelligent management systems. Contemporary approaches to this issue encompass a wide range of methods — from classical heuristics to reinforcement learning algorithms applied under conditions of uncertainty and stochastic variability.

LITERATURE REVIEW

The literature pays particular attention to aspects such as cooperative agent interaction, limited resource availability, time constraints, and the necessity for real-time adaptive strategies. This section provides a critical analysis of current scientific publications focusing on mathematical models and optimization methods used to solve task allocation problems across various architectures — from edge and cloud systems to clusters designed for machine learning. The issue of dynamic and cooperative task allocation in distributed environments has been actively studied in recent years in the context of enhancing the efficiency of distributed computing systems. The DC-MATA (Dynamic and Cooperative Multi-Agent Task Allocation) problem is considered within the framework of cooperative organization involving individually rational agents. The author proposes a learning-based approach that improves Nash equilibrium convergence in dynamically changing conditions (Costa, 2024).

The problem of dynamic task allocation and service migration in Edge-Cloud IoT systems is discussed in (Dynamic Task Allocation and Service Migration in Edge-Cloud IoT System Based on Deep Reinforcement Learning, 2022), where the goal is to minimize cloud load while considering migration and latency constraints. The proposed solution is based on the Deep



Deterministic Policy Gradient (DDPG) algorithm, which effectively learns in discrete action spaces. A further development of optimal task offloading strategies in edge environments is presented in (Pradhan, Tripathy & Matam, 2024), where the focus is on predicting resource availability before making offloading decisions. The reinforcement learning approach improves resource utilization and reduces idling. The optimization of task offloading in MEC environments with stochastic task arrivals is addressed in (Dynamic Task Offloading Optimization in Mobile Edge Computing Systems with Time-Varying Workloads Using Improved Particle Swarm Optimization, 2024). The authors apply a modified Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for adaptive task redistribution. The method outperforms Genetic Algorithms (GA) and Simulated Annealing in terms of performance. Han, Li, and Zhou (2023) propose a service migration strategy designed for edge environments with limited resources. A multidimensional Markov decision process combined with a Deep Q-Network (DQN) algorithm enables near-optimal decision-making, leading to reduced latency and energy consumption. Another important direction in the literature is multi-resource scheduling, particularly in machine learning clusters. Studies (Joe-Wong et al., 2012; Peng et al., 2018; Gu et al., 2019) emphasize that most existing systems focus on a single resource type (e.g., GPU), which compromises scheduling accuracy and efficiency in environments with resource competition. Recent works (Li et al., 2023; Noghabi et al., 2020) highlight the increasing demand for systems that enable adaptive task allocation, considering multiple resource types and the stochastic nature of task arrivals. Reinforcement learning (RL) has emerged as a critical tool for addressing these challenges, particularly in online combinatorial environments with complex constraints (Yu et al., 2021; Mao et al., 2016; Xu et al., 2023). Allocating resources to process tasks online is a complex problem, especially when resource availability is uncertain. One effective approach to address this challenge is to adapt task allocation problem formulations to account for dynamic resource availabilities. This can be achieved by using a prediction model that estimates task processing times for all authorized resources. The proposed adaptations have been evaluated and compared with traditional allocation strategies, such as shortest queue, random, and round-robin methods, showing better performance (Kunkler & Rinderle-Ma, 2024). In scenarios where resource demand is volatile and stochastic, the uncertainty in resource availability must be considered for optimal allocation. To tackle this, a stochastic programming framework is introduced for resource distribution problems. This framework ensures that the allocation is both efficient and adaptive to changing conditions. Experimental results demonstrate that the stochastic method outperforms deterministic approaches, achieving an average improvement of 1% in expected revenue (Lee et al., 2024).

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH

This paper discusses various mathematical models for optimizing task allocation in dynamic IT environments. These models allow one to effectively consider uncertainty, variability, and constraints in real time. Stochastic models, integer programming problems, multi-agent systems, and queueing theories are proposed as the main optimization tools. Each of the models will be considered from the point of view of its application in real IT environments, such as technical support, CI/CD processes, and infrastructure management.

MDP (Markov Decision Process)

We consider a system in which the state of the environment at time step t is designated as s_t , action (task distribution) — a_t , and the objective function is the maximum expected reward (for example, minimizing the total downtime or SLA violations):

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} \mathbb{E}[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t)], \quad (1)$$



where:

π - strategy (policy),

$R(s_t, a_t)$ - reward (e.g. penalty for SLA violation),

$\gamma \in [0,1]$ - discount factor.

The transition between states is modeled by probabilities $P(s_{t+1} | s_t, a_t)$ that may be known or estimated.

Formulating the problem as an integer programming problem

The model is applied in pseudo-static or quasi-dynamic conditions (for example, in the context of planning in small time windows):

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} x_{ij}, \quad (2)$$

at restrictions:

- $\sum_j x_{ij} \leq 1, \forall i$ - each task is assigned to no more than one performer.
- $\sum_i x_{ij} \leq C_j, \forall j$ - do not exceed the performer's limit j ;
- $x_{ij} \in 0,1$

where:

- c_{ij} - the cost of assigning a task i to an executor j ;

- C_j - resource limitation.

Multi-agent production

Each executor is an agent that decides whether to accept or reject a task based on its local state s_{tj} . The system strives for equilibrium or global optimization through coordination (e.g., using auctions, RL, or contract algorithms):

Each worker is an agent that decides whether to accept or reject a task based on the local state s_t^j . The system strives for equilibrium or global optimization through coordination (e.g., auctions, RL, or contract algorithms):

$$\forall j \in \mathcal{A}: a_t^j = \arg \max_{a \in A^j} Q^j(s_t^j, a), \quad (3)$$

where:

Q^j - assessment of the benefit of the agent's action j ;

$\mathcal{A}$ - set agents (performers).

The following models are widely used to describe systems with dynamic task arrival and limited resources. In the context of IT services, tasks arrive at a certain rate (e.g. Poisson), and it is necessary to distribute them among several performers to minimize waiting time or SLA violations.

Mathematical model of task schedule

Let's consider a set of problems:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\},$$

and many performers:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}.$$

Let c_{ij} be the costs (time, labor or cost) associated with the execution of the task t_i by the performer w_j , and $x_{ij} \in 0,1$ let be a binary variable that takes the value 1 if the task t_i is assigned to the performer w_j .

Target function:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} \cdot x_{ij}. \quad (4)$$



Restrictions:

Each task must be assigned to one performer:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \forall i \in 1, \dots, n. \quad (5)$$

The total load of the performer must not exceed the permissible value L_j :

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot d_i \leq L_j, \forall j \in 1, \dots, m, \quad (6)$$

where d_i is the duration of the task t_i .

Assignment model

This is a special case when the number of tasks and performers coincides, and each task must be assigned to one performer. Model is described next way:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}, \quad (7)$$

at restrictions:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, x_{ij} \in 0,1. \quad (8)$$

RESULTS AND THEIR DISCUSSION

This paper addresses the problem of dynamic task allocation in an IT system, where multiple performers with limited resources require efficient optimization methods to enhance performance and minimize costs. The task is to optimally distribute tasks between performers under conditions of changing priorities, time and resource constraints.

The system must consider the following aspects:

- Dynamism: Tasks arrive randomly with different priorities, execution times, and resource requirements. These characteristics may change over time, requiring an adaptive approach to their distribution.
- Limited resources: Each executor has a limitation on time or computing resources (e.g. network bandwidth, server power).
- Task priorities: Tasks have different priorities depending on their importance, deadlines, and other factors, requiring flexibility in deciding which tasks to process first.
- Uncertainty: Incoming task statistics may change, and the exact information about tasks may not be complete at the time they are received.

Thus, the real-time task allocation problem can be formulated as: Minimize the total waiting time, the level of SLA violation (if any), and optimize resource utilization given the constraints.

Restrictions:

1. Each task must be assigned to one performer.
2. The total load of the performer must not exceed its resource limitations.
3. Priority tasks should be processed first.
4. The task execution time cannot exceed its time limit.

The dynamic nature of the problem suggests the use of adaptive and learning models that can change their decisions depending on changes in incoming data and the current state of the system.

Algorithm for solving the problem

The following diagram (Fig. 1) illustrates the algorithm for dynamic task distribution and strategy evaluation. It outlines the steps involved in selecting the appropriate distribution strategy, evaluating its effectiveness, and adapting to changing conditions using techniques such as MDP, multi-agent systems, and reinforcement learning.

The following table provides a quick overview of the various criteria that can be used to evaluate mathematical models in the task allocation problem in a dynamic IT environment. Each criterion plays a key role in deciding on the choice and application of a model in real-world conditions, where not only theoretical efficiency but also practical suitability is important.

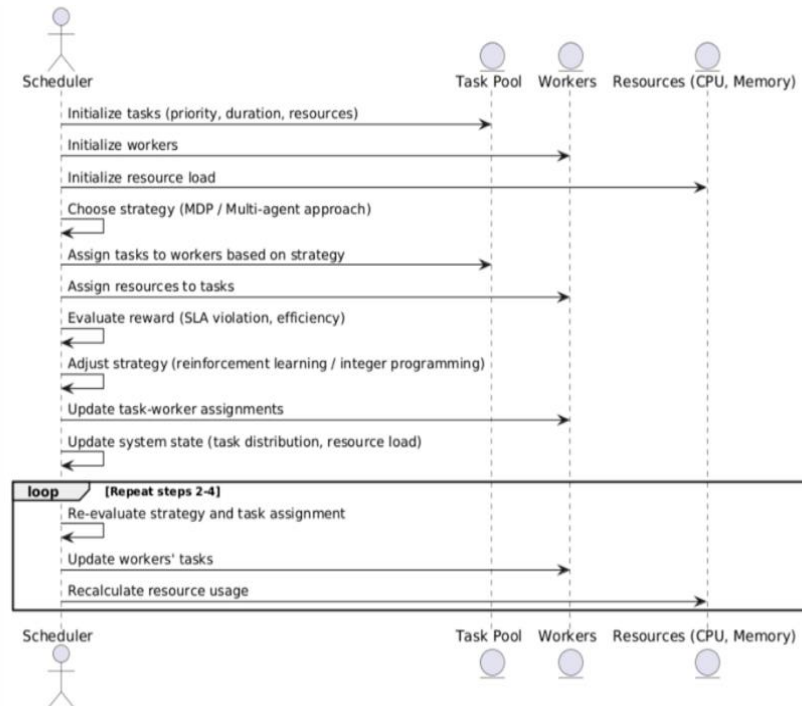


Figure 1. Task Distribution and Strategy Evaluation Algorithm

Note – compiled by the authors based on the main task-related objects.

Table 1. Criteria for evaluating task distribution models in a dynamic environment

Criterion	Description	Significance
Accuracy optimization	Measures how close the found solution is to the theoretically optimal one.	Important for assessing the effectiveness of models in solving optimization problems with constraints.
Time execution	Estimation of the duration of the problem-solving process for different sizes of input data.	Key criterion for tasks with real-time requirements.
Resilience to change in a dynamic environment	The ability of the model to adapt to changes in task parameters and changes in operating conditions.	Important for systems with frequent changes in conditions.
Flexibility and scalability	The ability of the model to work with different problem scales and adapt to different conditions.	Essential for working in environments with changing requirements or large volumes of data.
Solution quality when input data changes	Assessing the stability of a model's solution when input data such as cost or load change.	Important for ensuring stability and reliability of decisions in conditions of uncertainty.



End of table 1

Criterion	Description	Significance
Used resources	Consumption of computing resources (memory, CPU time, etc.) by the model.	Assessing the efficiency of resource use, especially in conditions of limited capacity.
Sensitivity to initial conditions	The influence of changes in initial conditions on the final solution.	Helps to assess the stability of the model and its ability to cope with data variations.
Explainability and transparency solutions	The ability to explain how the model came to its decision and understand its logic.	Key to trust in the system and to correct possible errors.
Security qualities service level agreement (SLA)	The ability of the model to meet service level agreements (e.g. response time).	Important to meet service standards and ensure required quality.
Simplicity implementations	Ease of integration of the model into an existing IT system and its adaptation to real-world conditions.	Assessing the complexity of implementing the model in an industrial environment.
<i>Note – compiled by the author based on personal analysis and interpretation.</i>		

If we apply these parameters in the context of your current project (for example, the task of assigning tasks between performers), we can use the table to compare different algorithms in more detail:

The input data for solving the task of optimal assignment of tasks to workers includes the following parameters:

1. Number of tasks (n_{tasks}) – the total number of tasks that need to be assigned to available workers.
2. Number of workers (n_{workers}) – the total number of workers available to perform the tasks.
3. Cost matrix (cost matrix) – a matrix representing the cost of assigning each task to a specific worker. The matrix has dimensions ($n_{\text{tasks}} \times n_{\text{workers}}$), where each element represents the cost of assigning a particular task to a specific worker.

For example, if the number of tasks is 10 and the number of workers is 5, the following cost matrix might be generated:

$$\text{cost} = \begin{bmatrix} 47 & 13 & 97 & 79 & 83 \\ 34 & 89 & 26 & 74 & 31 \\ 56 & 43 & 29 & 8 & 69 \\ 34 & 13 & 60 & 98 & 44 \\ 48 & 65 & 81 & 17 & 74 \\ 81 & 54 & 74 & 90 & 37 \\ 98 & 66 & 40 & 95 & 76 \\ 35 & 58 & 94 & 91 & 73 \\ 85 & 75 & 42 & 14 & 93 \\ 89 & 6 & 8 & 59 & 28 \end{bmatrix}$$

Figure 2. Cost matrix

Note – compiled by the author

The values in this matrix define the cost of assigning each task to a specific worker. For instance, the first worker would complete the first task at a cost of 47 units, the second worker at



a cost of 13 units, and so on. This matrix serves as the basis for solving the optimal assignment task using various algorithms.

For each optimization algorithm (including linear programming, greedy algorithms, and random methods), this data is used to compute performance metrics such as:

Execution time — the time taken to solve the task.

Cost — the total cost of the solution compared to other methods.

Iterations (for iterative algorithms) — the number of steps required to reach a solution.

Memory — the amount of memory used to solve the task.

Standard deviation of task distribution — a measure of the spread of task assignments among workers, indicating the balance of the assignment.

Deviation from the optimal solution — the difference between the found solution and the theoretically optimal solution to the task.

Using these data points in combination with different algorithms allows for a comparative analysis of the solution methods based on the specified criteria.

MDP:
Execution Time: 0.0003 seconds
Total Cost: 503.6
Memory Usage: 108.77 MB

Integer Programming:
Execution Time: 0.0925 seconds
Total Cost: 305.0
Memory Usage: 110.30 MB

Multiagent:
Execution Time: 0.0000 seconds
Total Cost: 443
Memory Usage: 110.30 MB

Scheduling:
Execution Time: 0.0003 seconds
Total Cost: 14.0
Memory Usage: 110.34 MB

Assignment:
Execution Time: 0.0003 seconds
Total Cost: 113.0
Memory Usage: 110.38 MB

Figure 3. Comparative Analysis of Solution Methods

Note – based on experimental results obtained by the author

The results (Fig.1) of the comparison between five optimization models — MDP (Markov Decision Process), Integer Programming, Multiagent, Scheduling, and Assignment — based on execution time, total cost, and memory usage are as follows:

1. Execution Time: The Multiagent and Scheduling models demonstrate the shortest execution time (0.0000 seconds), indicating high computational efficiency. The MDP and Assignment models also show fast execution times (0.0003 seconds), while Integer Programming exhibits the longest execution time (0.0925 seconds), reflecting its higher computational complexity.

2. Total Cost: The Scheduling model achieves the lowest total cost (14.0), making it the most cost-effective solution. The Integer Programming model provides a competitive cost (305.0), presenting a viable alternative for optimization. The MDP model incurs a higher cost (503.6), while the Assignment model results in a total cost of 113.0. The Multiagent model, although efficient in execution time, results in a higher total cost (443).

3. Memory Usage: Memory usage across all models is relatively consistent. The MDP model uses 108.77 MB, while the other models (Integer Programming, Multiagent, Scheduling, and Assignment) use between 110.30 MB and 110.38 MB.



CONCLUSION

The models analyzed in this study are especially relevant for solving dynamic and evolving optimization problems, which are commonly encountered in real-world applications such as resource allocation, scheduling, and decision-making in uncertain environments. Tasks with dynamic characteristics, such as those found in multi-agent systems, require continuous adaptation to changing conditions, making the choice of optimization model critical.

In dynamic environments, where parameters and conditions fluctuate over time, the Markov Decision Process (MDP) model proves particularly useful due to its ability to model sequential decision-making and account for future uncertainties. Similarly, multi-agent systems are well-suited for dynamic scenarios, as they allow for the decentralized coordination of agents that can independently respond to changes in the environment.

Integer Programming and Scheduling models, while more static in nature, can still be applied effectively when the dynamics of the task are well-defined or can be discretized, though they may require more computation to account for the real-time changes.

From the obtained results, we observe the following: the MDP model demonstrated the fastest execution time of 0.0003 seconds with a total cost of 503.6, but its memory usage was relatively high at 108.77 MB. The Integer Programming model, while taking slightly longer with an execution time of 0.0925 seconds, provided the lowest total cost of 305.0 and used 110.30 MB of memory. The Multiagent model exhibited a very low execution time of 0.0000 seconds, with a total cost of 443 and a memory usage of 110.30 MB, making it highly efficient in terms of time but less cost-effective. The Scheduling model had an execution time of 0.0003 seconds and a very low cost of 14.0, with minimal memory usage of 110.34 MB. The Assignment model had an execution time of 0.0003 seconds, with a total cost of 113.0 and a memory usage of 110.28 MB, demonstrating fast processing with moderate cost.

These findings underscore the importance of choosing an appropriate optimization model based on the dynamic nature of the task, where computational efficiency, adaptability to changes, and accuracy in solution quality are key factors to consider. The comparative analysis provides a valuable framework for selecting the best-suited model in the context of dynamic optimization problems, ensuring more efficient decision-making in complex, changing environments.

The results of this study demonstrate the effectiveness of various optimization models – MDP, Integer Programming, Multi-agent Systems, Scheduling, and Assignment – in solving dynamic, task-assignment problems. Despite their varying execution times and cost efficiencies, all models successfully addressed the problem within acceptable computational limits. Future research should focus on enhancing the scalability and adaptability of these models in real-time dynamic environments, incorporating machine learning techniques for better decision-making under uncertainty, and evaluating the robustness of these models when applied to larger-scale, complex scenarios. These advancements could significantly improve the practical applicability of these models in fields such as autonomous systems, supply chain management, and robotics.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: no.

STATEMENT ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: The authors confirm that no generative artificial intelligence (AI) tools were used in the writing, editing, data analysis, or any other part of the preparation of this manuscript.

REFERENCES

Costa, A. R. da, Paris, D. M., Lujak, M., Rossetti, R. J. F., & Kokkinogonis, Z. (2024). Dynamic and cooperative multi-agent task allocation: Enhancing Nash equilibrium through learning.



- In Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (pp. 1860–1866). IEEE. <https://doi.org/10.1109/smc54092.2024.10831689>
- Chen, Y., Sun, Y., Wang, C., & Taleb, T. (2022). Dynamic task allocation and service migration in edge-cloud IoT system based on deep reinforcement learning. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(18), 16742–16757. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3164441>
- Gu, J., Chowdhury, M., Shin, K. G., Zhu, Y., Jeon, M., Qian, J., ... & Ghaffari, M. (2019). Tiresias: A GPU cluster manager for distributed deep learning. In *Proceedings of the 16th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI)* (pp. 485–500). USENIX Association.
- Han, Y., Li, X., & Zhou, Z. (2023). Dynamic task offloading and service migration optimization in edge networks. *International Journal of Crowd Science*, 7(1), 16–23. <https://doi.org/10.26599/IJCS.2022.9100031>
- Joe-Wong, C., Sen, S., Lan, T., & Chiang, M. (2012). Multi-resource allocation: Fairness-efficiency tradeoffs in a unifying framework. In *Proceedings of IEEE INFOCOM* (pp. 1206–1214). IEEE.
- Kunkler, M., & Rinderle-Ma, S. (2024). Online resource allocation to process tasks under uncertain resource availabilities. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Process Mining (ICPM)* (pp. 137–144). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPM63005.2024.10723280>
- Lee, S.-J., Lee, H.-Y., & Ko, S. K. (2024). Stochastic programming method for volatile resource distribution problem. In *Proceedings of the 15th International Conference on ICT Convergence (ICTC)* (pp. 936–939). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICTC62082.2024.10827280>
- Li, Y., Zhang, X., Zeng, T., Duan, J., Wu, C., Wu, D., & Chen, X. (2023). Task placement and resource allocation for edge machine learning: A GNN-based multi-agent reinforcement learning paradigm. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 34(12), 3073–3089. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2023.3313779>
- Mao, H., Alizadeh, M., Menache, I., & Kandula, S. (2016). Resource management with deep reinforcement learning. In *Proceedings of the 15th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets '16)* (pp. 50–56). ACM. <https://doi.org/10.1145/3005745.3005750>
- Mohammad Asique E Rasool, Anoop Kumar and Asharul Islam, “Dynamic Task Offloading Optimization in Mobile Edge Computing Systems with Time-Varying Workloads Using Improved Particle Swarm Optimization” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA)*, 15(4), 2024. <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2024.01504122>
- Noghabi, S. A., Pan, X., Chien, S., Godfrey, P. B., & Schlesinger, C. (2020). Introducing Pause: A hybrid cluster scheduler for preemptible and non-preemptible workloads. In *Proceedings of the 14th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 20)* (pp. 973–990). USENIX Association.
- Peng, Y., Bao, Y., Chen, Y., Wu, C., & Guo, C. (2018). Optimus: An efficient dynamic resource scheduler for deep learning clusters. In *Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference* (Article No. 1, pp. 1–14). ACM. <https://doi.org/10.1145/3190508.3190517>
- Pradhan, S., Tripathy, S., & Matam, R. (2024). Towards optimal edge resource utilization: Predictive analytics and reinforcement learning for task offloading. *Internet of Things*, 26, 101147. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101147>
- Yu, J., Lin, Z., Li, B., & Li, B. (2021). RL-Graph: A reinforcement learning approach to efficient multi-resource job scheduling. In *Proceedings of IEEE INFOCOM 2021* (pp. 1–10). IEEE.
- Zhao, L., Zhou, Y., & Huang, M. (2022). A survey of deep reinforcement learning for multi-agent systems. *arXiv preprint arXiv:2201.11410*. <https://arxiv.org/abs/2201.11410>



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Есмұхамедов Нұрғали Сейтқалиұлы – PhD докторанты, 3-курс, Интеллектуалды жүйелер кафедрасы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан

Есмұхамедов Нурғали Сейткалиевич — докторант 3-го курса, кафедра интеллектуальных систем, Международный университет информационных технологий, Казахстан

Yesmukhamedov Nurgali Seitkaliuly – 3rd year PhD student, Department of Intelligent systems, International Information Technologies University, Kazakhstan,
e-mail: nurgali.yesmukhamedov@gmail.com,
ORCID: 0009-0003-8772-9733



Сапақова Сая Заманбекқызы – физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан

Сапакова Сая Заманбековна — кандидат физико-математических наук, доцент, Международный университет информационных технологий, Казахстан

Saya Sapakova – Cand. of ph. and math. sc., Associate Professor, International University of Information Technology, Kazakhstan,
e-mail: s.sapakova@iitu.edu.kz,
ORCID: 0000-0001-6541-6806



Синчев Бахтгерей Құспанұлы – физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан

Синчев Бахтгерей Куспанович — кандидат физико-математических наук, доцент, Международный университет информационных технологий, Казахстан

Sinchev Bakhtgerey Kuspanovich – Cand. of ph. and math. sc., Associate Professor, International Information Technologies University, Kazakhstan,
e-mail: sinchev@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8557-8458



Есмұхамедов Нұрмағанбет Сейтқалиұлы – PhD докторанты, 3-курс, Компьютерлік инженерия кафедрасы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан

Есмұхамедов Нурмағанбет Сейткалиевич — докторант 3-го курса, кафедры Компьютерной инженерии, Международный университет информационных технологий, Казахстан

Yesmukhamedov Nurmaganbet Seitkaliuly – 3rd year PhD student, The Department of Computer Engineering, International Information Technologies University, Kazakhstan,
e-mail: yesmukhamedov.yeskendyr@gmail.com, ORCID: 0009-0006-0652-3082



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_194

FTAXP 81.93.29

КОНФИДЕНЦИАЛДЫҒЫ САҚТАЛҒАН ДЕРЕКТЕР БАЗАСЫНА СҰРАНЫСТАР ЖӘНЕ ДЕРЕКТЕРДІ ТАЛДАУ

ЗАПРОСЫ К БАЗАМ ДАННЫХ С СОХРАНЕНИЕМ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

PRIVACY-PRESERVING DATABASE QUERIES AND DATA ANALYSIS

Ж.З. Жантасова ^{1*}, С.А. Нурғалиева ², А.Р. Сыздықпаева ¹

¹С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан

²Astana IT University, Астана қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Жантасова Женискуль Зейнешовна, e-mail: zheniskul_z@mail.ru

Түйінді сөздер:

сұраныстарды өңдеу,
сұраныстар
конфиденциалдығы,
жүйелі шолу,
дербестендірілген
деректер, бұлттық қойма,
шифрлеу,
дифференциалды
конфиденциалдылық.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұлтты қоймаларының деректерінің және үлестірілген сыртқы деректер көздерінің өсуі деректерге қол жеткізудің конфиденциалдығын қамтамасыз ету мәселесін күшейтеді. Бұл, ең алдымен, пайдаланушылар туралы дербес ақпарат өңдейтін мемлекеттік, қаржылық және медициналық ақпараттық жүйелерге қатысты. Демек, жүйелердегі конфиденциалдықтың бұзылуы елеулі құқықтық және экономикалық салдарға, сондай-ақ құпия деректердің таралуына әкелуі мүмкін.

Бұл мақалада дифференциалды конфиденциалдылыққа, к-ең жақын көршілес (kNN) сұраныстарды өңдеу алгоритмдері және криптографиялық хаттамаларға қатысты негізгі түсініктер талқыланады. Блокчейн технологияларының, онтологиялық модельдердің сұраныстар құпиялылығының мәселелерімен интеграциясы туралы зерттеулер анықталды. Конфиденциалдылықты ескере отырып, сұраныстарды оңтайландырудың қолданыстағы тәсілдеріне талдау жүргізілді, негізгі тенденциялар мен перспективалық зерттеу бағыттары анықталды.

Жүйелі шолу әдістемесі PRISMA стандартына сәйкес келеді. Зерттеу мақсаттары мен ерекшелігін бейнелейтін релевантты кілт сөздерді пайдалана отырып, Web of Science және ResearchRabbit дерекқорларында жан-жақты іздеу жүргізілді. Алынған нәтижелер осы саладағы зерттеулердің ағымдағы жай-күйін кең түсінуге мүмкіндік береді және деректерді талдауда сұраныстарды өңдеудің тиімді және қауіпсіз механизмдерін әзірлеуде пайдалы болуы мүмкін.

Ключевые слова:

обработка запросов,
конфиденциальность
запросов,
систематический обзор,
персонализированные
данные, облачное
хранилище, шифрование,
дифференциальная
конфиденциальность.

АННОТАЦИЯ

Увеличение объема данных облачных хранилищ и распределенных внешних источников данных обостряет проблему обеспечения конфиденциальности доступа к данным. Прежде всего, это касается правительственных, финансовых и медицинских информационных систем, где происходит обработка персонализированных сведений о пользователях. Нарушение конфиденциальности в этих системах может привести к серьезным юридическим и экономическим последствиям, а также к утечкам чувствительных данных.



В работе рассматриваются ключевые концепции, затрагивающие дифференциальную конфиденциальность, алгоритмы обработки запросов kNN (k Nearest Neighbor) - k ближайших соседей и криптографические протоколы. Проведен анализ существующих подходов к оптимизации запросов с учетом конфиденциальности, выявлены основные тенденции и определены перспективные направления исследований.

Методология систематического обзора соответствует стандарту PRISMA. Всесторонний поиск проводился в базах данных Web of Science и ResearchRabbit с использованием релевантных ключевых слов, отражающих специфику и цели исследования. Полученные результаты позволяют лучше понимать текущее состояние исследований в данной области и могут быть полезны при разработке более эффективных и безопасных механизмов обработки запросов с последующим анализом данных.

Keywords:

query processing, query privacy, systematic review, personalized data, cloud storage, encryption, differential privacy.

ABSTRACT

The increasing volume of cloud storage data and distributed external data sources exacerbates the problem of ensuring confidentiality of access to data. First of all, this concerns government, financial and medical information systems, where personalized information about users is processed. Breaches of confidentiality in such systems can lead to serious legal and economic consequences, as well as the leakage of sensitive data.

The paper considers key concepts affecting differential privacy, kNN (k Nearest Neighbor) query processing algorithms and cryptographic protocols. Studies on the integration of blockchain technologies, ontology models with query confidentiality issues are identified. An analysis of existing approaches to query optimization taking into account confidentiality is carried out, the main trends are identified and promising research areas are determined.

The methodology of the systematic review complies with the PRISMA standard. A comprehensive search was conducted in the Web of Science and ResearchRabbit databases using relevant keywords reflecting the specifics and objectives of the study. The results obtained allow you better understand the current state of research in this area and can be useful in developing more efficient and secure mechanisms for processing queries with subsequent data analysis.

КІРІСПЕ

Бұлтты қоймалары және таратылған деректер көлемінің аса көбеюіне байланысты ақпараттың құпиялылығын қамтамасыз ету мәселесі маңызды бола түсуде. Бұл әсіресе пайдаланушының құпия ақпаратын өңдейтін қаржылық, медициналық және мемлекеттік ұйымдар үшін өте маңызды. Деректер базасына сұраныстарды орындау кезінде деректердің құпиялылығын қамтамасыз ету деректерді талдау саласындағы негізгі мәселелердің бірі. Шифрлау және жасыру сияқты дәстүрлі қорғау механизмдері қол жеткізу үлгілерін талдауға, сырт арналық шабуылдарға және бастапқы деректерді қайта құруға кедергі бола алмайды. Бұл конфиденциалдықты сақтай отырып, сұрауларды өңдеудің жаңа әдістерін әзірлеуді қажет етеді.

Осы шолу мақаланың негізгі мақсаты – конфиденциалдықты қамтамасыз етумен қатар деректер базасына сұраныстарды оңтайландыру бойынша бар зерттеулерді жүйелеу, негізгі үрдістерді айқындау және болашақ зерттеулердің перспективалық бағыттарын табу. Зерттеу мақсатына жету үшін авторлар келесі міндеттерді белгіледі:



- конфиденциалдықты қамтамасыз ете отырып, деректер базасына сұраныстарды өңдеудің негізгі терминдерін, үлгілерін және әдістерін нақтылау;
- қол жеткізілген нәтижелерді сипаттап зерттеу бағыттарын жүйелеу;
- таңдалған басылымдарға жүйелі шолу және библиометриялық талдау жасау;
- зерттеушілер ұсынған шешімдердің осалдылықтарын анықтау;
- сұраныстарды оңтайландырудың трендтерін болжау.

Соңғы жылдары сұраныстардың құпиялылығын қамтамасыз етудің көптеген әдістері ұсынылды. Мысалы, конфиденциалдық талаптарын ескере отырып, түпнұсқалы деректерге жақын синтетикалық деректер базаларын (SD-Synthetic Datasets) жасау сұраныстардың өнімділік сипаттамаларын сақтауға мүмкіндік береді (Seeman, Sexton және т.б., 2024; Ghazarian et al., 2024; Xia et al., 2020). Дегенмен, SD пайдалану бірқатар мәселелермен байланысты: ақпараттың жайылып кетуі, деректерді қалпына келтіру әдістерімен шабуылдау, пайдалылық пен қауіпсіздік арасындағы тепе-теңдікті сақтау. Дифференциалды конфиденциалдық (Differential Privacy, DP) технологиялары сұраныс нәтижелеріне шу қосу арқылы деректердің жайылып кетуін азайтады, бірақ дәлдік пен қауіпсіздік арасында ымыраға келуді талап етеді (Przytarski және т.б., 2021; Ekarputra F.J. және т.б., 2024; Jang және т.б., 2015). Шифрланған деректер базасындағы қорғалған екі жақты есептеулерге негізделген конфиденциалдықты сақтайтын kNN сұраныстарды өңдеу алгоритмдері белсенді түрде зерттелуде (Ghazarian et al., 2024; Akgün, Pfeifer, Kohlbacher, 2022). Дегенмен, кейбір алгоритмдер шабуылдарға осал, ал басқалары сұраныстарды өңдеудің жоғары шығындарынан зардап шегеді.

Бұл саладағы нәтижелі өзгерістерге қарамастан, келесі мәселелердің шешімдерін табу керек:

- Масштабталатын (кеңейтілетін) жүйелерде қорғалған сұраныстарды орындау кезіндегі жоғары шығындар.
- Сұраныстар үлгілерін талдауда көптеген схемалардың осалдығы.
- Қорғау әдістерін пайдалану кезінде күрделі аналитикалық операцияларды жеткіліксіз қамтамасыз ету.
- Таратылған деректер базасында конфиденциалдықты қамтамасыз етудің бірыңғай стандарттарының болмауы.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Web of Science және ResearchRabbit дерекқорларында зерттеудің ерекшеліктерін және осы шолудың мақсатына жетуге бағыттылығын көрсететін түйінді сөздерді пайдалану арқылы кешенді іздеу жүргізілді. Іздеу нәтижесінде 269 мақала табылды. Алдын ала іріктеу кезеңінде Web of Science деректер қорынан 220 жазба және ResearchRabbit дерекқорынан 49 жазба жүктелді. Microsoft Excel және Zotero көмегімен телнұсқалардың бар-жоғын тексергеннен кейін 9 жазба алынып тасталды, себебі олар әртүрлі көздерде қайталанды. Жазбалардың біртүпті еместігіне байланысты 4 мақала қолмен алынып тасталды. Microsoft Excel бағдарламасында телнұсқалар 2 кезеңде жойылды: 1) «Author», «Article Title» критерийлерінің сәйкестігі бойынша; 2) «Author», «DOI».

Алғашқы іріктеу (screening) кезеңінде тақырыптар мен түйіндемелер талданды. Бұл талдау 250 релеванттық, зерттеуге қатысты жұмыстарды қалдыруға мүмкіндік берді. Содан кейін қолжетімділігі жабық мақалаларды алып тастау керек болды. Осы сүзгіден кейін 76 мақала қалды. Келесі кезекте критерийлерге сәйкестігін бағалау жүргізілді: жанама сәйкестік – 12 және басқа да себептер – 28: мысалы, қарастырылған қауіпсіздік мәселелері сұраныстарға қатысты емес, мақалалардың басылым мерзімі сәл ескірген (2003-2007 жж.) және т.б. Бұл кезеңде таңдалған дереккөздер саны 36 мақалалардан жинақталды.



Әрбір басылымды таңдау PRISMA әдістемесіне сәйкес жүргізілді (Yulianti және т.б., 2024). Ғылыми қатаңдығы және дәлелді базасы жоғары жұмыстар сенімді деп танылды. Іріктелген зерттеулердің шынайылығы қамтамасыз ету үшін, осы жұмыстың авторлары зерттелетін тақырыптың мазмұнына нақты талаптарға сәйкес қол жеткізуге кепілдік беру сұрақтарын қосымша талқылады. Нәтижесінде, қосымша критерийлер тұжырымдалып келесі факторлар назарға алынды: зерттеу мақсатына жетуде дәйекті ілгерілеуді нақты қадағалау, іріктеменің репрезентативтілігі, зерттеу кезеңдерін логикалық дәйекті түрде ұсыну, шынайы статистикалық мәліметтердің болуы, нәтижелердің қайта пайдалану мүмкіндігі. Авторлар арасында айырмашылықтар болған жағдайда даулы мәселелер бойынша пікірталас және конструктивті келісім ұйымдастырылды. Орындалған жұмыстарға осы сапаны бақылау процедурасын енгізу 22 басылымды алып тастап егжей-тегжейлі талдау жүргізуге мүмкіндік берді. Әрі қарай қарастыру үшін алып тастау критерийлерінің қатарында ұсынылған шешімдердің жергілікті (шектеулі) қолданылуы, қол жеткізілген нәтижелерді сыни тұрғыдан пайымдаудың жеткіліксіздігі және зерттелетін тақырыптың даму болашағына әлсіз көзқарас жатады. Қалған 14 ғылыми жарияланымдар зерттелетін мәселелік критерийлеріне сәйкес келеді, өзектілігі болып жатқан ақпараттық процестерге (бұлтты технологиялардың өсуі, ақпараттың жайылып кету мәселелерінің шиеленісуі, деректер көлемінің өсуі және т.б.) байланысты анық, зерттелетін мәселелердің негізгі бағыттары қадағаланады. Бұл мақалалар зерттеу тақырыбына жүйелі шолу жасау үшін талданған.



1-сурет. Prisma диаграммасы бойынша мақалаларды іріктеп алу процедурасы
Ескерту: авторлар (Yulianti және т.б., 2024) деректері негізінде құрастырған



НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Бұл бөлімде жүйелі шолу нәтижелері түсіндірілген және болашақ зерттеулер мен практикалық қолдану үшін қорытындылар тұжырымдалған. Авторлар өз зерттеулерін сипаттау үшін пайдаланған негізгі терминдердің анықтамалары (1-кесте) қазіргі уақытта нақты ақпараттық жүйелерде жүріп жатқан сұраныстарды өңдеу процестерін көрсетті. Деректерді бұлттық қоймада немесе таратылған жүйелерде сақтау және өңдеу қосымша қауіпсіздік шараларын қажет етеді. Мақалалар авторларына мақсатталған нәтижелерге қол жеткізуге мүмкіндік беретін ең жиі аталған әдістер мен технологиялардың ішінде дифференциалды конфиденциалдық әдісін, аутентификация және сұраныстарды өңдеу үшін шифрлау алгоритмдерін пайдалану (Secure Multi-Party Computation SMPC), k-ең жақын көршілестерді өңдеудің kNN алгоритмдерін атауға болады. Ең осал деректер көздері медициналық және жекелендірілген қызметтер болып табылады (Przytarski және т.б., 2021; Cunningham, Cormode және Ferhatosmanoglu, 2021; de Souza, de Lassus Cammarota, 2024). Біріктірілген сұраныс құрылымдарына негізделген конфиденциалдықты сақтайтын модельді келесі авторлар (Riyana, Sasujit, Homdoun, 2023; Ekaputra F.J. et al., 2024; Yang et al., 2022; Zheng, 2022) ұсынады. Ұсынылған шешімдердің ерекшелігі конфиденциалдықты жоғалту мен деректердің пайдалылығы арасындағы қол жеткізілген ымыраға келу болып табылады. Жеке меншік деректерді қорғау әдісі ретінде дифференциалды конфиденциалдық (ДК) ақпараттың жайылып кетуін шектеуді қамтамасыз етеді (Przytarski және т.б., 2021; Yang, Kelarev және Yi, 2024; Yang, 2022). Келесі авторлардың (Xia және т.б., 2020; Jang және т.б., 2015) жұмыстарында кеңістіктік деректердің сыни аймағында дифференциалдық конфиденциалдықпен синтетикалық деректерді генерациялау шешімі және олардың талдауы ұсынылады.

Бұлттық есептеулердің негізгі қызметтерінің бірі пайдаланушылардың үлкен көлем деректерін тасымалдауға және сақтауға мүмкіндік беретін аутсорсинг болып табылады. Дегенмен, деректер бұлтта шифрланбаған түрде сақталса, конфиденциалдық ақпараттың жайылып кету қаупі жоғары. Бұл әсіресе бизнес деректері мен медициналық жазбалар үшін өте маңызды. Көптеген бұлттық провайдерлер пайдаланушылар деректерін қарамайтынына немесе өзгертпейтініне кепілдік бермейді. Сонымен қатар, бұлттық серверлерге қаскүнемдер шабуыл жасауы мүмкін немесе провайдерлер ресурстарына жүктемені азайту үшін сұраныс нәтижелерін әдейі жасыруы немесе ауыстыруы мүмкін (Zheng және т.б., 2022; Jang және т.б., 2015). Шешім ретінде авторлар деректерді бұлтқа тасымалдау кезінде іздеуге қабілетті симметриялық шифрлауды SSE ((Searchable Symmetric Encryption)) қарастырады. Ұсынылған шифрлау схемасы В+ ағашына және Блум сүзгісіне негізделген. Сонымен бірге бұлттық серверден шабуылдардың алдын алу үшін уақыт белгілер механизмі ұсынылады. Белгілі іздеу үлгілерін кеңейтетін практикалық криптографиялық модельді келесі авторлар (Crescenzo және т.б., 2016) ұсынады.

Деректерді бұлтқа жібермес бұрын, авторлар (Ghazarian, Zheng, Rakovski, 2024) k-ең жақын көршілердің сұраныстарын өңдеу kNN алгоритмін пайдалануды ұсынады. Конфиденциалдық пен тұтастықты қолдау үшін сұраныс аутентификациясы үшін бұл алгоритмді келесі авторлар да (Akgün, Pfeifer, Kohlbacher, 2022; Elmehdwi және т.б., 2013) ұсынады. Аутентификация схемасы биттік карталар негізінде жасалған, хэштеу индексі сұранысты биттік форматына түрлендіреді және сәйкес тірек нүктелері туралы ақпаратты тиімді шығаруға мүмкіндік береді. Блокчейнді пайдалану және оның сұраныстарды өңдеуге қойылатын талаптары сұраныс тиімділігін арттыру контекстінде талқыланады (Kim және т.б., 2022). Конфиденциалдықты сақтай отырып, тексерілетін деректерді талдауға қол жеткізу қиын есеп болып табылады, өйткені бар әдістер мен



құралдар аудит журналдарын жүргізу, деректерді пайдалану саясаттарын автоматты түрде тексеру немесе деректерді анонимизациялау (жасыру) сияқты жартылай шешімдерді ғана ұсынады. Келесі авторлар (Seeman, Sexton және т.б., 2024) жұмысында аудитті қамтамасыз ету үшін автоматтандырылған режимде бір уақытта жеткілікті ақпаратты жинау кезінде конфиденциалдықты сақтайтын деректерді талдауға мүмкіндік беретін семантикалық қолдау көрсететін WellFort архитектурасын ұсынады. Алынған нәтижелер сұраныс жасалған деректердің конфиденциалдығын қамтамасыз ете отырып, әртүрлі деректер базасы сұраныстарын интеграциялау сұрақтарына ғалымдардың шоғырланған назарын көрсетеді.

Зерттеудің негізгі терминдері. Басылымдарды қарау, негізгі түсініктерді белгілеу, зерттеушілер қарастырған есептердің контекстін салыстыру жиі кездесетін түсініктерді және олардың анықтамаларын іріктеп алуға мүмкіндік берді (1-кесте). Негізгі терминдер қатарына объекттер, субъекттермен қатар үрдістер, әдістер және қауіпсіздік саясат атаулары (Kazimova және т.б., 2025) енгізілген.

1-кесте. Зерттеу тақырыбының негізгі түсініктері

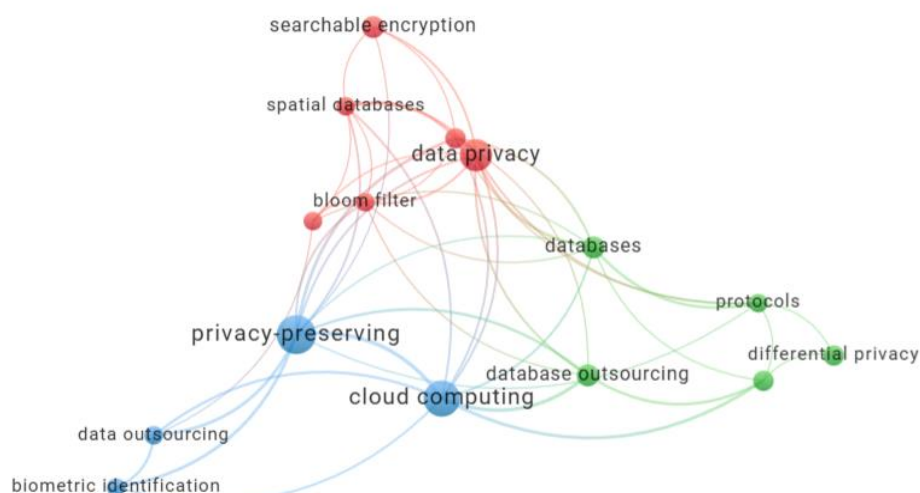
Негізгі термин	Анықтама
Сұраныстардың агрегатталған (біріктірілген) құрылымдары (Aggregate query frameworks)	Деректердің конфиденциалдығын қорғау үшін қолданылатын құрылымдар (Riyana, Sasujit, Homdoun, 2023; Yang, Kelarev, Yi, 2024; Yang және т.б., 2022).
Верификациялануы (Auditability)	Деректерді өңдеу үрдістерін тексеру және қадағалау. Верификациялану қасиеті аналитикалық жүйелерге және нормативті талаптардың орындалуына сенімді жоғарылатады (Seeman, Sexton және т.б., 2024).
Сұраныстарды өңдеу блокчейні (Blockchain for Query Processing)	Сұраныстарды қорғау және аутентификациялауға қолданылатын блокчейн. Сұраныстарды өңдеуде деректердің өзгермеуін және ашықтығын қамтамасыз етеді. (Kim және т.б., 2022; Ghazarian, Zheng, Rakovski, 2024; Papadopoulos, 2020).
Келісіммен бақару (Consent Management)	Пайдаланушылардың деректерін өңдеуде бекітілген тәртіптерге (мысалы GDPR регламенті) сәйкес рұқсатын басқару, әсіресе медициналық және жекешелендірілген сервистерде. (Seeman, Sexton және т.б., 2024).
Деректер базасының аутсорсингісі (Database Outsourcing)	Аутсорсинг – компания жұмысының бір бөлігінің өзге компанияға тапсыру. Сыртқы серверлерде немесе бұлттық платформаларда деректер базасын сақтау және басқару тәжірибесі (Elmehdwi, 2013; Chaudhari, 2024).
Дифференциалдық конфиденциалдық (Differential Privacy)	Деректердің конфиденциалдығын сұраныстардың нәтижесіне шу қосу арқылы қорғау. Әдіс нәтижесінде жазбаларды анықтауға тосқауыл қойылады. (Przytarski және т.б., 2021; (Seeman, Sexton және т.б., 2024; Ekaputra, 2024; Ghazarian, Zheng, Rakovski, 2024; Xia, 2020; Zhang және т.б., 2024; Scaglione, 2022).



1-кестенің соңы

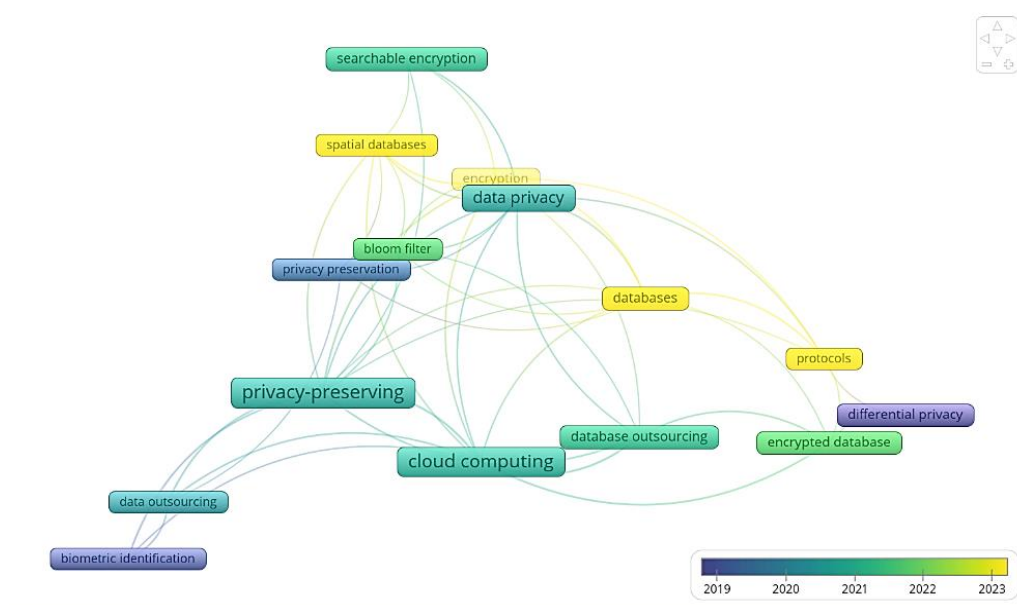
Негізгі термин	Анықтама
Шифрланған сұраныстарды өңдеу (Encrypted Query Processing)	Шифрланған деректердің үстінен сұраныстарды өңдеу бұлттағы деректердің мазмұнын үшінші жаққа ашпай оларды іздеуге және талдауға мүмкіндік береді (Kim және т.б., 2022; Shi, 2020; Cunningham, Cormode, Ferhatosmanoglu, 2021; Akgün, Pfeifer, Kohlbacher, 2022; Zheng, 2022; Chaudhari, 2024).
Деректерді қорғаудың жалпы ережелері GDPR (General Data Protection Regulation)	Интернет желісінде Еуроодақтың пайдаланушыларының деректерін жинақтап өңдейтін компанияларға біріктірілген жарлығы (Seeman, Sexton және т.б., 2024).
Конфиденциалдықты сақтайтын деректердің талдауы (Privacy-Preserving Data Analysis)	Пайдаланушылардың жеке ақпаратын қорғауды қамтамасыз ету әдістерін қамтитын конфиденциалдықты сақтайтын деректерді талдау (Riyana, Sasujit, Homdoun, 2023; Przytarski және т.б., 2021; Cunha, Mendes, Vilela, 2021; Welten және т.б., 2022; Scaglione, 2022).
Конфиденциалдықты сақтайтын сұраныстар (Privacy-Preserving Queries)	Бұлтта немесе таратылған жүйелерде сұраныстар өңделген кезде пайдаланушылар деректерінің қорғалуын қамтамасыз ететін сұраныстар (Ghazarian, Zheng, Rakovski, 2024; Crescenzo және т.б., 2016; Xia және т.б., 2020; Jang және т.б., 2015; Akgün, Pfeifer, Kohlbacher, 2022).
Конфиденциалдықты сақтайтын kNN сұраныстарды өңдеу (Privacy-Preserving kNN Query Processing)	Сұраныстарды ширлау негізінде конфиденциалдықты қамтамасыз ететін және қатынау паттерндер арқылы ақпараттың жайылып кетуін алдын алатын k-жақын көршілерді өңдейтін алгоритмдер (kNN) (Ghazarian, Zheng, Rakovski, 2024).
Сұраныстың аутентификациясы және тұтастықтың верификациясы (Query Authentication and Integrity Verification)	Деректер базасы және бұлттық қоймаларды қорғау үшін қолданылатын сұраныстар нәтижелерін бұрмалауын алдын алуға бағытталған сұраныстарды аутентификациялау және деректердің тұтастығын тексеру әдістері (Shi және т.б., 2020; Akgün, Pfeifer, Kohlbacher, 2022; Elmehdwi және т.б., 2013).
Қауіпсіз көптарапты есептеулер (Secure Multi-Party Computation - SMPC)	Бірнеше тараптарға өз деректерін бір біріне ашпай бірігіп функциялар есептеуге мүмкіндік беретін криптографиялық әдіс (Seeman, Sexton және т.б., 2024; Shi және т.б., 2020; Ghazarian, Zheng, Rakovski, 2024; Cunningham және т.б., 2021; Jang және т.б., 2015).
Ескерту – Авторлар әдебиеттер көздерін талдау негізінде құрастырған	

Vosviewer бағдарламасы библиометриялық желілерді визуализациялау үшін кеңінен қолданылды. VOSviewer бағдарламасының көмегімен мәліметтерді талдаудың негізгі әдісі ретінде «co-occurrence» әдісі таңдалды. Ол кілт сөздерді олардың бір жұмыста қаншалықты жиі кездесетіндігі бойынша кластерлейді. Осылайша, түйінді сөздер тақырыптық кластерлерді құрайды (2-сурет). «Overlay visualization» визуализация құралы тақырыптық кластерлер бойынша жарияланымдар хронологиясын көрсетті (3-сурет).



2-сурет. Зерттеудің түйінді терминдері

Ескерту – Авторлар Vosviewer бағдарламасы көмегімен тұрғызды



3-сурет. Зерттеудің түйінді терминдері

Ескерту – Авторлар Vosviewer бағдарламасында – Overlay visualization құралы арқылы тұрғызды

Басылымдар авторларының жүргізген зерттеулері, негізгі алынған нәтижелері, қолданылған үлгілері мен құралдары зерттеу тақырыбындағы негізгі бағыттарды, қолданылатын тәсілдерді анықтады. Назарда болған зерттеудің көрсеткіштерінің ақиқаттық дәрежесін растау үшін анықталған негізгі бағыттар бойынша мақала авторлары қосымша басылымдарды қарап шықты. Бұл жұмыстың нәтижелері де талқылауда және берілген ұсыныстарда өз орнын тапты.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл мақалада деректер базасына конфиденциалдық сұрақтарын назарға алып сұраныстарды тиімділеу шешімдері қарастырылған басылымдарды талдау әрекеттері жасалды. Қарастырылған мәселе бойынша іріктеу, жалпы даму тенденцияларды табу



жолында өзекті аспектілер, қолданылатын әдіс-тәсілдер мен құралдар айқындалды. Сонымен қатар, ұқсас зерттеулерді топтастырып ірілендірілген шешімдерді іздестіру бағыттарды қалыптастыру сәтті болды. Қойылған есептің спецификасына байланысты әдістің жүзеге асырылуындағы айырмашылықтар көрсетілді. Осы мақала авторлары қол жеткізген нәтижелері қорғалған деректер базасы аймағында жүргізілген зерттеулермен расталған және келісілген. Сондай-ақ, алынған нәтижелердің құндылығы дәйекті басқарушылық шешімдер қабылдау мақсатында деректердің интеллектуалдық талдау потенциалы болуында. Орындалатын сұраныстардың конфиденциалдығын қамтамасыз етуде зерттеушілік жобалар тақырыптары бола алатын үш негізгі бағыттарын атап өтуге болады. Ең алдымен, деректерді бұлтта сақтауда олардың конфиденциалдығын, тұтастығын және өзектілігін қамтамасыз ету. Екінші негізгі даму бағыты деректер базасына жасалатын сұраныстардың қауіпсіздігіне кепілдік бере алатын криптографиялық үлгілер мен хаттамалар байланысты болып келеді. Дифференциалдық конфиденциалдық механизмдері арқылы орналасқан жері туралы синтетикалық деректерді генерациялау әдістерін алу үшінші бағыттың негізі болып келеді. Сонымен қатар, авторлардың пікірінше, гибридтік жүйелерді қарастыру қызық та орынды болып көрінді. Олар блокчейн мен деректер базасы функцияларын интеграциялау арқылы деректердің тұтастығын қамтамасыз ете алады және мүлдем жаңа сақтау құрылымдарына әкеледі. Деректердің онтологиялық көрсетілімін беретін семантикалық торларды қарастыру жаңа шешімдерге әкеледі деген қызығушылық тудырды. Мақала авторларының қол жеткізген нәтижелері ғылыми қоғамдастықтың жинақталған тәжірибесінің жүйеленген форматы болып келеді. Әсіресе, медициналық деректерге қатысты қауіпсіздік мәселелерді шешуде қолданылатын әдіс-тәсілдердің байланыстары, жүзеге асырылу айырмашылықтары туралы деректер. Деректер базасында күннен күнге ақпарат көлемінің көбеюі, талдауға және шешім қабылдауға қажетті түрлі деректерді жылдам шығарып алу қажеттілігі, тасымалданатын ақпараттық ағымдардың тұтастығын қамтамасыз ету қолданылатын қорғау процедураларының маңыздылығын күшейте түседі.

Алынған деректердің маңыздылығына қарамастан, басылымдар авторлары қол жеткізген нәтижелерге қатысты белгілі бір шектеулерді атап өткендері ескертіледі. Ұсынылған шешімдердің барлығы дерлік оңтайлы шешімге кедергі болатын мәселелерді сыни тұрғыдан түсінуді көрсеткен. Көптеген шешімдер бұлттық серверлер «адал (честный)», бірақ «қызығушылық (любопытный)» таныта алады шартымен берілген. Конфиденциалдық пен тиімділікті сақтай отырып, бұл нәтижелерді зиянды қаскүнемдер сияқты күшті қарсылас модельдерге кеңейту бүгінгі күнде қиын есеп болып келеді. Масштабтау сұрақтары да орын алған. Ұсынылған схемалардың көпкөлемді және әртүрлі деректер жиындарына масштабталатындығы толық анықталмаған. Көп өлшемді деректермен жұмыс істеуде енгізу/шығару кідірістерінің мәселелері болғандығы және де деректер өлшемін азайту әдістері қолданылғаны туралы деректер келтірілген. Есептеулердің жоғары бағасы да ұсынылған шешімдердің қолдану аймағын кеңейтуді шектейді.

Зерттеу тақырыбына сәйкес қарастырылған еңбектер көлемі мақала авторларының қорытындыларының толық болуына әсер етуін ескеру керек. Жабық қолжетімдіктегі басылымдардың атаулары мен түйіндемелері қарастырылғаны мен шектелді. Және де ертерек уақытта басылымнан жарық көрген ғылыми еңбектердің қарастырылмауы заманауи зерттеулердің назарынан маңызды нәтижелердің тыс қалу ықтималы болуы мүмкін.

Өрі қарайғы зерттеулер қазіргі деректер қоймаларына тән құрылымдалмаған деректерге бағытталуы керек екендігі аталып отыр. Сонымен қатар, деректерді интеллектуалды талдау, предиктивтік аналитика және деректерді визуализациялау



заманауи қажеттіліктері тиімді шешімдерді алуда жасанды интеллекттің өсіп келе жатқан рөлін көрсетеді. Іргелі зерттеулерді жетілдіру тұрғысынан математикалық модельдеудің классикалық әдістерін белгілі бір мәселенің қойылымына сәйкес қарастыру өзекті болып табылатыны сөзсіз. Қажетті қауіпсіздік пен пайдаланылған деректердің нақты пайдалылығы арасындағы компромисстік шешімдер күтілетін нәтижелерге өзгертулерде жасай алады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Akgün M., Pfeifer N., Kohlbacher O. (2022). Efficient privacy-preserving whole-genome variant queries., *Bioinformatics*, vol. 38, no. 8, pp. 2202–2210, <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btac070>.
- Chaudhari P., Chin J.-J., Mohamad S.M. (2024). An In-Depth Analysis on Efficiency and Vulnerabilities on a Cloud-Based Searchable Symmetric Encryption Solution., *J. Inform. Web Eng.*, <https://doi.org/10.33093/jiwe.2024.3.1.19>.
- Crescenzo G.Di., Cook D.L., McIntosh A., Panagos E. (2016). Practical and privacy-preserving information retrieval from a database table, *J. Comput. Secur.*, i. 4, vol. 24, pp. 479–506, <https://doi.org/10.3233/JCS-160550>.
- Cunha M., Mendes R., Vilela J. P. (2021). A survey of privacy-preserving mechanisms for heterogeneous data types, *Comput. Sci. Rev.*, vol. 41, p. 100403, <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100403>
- Cunningham T., Cormode G., Ferhatosmanoglu H. (2021). Privacy-Preserving Synthetic Location Data in the Real World. 17th International Symposium on Spatial and Temporal Databases, pp. 23–33. <https://doi.org/10.1145/3469830.3470893>.
- De Souza, F.D.M., de Lassus, H. , Cammarota, R. (2024). Private detection of relatives in forensic genomics using homomorphic encryption. *BMC Med Genomics* 17, 273. <https://doi.org/10.1186/s12920-024-02037-9>
- Ekaputra F.J. et al. (2024). Semantic-enabled architecture for auditable privacy-preserving data analysis, *Semantic Web*, т. 15, vol. 3, pp. 675–708, <https://doi.org/10.3233/SW-212883>.
- Elmehdwi Y., Samanthula B.K., Jiang W. (2013). Secure k-Nearest Neighbor Query over Encrypted Data in Outsourced Environments., <https://doi.org/10.48550/arXiv.1307.4824>.
- Ghazarian A., Zheng J., Rakovski C. (2024). Privacy-Preserving ECG Data Analysis with Differential Privacy: A Literature Review and A Case Study. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.13880>.
- Jang M., M. Yoon M., Y. Song Y., и J.-W. Chang J.-W. (2015). A Signature-based Data Authentication Method with Bitmap-based Transformed Data in Database Outsourcing, 6th International Conference On Ambient Systems, Networks And Technologies (ANT-2015), The 5th International Conference On Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2015), i. 52. в *Procedia Computer Science*, vol. 52. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.073>.
- Jang M., Yoon M., Song Y., Chang J.-W. (2015). A New Query Integrity Verification Method for Encrypted Data in Database Outsourcing., *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering: Future Information Technology*, i. 352. в *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 352. pp. 67–72, https://doi.org/10.1007/978-3-662-47487-7_10.
- Kim H.-J., Lee H., Kim Y.-K., Chang J.-W. (2022). Privacy-preserving kNN query processing algorithms via secure two-party computation over encrypted database in cloud computing., *J. Supercomput.*, т. 78, вып. 7, сс. 9245–9284, <https://doi.org/10.1007/s11227-021-04286-2>.
- Papadopoulos P., Pitropakis N., Buchanan W. J., Lo O., Katsikas S., (2020) Privacy-Preserving Passive DNS, *Computers*, vol. 9, iss. 3., <https://doi.org/10.3390/computers9030064>.



- Przytarski D., Stach C., Gritti C., B. Mitschang B. (2021). Query Processing in Blockchain Systems: Current State and Future Challenges. *Future Internet*, т. 14, вып. 1, с. 1, <https://doi.org/10.3390/fi14010001>.
- Riyana S., Sasujit K., Homdoun N. (2023). Aggregate Query Frameworks for Preserving Privacy Data in Big Data Analytics, In Review, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2812564/v1>.
- Seeman J., Sexton W., Pujol D., Machanavajjhala A. (2024). Privately Answering Queries on Skewed Data via Per Record Differential Privacy, *Proc. VLDB Endow.*, т. 17, вып. 11, сс. 3138–3150, <https://doi.org/10.14778/3681954.3681989>.
- Shi Z., Fu X., Li X., Zhu K. (2020). ESVSSE: Enabling Efficient, Secure, Verifiable Searchable Symmetric Encryption, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, сс. 1–1, <https://doi.org/10.1109/TKDE.2020.3025348>.
- Scaglione A. (2022). The Use of Differential Privacy for Energy Data, *CPSS'22: Proceedings Of The 8th ACM Cyber-Physical System Security Workshop. ASSOC Computing Machinery*, <https://doi.org/10.1145/3494107.3522780>.
- Welten S. et al., (2022). A Privacy-Preserving Distributed Analytics Platform for Health Care Data., *Methods Inf. Med.*, vol. 61, iss. S 01, pp. e1–e11, <https://doi.org/10.1055/s-0041-1740564>.
- Xia H., Xiong Y., Huang W., Meng Z., Miao F. (2020). Limiting Privacy Breaches in Average-Distance Query., *Security And Communication Networks*, V. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8895281>.
- Yang X., Kelarev A., Yi X., (2024). Privacy-enhancing data aggregation and data analytics in wireless networks for a large class of distributed queries, *Wirel. Netw.*, vol. 30, iss. 6, pp. 4749–4759, <https://doi.org/10.1007/s11276-022-03108-4>.
- Yang X., Yi X., Kelarev A., Rylands L., Lin Y., Ryan J. (2022). Protecting Private Information for Two Classes of Aggregated Database Queries., *Informatics*, vol. 9, iss. 3, p. 66, <https://doi.org/10.3390/informatics9030066>.
- Yue R., Shaowei W., Xiangyu W. (2024). Emerging Trends in Sports and Artificial Intelligence: A Scientometric Analysis in Citespace, *J. Electr. Syst.*, vol. 20, iss. 2, pp. 1897–1910, <https://doi.org/10.52783/jes.1637>
- Yulianti E., Suwono H., Abd Rahman N. F., Phang F. A. (2024). State-of-the-Art of STEAM Education in Science Classrooms: A Systematic Literature Review, *Open Educ. Stud.*, vol. 6, iss. 1, c. 20240032, 2024, <https://doi.org/10.1515/edu-2024-0032>.
- Zhang M., Wei E., Berry R., Huang J. (2024). Age-Dependent Differential Privacy, *IEEE Transactions On Information Theory*, vol. 70, iss. 2, <https://doi.org/10.1109/TIT.2023.3340147>.
- Zheng Y., Wang W., Wang S., Jia X., Huang H., Wang C. (2022). SecSkyline: Fast Privacy-Preserving Skyline Queries over Encrypted Cloud Databases, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.07064>.
- Kazimova D., Tazhigulova G., Shraimanova G., Zatyneyko A., Sharzadin A. (2025). Transforming University Education with AI: A Systematic Review of Technologies, Applications, and Implications, *Int. J. Eng. Pedagogy IJEP*, vol. 15, iss. 1, pp. 4–24, 2025, <https://doi.org/10.3991/ijep.v15i1.50773>.



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



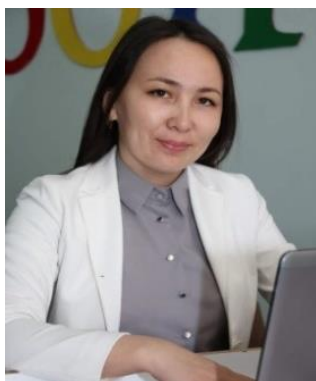
Жантасова Женискуль Зейнешовна – техникалық ғылымдар кандидаты, С.Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан

Жантасова Женискуль Зейнешовна – кандидат технических наук, Восточно-Казakhstanский университет им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Zhantassova Zheniskul Zeineshovna – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan University named after S. Amanzholov, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: zheniskul_z@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5550-7587>



Нурғалиева Сымбат Алтыбаевна – философия докторы (Phd), Astana IT University, Астана қаласы, Қазақстан

Нурғалиева Сымбат Алтыбаевна – доктор философии (Phd), Astana IT University, Астана, Казахстан

Nurgalieva Symbat Altybaevna – PhD, Astana IT University, Astana, Kazakhstan

e-mail: symbat2030@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5880-6166>



Сыздықпаева Айгуль Рамазановна – техникалық ғылымдар кандидаты, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Сыздықпаева Айгуль Рамазановна – кандидат технических наук, Восточно-Казakhstanский университет им. С. Аманжолова, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

Syzdykpayeva Aigul Ramazanovna – Candidate of technical science, S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: aigul_uk@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4965-0453>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_206

FTAXP 28.23.29

КРЕДИТТІК ӨНІМДЕРДІҢ ӘРТҮРЛІ ТҮРЛЕРІ БОЙЫНША СКОРИНГТІК КАРТАЛАР

СКОРИНГОВЫЕ КАРТЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КРЕДИТНЫХ ПРОДУКТОВ

SCORING CARDS FOR DIFFERENT TYPES OF CREDIT PRODUCTS

Ж.М. Ордабаева^{1*}, А.Н. Молдагулова¹

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

*Жауапты автор: Ордабаева Жанна Муратовна, e-mail: zhanmaordabayeva@gmail.com

Түйінді сөздер:

кредиттік скоринг
жүйелері, машиналық
оқыту алгоритмдері,
үлкен деректерді өңдеу,
түсіндірілетін жасанды
интеллект (Explainable AI),
модельдердің
тұрақтылығы, деректерді
алдын ала өңдеу, фича
инженериясы, баламалы
деректер, банктік
аналитика

ТҮЙІНДЕМЕ

Жұмыс машиналық оқыту әдістерін және баламалы деректер көздерін пайдалана отырып, несиелік өнімдердің әртүрлі түрлері үшін баллдық үлгілерді жасаудың заманауи әдістерін ескереді. Модельдер (логистикалық регрессия, Random Forest, XGBoost және LSTM) бірінші рет Қазақстанның екінші деңгейлі банктері үшін олардың түсіндірмелілігіне, ұзақ мерзімді тұрақтылығына және әртүрлі несиелік нарықтар үшін жарамдылығына назар аудара отырып, салыстырылды. Зерттеудің ғылыми жаңалығы оның түсіндірілетін AI әдістерін (SHAP, PDP) және балама деректерді (сандық мінез-құлық, транзакциялар және телекоммуникация деректері) бағалау карталарын жасау және халық тұрақтылығы индексін (PSI) пайдалана отырып, уақытша тұрақтылық үлгілерін бағалау үшін қалай пайдаланатынында жатыр. Нәтижелер XGBoost ең жоғары дәлдікті (AUC = 0,88) көрсететінін, Random Forest сапа мен түсіндіру арасындағы тепе-теңдікті (AUC = 0,82) ұсынатынын және логистикалық регрессия оның ашықтығы мен ережелерді сақтауына байланысты реттелетін өнімдер үшін негізгі үлгі болып қала беретінін көрсетеді.

Ключевые слова:

системы кредитного
скоринга, алгоритмы
машинного обучения,
обработка больших
данных, объяснимый
искусственный интеллект
(Explainable AI),
устойчивость моделей,
предварительная
обработка данных, фича-
инжиниринг,
альтернативные данные,
банковская аналитика

АННОТАЦИЯ

В работе учтены современные методики создания скоринговых моделей для различных видов кредитных продуктов с использованием методов машинного обучения и альтернативных источников данных. Впервые проведено сравнение моделей (логистическая регрессия, случайный лес, XGBoost и LSTM) для банков второго уровня Казахстана с акцентом на их интерпретируемость, долгосрочную устойчивость и пригодность для различных рынков кредитования. Научная новизна исследования заключается в использовании методов объяснимого ИИ (SHAP, PDP) и альтернативных данных (цифровое поведение, транзакции и данные телекоммуникаций) для создания скоринговых карт и оценки моделей временной стабильности с использованием индекса стабильности населения (PSI). Результаты показывают, что XGBoost демонстрирует наивысшую точность (AUC = 0,88), случайный лес обеспечивает баланс между качеством и интерпретируемостью (AUC = 0,82),



а логистическая регрессия продолжает оставаться основополагающей моделью для регулируемых продуктов благодаря своей прозрачности и соблюдению нормативных требований.

Keywords:

credit scoring systems, machine learning algorithms, big data processing, explainable AI, model stability, data preprocessing, feature engineering, alternative data, banking analytics

ABSTRACT

The work takes into account contemporary techniques for creating scoring models for different kinds of credit products using machine learning techniques and alternative data sources. The models (logistic regression, Random Forest, XGBoost, and LSTM) were compared for the first time for Kazakhstan's second-level banks, with a focus on their interpretability, long-term stability, and suitability for various lending markets. The study's scientific novelty lies in how it uses Explainable AI techniques (SHAP, PDP) and alternative data (digital behavior, transactions, and telecom data) to create scoring cards and assess temporal stability models using the population stability index (PSI). The findings indicate that XGBoost exhibits the highest accuracy (AUC = 0.88), Random Forest offers a balance between quality and interpretability (AUC = 0.82), and logistic regression continues to be the fundamental model for regulated products because of its transparency and adherence to regulations.

КІРІСПЕ

Қаржы жүйесінде тәуекелдерді басқару құралдарының бірі ретінде кредиттік скоринг ерекше орын алады. Қарыз алушылардың төлем қабілеттілігін дәл бағалау банктердің қаржылық тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін ғана емес, сонымен бірге бүкіл қаржы нарығының сенімді жұмыс істеуі үшін маңызды. Дәстүрлі скорингтік әдістер негізінен қарапайым статистикалық тәсілдерге сүйеніп, қарыз алушының табысы, жасы, несиелік тарихы сияқты құрылымдалған көрсеткіштерді қолданды. Бұл тәсілдер ұзақ уақыт бойы тиімділігін дәлелдегенімен, қазіргі қаржы нарығының күрделілігі олардың шектеулерін айқын көрсетті.

Соңғы онжылдықта цифрландыру үдерісінің жеделдеуі нәтижесінде клиенттік база едәуір ұлғайып, деректердің жаңа түрлері пайда болды. Қаржы ұйымдары тек дәстүрлі құрылымдалған мәліметтермен шектелмей, транзакциялық деректерді, пайдаланушылардың цифрлық белсенділігін, әлеуметтік желілердегі мінез-құлқын және телеком-операторлардан алынған қосымша ақпаратты пайдалана бастады. Мұндай баламалы деректер кредиттік скоринг модельдерінің болжамдық қабілетін арттырып, қарыз алушылардың мінез-құлқын анағұрлым кешенді сипаттауға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, деректердің көлемі де экспоненциалды өсуде. Банктер мен финтех-компаниялардың ақпараттық жүйелерінде миллиондаған жазбалар жинақталып, дәстүрлі өңдеу әдістерінің өнімділігі жеткіліксіз бола бастады. Мұндай жағдайда Big Data технологияларын (Apache Spark, Hadoop, бұлттық инфрақұрылымдар) пайдалану қажеттілігі туындайды. Олар үлкен көлемдегі деректерді параллельді өңдеуді қамтамасыз етіп, нақты уақыт режимінде скоринг жүргізуге мүмкіндік береді.

Ғылыми әдебиеттерде кредиттік скорингке қатысты көптеген зерттеулер бар. Классикалық еңбектерде логистикалық регрессия негізгі модель ретінде қолданылды (Thomas, 2009; Hand & Henley, 1997). Кейінгі зерттеулерде ансамбльдік әдістер – Random Forest, Gradient Boosting және олардың нұсқалары кеңінен қолданыла бастады (Baesens et al., 2016). Соңғы жылдары терең оқыту архитектуралары, соның ішінде рекурренттік нейрондық желілер (LSTM) транзакциялық және уақыттық деректерді талдау үшін пайдаланылып жүр. Дегенмен, Қазақстандағы және жалпы Орталық Азиядағы жарияланымдарда баламалы деректерді интеграциялау, Explainable AI (мысалы, SHAP,



PDP) құралдарын қолдану және модельдердің уақыт бойынша тұрақтылығын PSI арқылы бағалау сирек қарастырылады.

Осыған байланысты, бұл зерттеу бірқатар ғылыми және практикалық мәселелерді шешуге бағытталған:

- құрылымдалған, құрылымдалмаған және баламалы деректерді салыстыра отырып, әртүрлі машиналық оқыту модельдерінің сапасын бағалау;
- алгоритмдердің интерпретациясын қамтамасыз ету үшін Explainable AI әдістерін енгізу;
- модельдердің уақыт бойынша тұрақтылығын Population Stability Index (PSI) арқылы талдау;
- әртүрлі несиелік өнімдерін тек мысал ретінде қолданып, әдістердің әмбебаптығын көрсету.

Зерттеудің мақсаты – кредиттік скоринг жүйелерін жетілдіру үшін заманауи машиналық оқыту алгоритмдерінің (Logistic Regression, Random Forest, XGBoost, LSTM) болжамдық қабілетін, интерпретациясын және тұрақтылығын кешенді бағалау. Несиелік өнімдері (тұтынушылық, ипотекалық, автонесие, қайта қаржыландыру, ШОБ, P2P) тек тәжірибелік сынақ алаңы ретінде пайдаланылып, басты назар деректердің түрлері мен алгоритмдердің сапасына аударылды.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

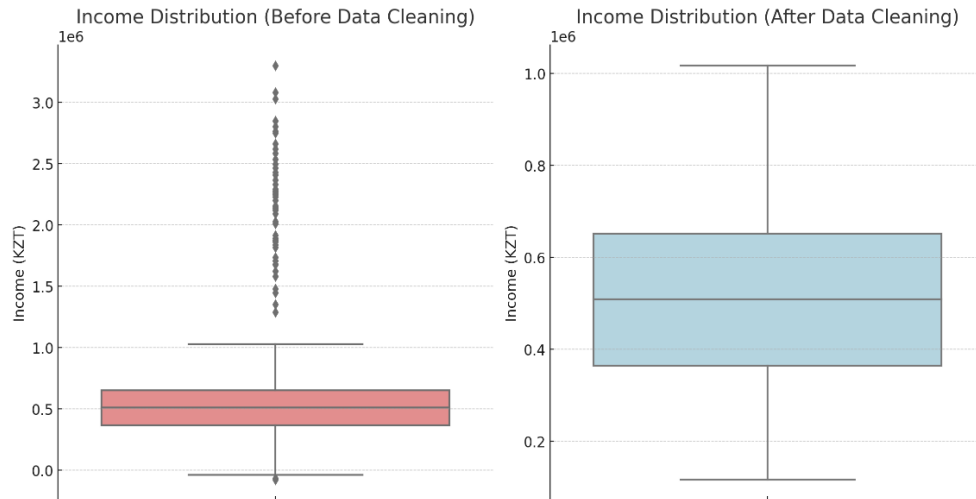
Бірнеше несиелік өнім түрлерінің қарыз алушылары туралы ақпаратты қамтитын мәліметтер жиынтығы осы зерттеу үшін жиналды. Деректерді жинау және дайындау бірнеше шешуші кезеңдерді қамтыды (Khandani, Kim & Lo, 2010).

Бірнеше көздерден, соның ішінде несиелік бюролардан, финтех платформалар мен коммерциялық банктерден несиелік өтінімдердің жазбаларын жинау бастапқы кезең болды. Біз несиелік өнімдердің кең спектрін қамтитын іріктеменің репрезентативтілігін ескере отырып, деректерді таңдадық (Baesens et al., 2016). Оларға тұтынушылық несиелер, қайта қаржыландыру, шағын және орта фирмаларға (ШОБ) несиелер беру, автокредиттер, ипотека және жеке-жеке несиелер жатады. Зерттеудің өзектілігін арттыру үшін зерттеуде несиелік скорингтің әдеттегі және баламалы элементтері қолданылды (Malekipirbazari & Aksakalli, 2015).

Деректерді одан әрі өңдеу ақпараттың толықтығы мен сапасын арттыру үшін жиналған алғашқы мәліметтерден кейін орындалды. Біз қарыз алушылардың несиелік қабілеттілігінің көрсеткіштерін, демографиялық ақпаратты және қаржылық ерекшеліктерін алдық. Әсіресе P2P несиелеу үлгілері үшін зерттеу сонымен қатар басқа деректер көздерінің арасында цифрлық мінез-құлық шараларын және транзакция деректерін қамтыды (Bastani et al., 2019; Berg et al., 2020).

1-кесте. Деректерді таңдаудың сипаттамасы

Несие түрі	Қарыз алушылардың саны	Орташа жасы	Орташа табыс (теңге)	Дефолттардың пайызы (%)
Тұтынушылық несиелер	10 000	35,2	450 000	5,8
Қайта қаржыландыру	7 500	39,8	520 000	4,5
ШОБ несиелеу	5 000	42,1	1 200 000	12,3
Автокредиттер	3 500	37,5	600 000	3,7
Ипотека	4 200	40,2	750 000	2,1
P2P несиелеу	6 000	29,8	300 000	15,4
Ескерту: авторлар ашық дереккөзден алынған мәліметтер негізінде құрастырған				



1-сурет. Деректерді тазалаудың қарыз алушылардың кірістерін бөлуге әсері.

Ескерту: авторлар синтетикалық деректер негізінде құрастырған

Деректерді түрлендіру және тазарту әдістері – олқылықтармен жұмыс істеу, қаржылық айнымалыларды қалыпқа келтіру және категориялық ерекшеліктерді кодтау – соңғы кезеңді белгіледі. Бұл деректерді келесі модельдеу мен талдауда орынды қолдануға кепілдік берді (Zhou et al., 2017; Chen et al., 2016).

Деректерді тазаламас бұрын, бірінші деректер сапа үлгісіне нұқсан келтіруі мүмкін кірістері өте жоғары және төмен шығарындыларды көрсетеді. Келесі деректерді тазарту барысында табыс ауқымы теңдестіріліп, деректер таза және модельдеуге жарамды күйге келтірілді.

Мәліметтерді алдын ала өңдеу

Несиелік тәуекел моделінің болжау мүмкіндіктерін жақсарту үшін мұқият деректерді алдын ала өңдеу құбыры орнатылды (Kelleher et al., 2020). Деректерді тазалау, мүмкіндіктерді жобалау, айнымалы түрлендіру, кодтау, масштабтау, деректерді бөлу және сыныптың теңгерімсіздігін шешу – процестегі дәйекті қадамдардың бірі болды (Zhang et al., 2019). Әрбір қадам машиналық оқыту алгоритмдері үшін жоғары сапалы кірістерді шығару кезінде қиғаштықты азайту және түсіндіруді қолдау үшін жасалған.

Деректерді тазарту

Деректер жинағы алдымен шектен тыс мәндерден және қайталанатын жазбалардан құтылу үшін тазартылды. Айырмашылықтарды табу үшін кватильаралық диапазон (IQR) және Z-балл әдістері қолданылды (Liu et al., 2004). Қималанған үлестірімдердің әсерін азайту үшін сандық айнымалылардағы жетіспейтін мәндер медиана мәнімен толықтырылды. Деректердің болмауына байланысты ықтимал нұсқаушы үлгілерді сақтау үшін категориялық айнымалылар үшін нақты «жоқ» санаты белгіленді (Saar-Tsechansky & Provost, 2007).

Зерттеу барысында Қазақстанның екінші деңгейлі банктерінен, кредиттік бюролардан және финтех-платформаларынан алынған қарыз алушылар жөніндегі кешенді деректер жиынтығы пайдаланылды. Жалпы деректер көлемі **31 200 жазбаны** құрайды, бұл нәтижелердің репрезентативтілігі мен статистикалық сенімділігін қамтамасыз етеді.

Іріктеменің құрылымы төмендегідей:

- 10 000 тұтынушылық несие;
- 7 500 қайта қаржыландыру жағдайлары;



- 5 000 ипотекалық несие;
- 4 200 автонесие;
- 2 500 шағын және орта бизнес (ШОБ) клиенттері;
- 2 000 P2P және финтех-платформалар деректері.

Зерттеу барысында қарыз алушыларға қатысты деректер бірнеше көзден алынды:

- Кредиттік бюро – қарыз алушының несие тарихы, бюроға жасалған сұраулар саны;
- Екінші деңгейлі банктер – табыс, жас, қарыз сомасы, қарыздық міндеттемелер;
- Финтех-компаниялар – транзакциялық белсенділік, төлем жиілігі, цифрлық мінез-

құлық индикаторлары;

- P2P платформалар – баламалы деректер (онлайн-активтілік, әлеуметтік желілердегі із қалдыру, телеком-операторлардан алынған ақпарат).

2-кесте. Модель айнымалылары және олардың сипаттамасы

Айнымалы	Сипаттамасы	Деректер түрі	Дерек көзі
Табыс	Қарыз алушының ай сайынғы расталған табысы	Құрылымдалған	Банк
Жасы	Өтініш берген сәттегі толық жас	Құрылымдалған	Банк
Несие сомасы	Сұратылған несие мөлшері	Құрылымдалған	Банк
Кредиттік міндеттемелер	Қарыз алушының барлық ағымдағы несие қарыздарының жиынтығы	Құрылымдалған	Банк / Кредиттік бюро
Бюроға сұраулар саны	Соңғы 12 ай ішінде кредиттік бюроға жасалған сұраулар саны	Құрылымдалған	Кредиттік бюро
DTI (Debt-to-Income)	Қарыздық жүктеменің табысқа қатынасы	Есептелген метрика	Банк / Финтех
PTI (Payment-to-Income)	Ай сайынғы төлемнің табысқа қатынасы	Есептелген метрика	Банк
Цифрлық мінез-құлық	Клиенттің онлайн-банкінг, төлемдер және мобильді қосымшалардағы белсенділігі	Құрылымдалмаған	Финтех
Телеком-деректер	Қоңыраулар жиілігі, геолокациялық үлгілер	Баламалы	Телеком-оператор
Әлеуметтік желілер	Қарыз алушының белсенділігі, желілік қауымдастықтарға қатысуы, мінез-құлық индикаторлары		

Ескерту: авторлар ашық дереккөзден алынған мәліметтер негізінде құрастырған

Жиналған ақпарат үш негізгі категорияға бөлінді:

Құрылымдалған деректер – қарыз алушының табысы, жасы, несие сомасы, кредиттік міндеттемелері, кредиттік бюроға жасалған сұраулар саны.

Құрылымдалмаған деректер – транзакциялық белсенділік, төлемдердің жиілігі мен тұрақтылығы, цифрлық мінез-құлық ерекшеліктері.

Баламалы деректер – телеком-операторлардан алынған ақпарат (қоңырау жиілігі, геолокациялық үлгілер), әлеуметтік желідегі белсенділік, салықтық және коммуналдық төлемдер.

Осындай деректердің үйлесімі дәстүрлі скоринг әдістерін заманауи цифрлық іздер мен мінез-құлық индикаторларына негізделген тәсілдермен салыстыруға мүмкіндік береді.



3-кесте. Деректердің түрлері мен мысалдары

Деректер категориясы	Айнымалылар мысалдары	Қолдану саласы
Құрылымдалған	Табысы, жасы, несие сомасы, міндеттемелері, бюро сұраулары	Барлық несие өнімдері
Құрылымдалмаған	Транзакциялар, төлем жиілігі, цифрлық мінез-құлық	P2P, финтех, тұтынушылық несиелер
Баламалы	Телеком деректері, әлеуметтік желілер, салықтық төлемдер	ШОБ, P2P, қайта қаржыландыру
<i>Ескерту: авторлар ашық дереккөзден алынған мәліметтер негізінде құрастырған</i>		

Үлкен деректерді өңдеу

Зерттеу барысында қолданылған деректер көлемі 31 200 жазбамен шектелгенімен, өндірістік жағдайда екінші деңгейлі банктер мен финтех-платформаларда скорингтік жүйелердің дерекқорлары миллиондаған жазбаны қамтиды. Мұндай жағдайда дәстүрлі әдістер деректерді өңдеу жылдамдығы мен есептеу қуаттылығына байланысты шектеулерге тап болады.

Big Data технологияларын пайдалану ірі көлемдегі деректерді өңдеу тиімділігін арттырады және нақты уақыт режимінде (real-time) скоринг жүргізуге мүмкіндік береді. Атап айтқанда, төмендегі тәсілдер ұсынылады:

Apache Spark және Hadoop – таратылған есептеулерді ұйымдастыру, параллельді деректерді өңдеу және үлкен көлемді транзакциялық ағындарды талдау үшін.

Облачные решения (AWS, Google Cloud, Azure) – масштабталатын инфрақұрылымды қамтамасыз етіп, модельдерді онлайн-режимде оқытуға және қолдауға мүмкіндік береді.

Таратылған дерекқорлар (HDFS, NoSQL) – құрылымдалмаған және жартылай құрылымдалған деректермен (телеком, әлеуметтік желілер) жұмыс істеу үшін.

Бұл тәсілдер скорингтік модельдердің өнімділігін арттырып қана қоймай, деректердің уақытылы жаңартылуын, болжамдардың жедел есептелуін және бизнес-процестердің автоматтандырылуын қамтамасыз етеді.

Осылайша, Big Data инфрақұрылымын енгізу қаржы институттарына үлкен көлемдегі клиенттік деректерді тиімді өңдеуге, модельдердің сапасын тұрақты бақылауға және тәуекелдерді басқарудың жаңа деңгейіне шығуға мүмкіндік береді.

Деректерді бөлу және валидация

Зерттеу барысында деректер жиынтығы оқыту (train) және тест (test) жиынтықтарына 80/20 қатынасында бөлінді. Модельдің нәтижелерін тұрақты бағалау үшін қатпарлы кросс-валидация (k-fold cross-validation) әдісі қолданылды, мұндағы $k = 5$. Бұл тәсіл әрбір модельдің өнімділігін бірнеше итерацияда тексеруге және орташа нәтижелерді алуға мүмкіндік берді.

Маңызды ерекшелік ретінде стратификация принципі сақталды: яғни, деректерді бөлу кезінде мақсатты айнымалының (дефолт / дефолт емес) пропорциясы барлық жиынтықтарда бірдей деңгейде қамтамасыз етілді. Бұл модельдердің теңгерімді оқытуына және бағалау нәтижелерінің объективтілігіне жағдай жасады.

Инженерлік ерекшеліктері

Деректер жиынының ақпараттық мәнін жақсарту үшін жаңа болжамды айнымалылар жасалды (Chakraborty et al., 2022). Олардың арасында қарыздың кіріске қатынасы (DTI) және төлемнің кіріске қатынасы (PTI) сияқты несие қабілеттілігінің өлшемдері болды. Несие лимитінің көрсеткіші де қарыз алушының ағымдағы қарыздары мен орташа айлық табысын пайдалана отырып есептелді. Қаржылық тәртіп пен өтімділік тәртібін сипаттау



үшін транзакциялық деректерге негізделген айнымалылар – төлемдердің жиілігі, транзакцияның орташа сомасы және шағын несиелердің болуы – қолданылды (Zhang et al., 2020).

Өзгермелі түрлендіру

Модельдің тұрақтылығын жақсарту және үлестірімнің қиғаштығын азайту үшін кіріс және несие сомасы сияқты үздіксіз айнымалылар логарифмдік түрлендіруге ұшырады (Tukey, 1977). Қарыз алушылар кіріс деңгейіне байланысты алдын ала белгіленген шектермен топтарға бөлінді - бұл тәсіл түсіндіруді жеңілдетіп, сызықтық емес тәуелділікті жақсырақ қамтуға мүмкіндік берді (Kuhn & Johnson, 2013).

Категориялық айнымалыларды кодтау

Номиналды категориялық айнымалылар бір ыстық кодтау (ONE) әдісі арқылы түрлендірілді (Pedregosa et al., 2011). Реттік немесе монотонды категориялық айнымалылар үшін дәлелдердің салмағы (WoE) кодтауы пайдаланылды – бұл логистикалық регрессияда интерпретацияны сақтау үшін маңызды болды (Hand & Henley, 1997).

Стандарттау және нормалау

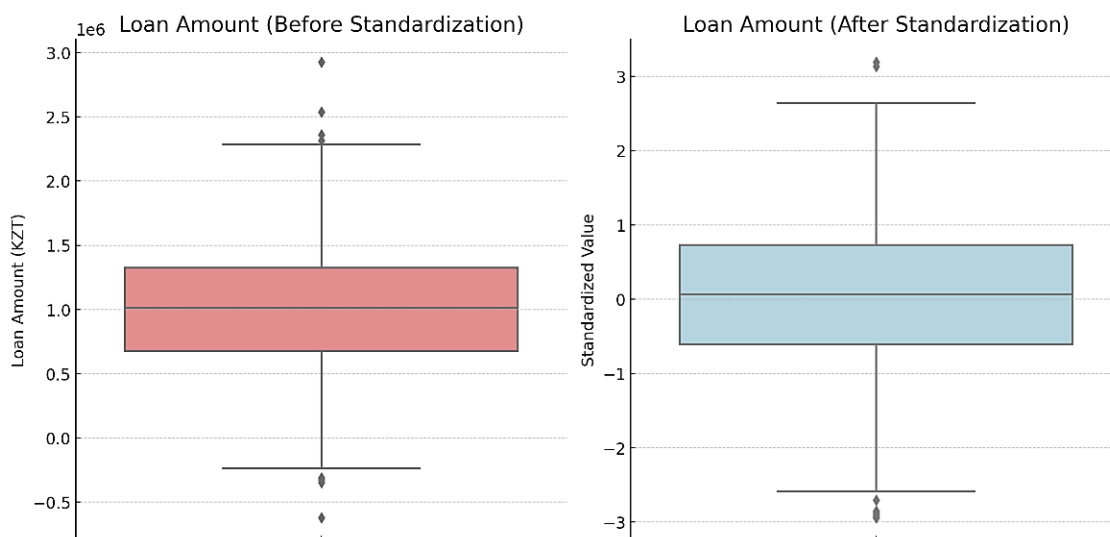
Айнымалылардың әртүрлі масштабтарын біріздендіру үшін Min-Max шкаласы немесе Z-балл (стандартты) нормализация қолданылды (Juszczak et al., 2002). Бұл масштабқа сезімтал модельдер (мысалы, логистикалық регрессия немесе нейрондық желілер) үшін маңызды болды.

Сынақ-поезды бөлу

Мәліметтер 80:20 қатынасында оқыту және сынау жиындарына бөлінді. Мақсатты айнымалы - әдепкі - бойынша стратификацияланған іріктеу қолданылды, бұл үлгілердің сынып бойынша бастапқы таралуын сақтауға көмектесті (Kohavi, 1995).

Сыныптағы теңгерімсіздікті шешу

Төленбеген несиелер 10 %-дан аз болғандықтан, теңгерімсіздікті шешу үшін бірқатар тәсілдер қолданылды. Оларға SMOTE сияқты артық іріктеу (Chawla et al., 2002) және жеткіліксіз іріктеу кірді. Сонымен қатар, үлгілердің жоғалту функциясына сынып салмағын қосу арқылы сирек кездесетін дефолт оқиғаларға сезімталдықты арттыру көзделді (He & Garcia, 2009).



2-сурет. Деректерді стандарттаудың несие сомасына әсері

Ескерту: авторлар ашық дереккөзден алынған мәліметтер негізінде құрастырған



Несие сомасы: Стандарттау алдында көрсеткіштердің кең спектрі және мүмкін ауытқулары бар. Несие сомасы (Стандарттаудан кейін) – Стандарттаудан кейін (Z-балл) мәндер төмендетіледі нөлдік орташа және бірлік дисперсиясы бар қалыпты үлестірімге.

Бағалау үлгілерін құру

Бұл зерттеу тең дәрежелі (P2P) несиелеу, тұтынушылық несиелер, қайта қаржыландыру бағдарламалары және ШОБ қаржыландыру сияқты әртүрлі несие өнімдері үшін мамандандырылған несиелік скоринг үлгілерін жасады. Модельдеу тәсілдерін таңдаған кезде қолда бар деректердің сапасы, несие өнімдерінің түрі және үлгіні түсіндірудің қажетті дәрежесі ескерілді (Thomas et al., 2017).

Түсіндірудің жоғары дәрежесіне, салыстырмалы түрде шағын деректер жинақтары бар тұрақтылыққа және нормативтік сәйкестікке байланысты логистикалық регрессия тұтынушылық және ипотекалық несиелер үшін базалық үлгі ретінде таңдалды (Hosmer et al., 2013).

Ансамбльге негізделген машиналық оқыту үлгілері, атап айтқанда Random Forest, XGBoost және LightGBM, ШОБ несиелері және қайта қаржыландыру схемалары сияқты күрделірек өнімдер үшін пайдаланылды (Breiman, 2001; Chen & Guestrin, 2016; Ke et al., 2017). Әртүрлі қарыз алушы профильдерінде жиі кездесетін кіріс мүмкіндіктері арасындағы жоғары дәрежелі өзара әрекеттесулер мен сызықтық емес қатынастарды осы үлгілер түсіруі мүмкін.

P2P несиелеу үлгілерінде терең нейрондық желілер және ұзақ қысқа мерзімді жады (LSTM) желілері сияқты нейрондық архитектуралар пайдаланылды (Hochreiter & Schmidhuber, 1997; Goodfellow et al., 2016). Баламалы және құрылымдалмаған деректерді тиімді пайдалану және мінез-құлық және транзакциялық мүмкіндіктерді біріктіру үшін бұл модельдер орталықтандырылмаған несие платформаларында қарыз алушы тәуекелін анықтау үшін маңызды болды.

Үлгінің өнімділігін арттыру және шамадан тыс орнатуды азайту үшін мұқият гиперпараметрлерді баптау және кросс-тексеру тәсілі қолданылды (Bergstra & Bengio, 2012). Random Forest және XGBoost үшін гиперпараметрлерді оңтайландыру үшін Grid Search және Random Search әдістері қолданылды. Байес оңтайландыруы оқу уақытын қысқарту және терең оқыту және градиентті арттыру үлгілері үшін дәлдікті арттыру үшін пайдаланылды (Snoek et al., 2012).

Модель өнімділігінің сенімді және объективті бағасын қамтамасыз ету үшін, әсіресе теңгерілмеген деректерде, k еселенген және стратификацияланған k-fold валидация әдістері қолданылды (Kohavi, 1995).

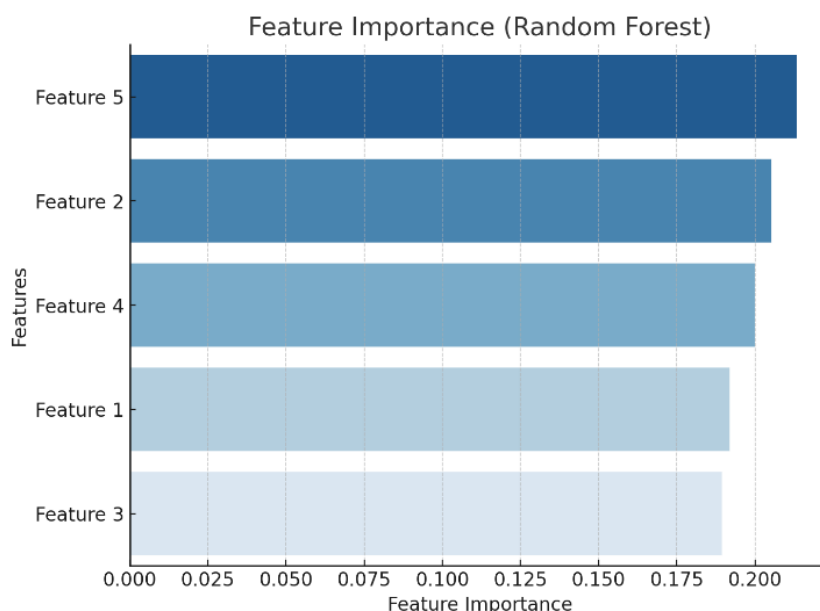
Шешім қабылдау мен ашықтықты жеңілдету үшін бірнеше түсіндірілетін AI (XAI) әдістері қолданылды. Әрбір мүмкіндіктің болжау нәтижесіне үлесін көрсету үшін SHAP (SHapley Additive Explanations) мәндері пайдаланылды (Lundberg & Lee, 2017). Ағашқа негізделген модельдер үшін дәстүрлі Gini importance және feature gain сияқты метрикалар да қолданылды. Сонымен қатар, ішінара тәуелділік графиктері (PDPs) айнымалылар өзгерісі әдепкі ықтималдыққа қалай әсер ететінін визуализациялау үшін қолданылды (Molnar, 2020).

Модельдің рейтингтік тиімділігін бағалау үшін Джини коэффициенті, ал классификация қуатын бағалау үшін ROC-AUC пайдаланылды (Hand & Till, 2001). Класстардың бөлінуі теңгерімсіз болған жағдайда, модельдің азшылық класына сезімталдығын тексеру үшін Precision-Recall қисықтары қарастырылды. Модельдің калибрленуін бағалау үшін калибрлеу сызбалары қолданылды (Niculescu-Mizil & Caruana, 2005).

Түсіндіру, болжамды өнімділік және іскерлік сәйкестік арасындағы тепе-теңдік соңғы модельді таңдауда басты рөл атқарды. Өзінің сенімді өнімділігі мен оңай түсіндірілуіне



байланысты логистикалық регрессия тұтынушылық және ипотекалық портфельдер үшін таңдаулы нұсқаға айналды. ШОБ және қайта қаржыландыру сегменттерінде градиентті күшейту алгоритмдері (XGBoost және LightGBM) жоғары болжам дәлдігін көрсетті. Терең нейрондық желілер, әсіресе мінез-құлық және балама деректер қосылғанда, P2P несиелеу үшін ең жақсы нәтиже көрсетті. Бұл оларды цифрлық негіздегі несиелеу платформалары үшін тиімді шешім етеді.



3-сурет. Кездейсоқ орман үлгісіндегі ерекшеліктердің маңызы

Ескерту: авторлар ашық дереккөзден алынған мәліметтер негізінде құрастырған

Графикте қарыз алушының дефолт ықтималдығын бағалау үшін қолданылатын кездейсоқ орман моделіндегі ерекшеліктердің өзектілігі көрсетілген. Модельге енгізілген факторлар Y осінде көрсетілген; олардың тәуекелді болжауға қосқан үлесі X осінде көрсетілген (мән неғұрлым жоғары болса, соғұрлым бұл сипаттаманың әсері көп болады). Графикте модельді таңдауға қандай факторлар көбірек әсер ететіні көрсетілген. Скорингтік картаны әзірлеу ең маңызды элементтерді ескеруі керек, өйткені олар қарыз алушылардың несиелік қабілетін бағалауға үлкен көмек көрсетеді. Маңыздылығы азырақ элементтер олардың құндылығы бойынша жойылуы немесе зерттелуі мүмкін.

Бұл зерттеу модельдің жұмысын нақтылайды және төлем қабілеттілігін болжау үшін қарыз алушылардың ең маңызды белгілері туралы гипотезалар жасайды (Baensens et al., 2016).

Үлгінің сапасын бағалау әдістері

Әзірленген баллдық үлгілердің өнімділігі мен сапасын бағалау үшін несиелік тәуекелді бағалауда жиі қолданылатын өлшемдер жинағы пайдаланылды (Thomas et al., 2017). Бұл көрсеткіштер үлгілердің тұрақтылығын, дискриминациялық күшін және әртүрлі несиелік өнім санаттарында пайдалануға жарамдылығын жан-жақты бағалауға мүмкіндік береді.

Модельдің жоғары тәуекелді және төмен тәуекелді қарыз алушыларды ажырату қабілеті Қабылдаушының жұмыс сипаттамасы қисығы астындағы аумақ (ROC-AUC) арқылы өлшенді. Жоғары ROC-AUC мәні үлгінің жақсы классификациялық өнімділігін білдіреді (Fawcett, 2006).



Кемсітушілік қуатты бағалаудың тағы бір маңызды құралы – Джини коэффициенті, ол ROC қисығына негізделген және модельдің қарыз алушыларды әдепкі ықтималдықтарына қарай қаншалықты дәл реттей алатынын көрсетеді (Hand & Henley, 1997; Crook et al., 2007). Джини жиі несиелік скорингте қолданылады, өйткені оның интерпретациясы түсінікті және тиімді.

Колмогоров-Смирнов (КС) статистикасы болжамды ұпайлардың жинақталған үлестіріміндегі дефолт жасағандар мен жасамағандар арасындағы максималды айырмашылықты көрсетеді. Бұл метрика екі сыныпты қаншалықты жақсы бөлетінін бағалауға мүмкіндік береді (Lem, 2019).

Халық тұрақтылығы индексі (PSI) модель болжамдарының уақыт бойынша өзгеруін бақылауға көмектеседі. PSI деректер дрейфінің бар-жоғын көрсету арқылы үлгіні қайта оқыту қажеттігін көрсетеді (Bailey, 2020).

Бизнес сценарийлерінің ауқымында үлгілердің дәлдігін, сенімділігін және жалпыламалық қабілетін тексеру үшін бұл бағалау көрсеткіштері әртүрлі несиелік өнімдерге жүйелі түрде қолданылды (Malekipirbazari & Aksakalli, 2015).

4-кесте. Модельді бағалау әдістері

Үлгі	POK-AUC	Джини коэффициенті	K5 Статистикалық	PSI
Логистикалық регрессия	0,76	0,52	0,32	0,08
Кездейсоқ орман	0,82	0,64	0,41	0,12
XGBoost	0,88	0,76	0,52	0,15
<i>Ескерту: авторлар ашық дереккөзден алынған мәліметтер негізінде құрастырған</i>				

Бұл кестеде қарыз алушылардың дефолтын болжау үшін қолданылатын бірнеше бағалау жүйелерін бағалау нәтижелері келтірілген. Көрсеткіштер үлгілердің тиімділігін бағалауға және несиелік қабілеттілікті бағалаудың оңтайлы алгоритмін таңдауға мүмкіндік береді.

Модельдің дефолтқа ұшыраған және төленбеген қарыз алушыларды ажырату қабілеті бірнеше белгіленген жіктеу көрсеткіштері арқылы бағаланды. Қолданылатын негізгі шаралардың бірі Қабылдаушының жұмыс сипаттамасы – қисық астындағы аймақ (ROC-AUC) болды, ол модельдің тәуекелі жоғары және төмен тәуекелді қарыз алушыларды саралау мүмкіндігін сандық түрде көрсетеді. Жоғары ROC-AUC мәндері күшті дискриминациялық қуатты көрсетеді.

Тағы бір маңызды көрсеткіш Джини коэффициенті болды, ол несиелік скорингте жиі қолданылатын индикатор болып табылады, ол модельдің несиелік тәуекел бойынша қарыз алушыларды бағалау мүмкіндігін өлшейді. Ол стандартты формула бойынша есептелді:

$$Gini = 2 \times \left(ROC - AUC - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

Колмогоров-Смирнов (КС) статистикасы дефолтқа ұшыраған және төленбеген қарыз алушылар арасындағы болжамды ұпай үлестіріміндегі алшақтықты бағалау үшін пайдаланылды. Жоғары KS мәндері осы екі топты бөлудің үлкен мүмкіндігін көрсетеді.

Модельдердің уақытша беріктігін бағалау үшін Популяция тұрақтылығы индексі (PSI) есептелді. Бұл көрсеткіш уақыт ішінде қарыз алушы сипаттамаларын бөлуде елеулі өзгерістер орын алғанын анықтайды. 0,20-дан жоғары PSI мәні әдетте үлгіні қайта калибрлеу қажеттілігін көрсетеді. Ағымдағы талдауда барлық үлгілер осы шекті мәннен төмен PSI мәндерін көрсетті, бұл олардың бағалау кезеңінде тұрақты болғанын көрсетеді.



Тексерілген алгоритмдердің ішінде XGBoost ROC-AUC = 0,88, Джини = 0,76 және KS = 0,52 арқылы ең жоғары жалпы өнімділікті қамтамасыз етті. Random Forest логистикалық регрессияға қарағанда жақсырақ, бірақ XGBoost-тан сәл төмен орындайтын ROC-AUC 0,82 орташа өнімділікті көрсетті. Логистикалық регрессия ең төменгі өнімділік көрсеткіштерін тіркеді (ROC-AUC = 0,76, Джини = 0,52), бірақ ол өзінің түсіндірмелілігі мен реттеу мөлдірлігінің арқасында практикада кеңінен қолданылады. XGBoost деректердің өзгеруіне (PSI = 0,15) жоғары сезімталдықты көрсеткенімен, үлгілердің ешқайсысы уақыт өте келе салыстырмалы беріктігін растайтын 0,20 шегінен аспады.

Модельдеу, алдын ала өңдеу және бағалау процедуралары бірқатар бағдарламалық құралдар мен бағдарламалау кітапханаларын қолдану арқылы жүргізілді. Python деректерді өңдеуге арналған пандалар, негізгі үлгілер үшін scikit-learn және кеңейтілген градиентті күшейту алгоритмдері үшін XGBoost және LightGBM сияқты маңызды пакеттері бар негізгі бағдарламалау тілі ретінде қызмет етті. SHAP кітапханасы (SHapley Additive Explanations) үлгі шығыстарын түсіндіру және мүмкіндіктің маңыздылығын бағалау үшін пайдаланылды. SQL реляциялық қарыз алушының дерекқорларына қол жеткізуді басқару үшін пайдаланылды және Jupyter Notebooks интерактивті талдау мен үлгіні әзірлеуге көмектесті. Осы құралдардың үйлесімі әрбір несиелік өнімнің ерекше сипаттамаларына бейімделген сенімді аналитикалық құбырды жүзеге асыруға мүмкіндік берді.

Зерттеуде бірнеше машиналық оқыту әдістері пайдаланылды: логистикалық регрессия, Random Forest, XGBoost және LSTM. Әрбір алгоритмнің математикалық негіздері, жұмыс принциптері, негізгі гиперпараметрлері және қолдану салалары төменде сипатталған.

1. Логистикалық регрессия (Logistic Regression)

Математикалық модель:

$$P(y = 1|X) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}} \quad (2)$$

Принцип: ықтималдықтық функция негізінде қарыз алушының дефолт ықтималдығын бағалайды. Сызықтық тәуелділіктерге және түсіндіру мүмкіндігіне тиімді.

Гиперпараметрлер: penalty = l2; solver = liblinear; C = 1.0.

Қолдану саласы: тұтынушылық несиелер мен ипотека, себебі реттеу талаптарына сәйкес түсіндірілуі қажет.

2. Random Forest

Математикалық модель (жалпылама):

$$\hat{y} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T h_t(x), \quad h_t(x) \in \{0,1\} \quad (3)$$

мұндағы T – ағаштар саны, $h_t(x)$ – әрбір ағаштың шешімі.

Принцип: шешім ағаштарының ансамблі (bagging), кездейсоқ ерекшеліктерді таңдау арқылы модельдің тұрақтылығын арттырады және сызықтық емес тәуелділіктерді жақсы қамтиды.

Гиперпараметрлер: n_estimators = 200; max_depth = 10; min_samples_split = 5; min_samples_leaf = 2.

Қолдану саласы: шағын және орта бизнес (ШОБ) және қайта қаржыландыру сегменттері.

3. XGBoost (Extreme Gradient Boosting)

Математикалық модель:

$$\widehat{y}_i^{(t)} = \sum_{k=1}^t f_k(x_i), \quad f_k \in F \quad (4)$$

мұндағы f_k – шешім ағаштары, F – барлық мүмкін ағаштар кеңістігі.



Принцип: градиентті бустинг әдісі, әрбір жаңа ағаш алдыңғы ағаштардың қатесін түзетеді. Жоғары дәлдік пен тұрақты оптимизацияны қамтамасыз етеді.

Гиперпараметрлер: $n\_estimators = 300$; $learning\_rate = 0.1$; $max\_depth = 6$; $subsample = 0.8$; $colsample\_bytree = 0.8$.

Қолдану саласы: қайта қаржыландыру, ШОБ және P2P сегменттері – күрделі деректер құрылымдары үшін.

4. LSTM (Long Short-Term Memory Neural Network)

Математикалық модель:

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t), \quad c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t \quad (5)$$

мұндағы i_t, f_t, o_t — кіріс, ұмытушылық және шығыс қақпалары.

Принцип: уақыттық және реттелген деректерді тиімді өңдейтін рекуррентті нейрондық желі. Цифрлық іздер мен транзакциялық белсенділікті болжауда қолданылады.

Гиперпараметрлер: екі жасырын қабат (128 және 64 нейрон), $activation = ReLU$, $dropout = 0.3$, $optimizer = Adam$, $epochs = 50$, $batch\_size = 128$.

Қолдану саласы: P2P және финтех сегменттері, құрылымдалмаған деректер мен пайдаланушы мінез-құлқын талдау үшін.

5-кесте. Алгоритмдердің ерекшеліктері мен қолдану салалары

Алгоритм	Ерекшеліктері	Қолдану саласы
Логистикалық регрессия	Қарапайым, түсіндірілетін, нормативтік талаптарға сай	Тұтынушылық несиелер, ипотека
Random Forest	Ансамбльдік әдіс, деректердегі шуды азайтады	ШОБ, қайта қаржыландыру
XGBoost	Жоғары дәлдік, тұрақты оптимизация	ШОБ, қайта қаржыландыру, P2P
LSTM	Уақыттық тәуелділікті ескереді, цифрлық іздерді талдайды	P2P және финтех өнімдері
<i>Ескерту: авторлар ашық дереккөзден алынған мәліметтер негізінде құрастырған</i>		

Кестеде логистикалық регрессия, Random Forest, XGBoost және LSTM сияқты негізгі машиналық оқыту алгоритмдерінің ерекшеліктері мен олардың екінші деңгейлі банктердің скорингтік модельдерінде қолдану салалары жүйеленген. Бұл салыстыру әрбір модельдің артықшылықтары мен шектеулерін анық көрсетеді.

Программалық қамтамасыз ету және қолданылған құралдар

Зерттеуде скорингтік модельдерді құру, оқыту және бағалау үшін заманауи бағдарламалық қамтамасыз ету мен ашық бастапқы кодты кітапханалар пайдаланылды.

Негізгі құралдар:

Python 3.11 – негізгі бағдарламалау тілі ретінде;

Scikit-learn – базалық алгоритмдер (Logistic Regression, Random Forest), метрикалар (ROC-AUC, Gini, KS) және деректерді алдын ала өңдеу үшін;

XGBoost және LightGBM – градиентті бустинг негізінде жоғары өнімді модельдер құру үшін;

SHAP (Shapley Additive Explanations) – модельдердің интерпретациясы мен Explainable AI талдауын жүзеге асыру үшін;

Pandas және NumPy – деректерді талдау және матрицалық есептеулер үшін;

TensorFlow/Keras – нейрондық желілерді (LSTM) жобалау және оқыту үшін;

SQL – реляциялық дерекқорлардан деректерді алу және алдын ала өңдеу үшін;



Jupyter Notebooks – эксперименттерді жүргізу және нәтижелерді құжаттау үшін;
Apache Spark – үлкен көлемді деректерді параллельді өңдеуді және модельдерді өндірістік масштабта енгізуді қолдау үшін.

Бұл құралдар кешені скорингтік модельдердің барлық кезеңдерін — деректерді жинаудан бастап модельдерді түсіндіруге дейін — толық қамтуға мүмкіндік берді.

Модельдерді баптау және интерпретация

Бұл зерттеу тек дайын кітапханаларды қолданумен шектелмей, бірқатар ғылыми-тәжірибелік қадамдарды қамтыды. Әрбір модельдің өнімділігін арттыру үшін гиперпараметрлерді мұқият баптау жүргізілді (Random Forest үшін ағаштар саны, тереңдігі, бөліну критерийлері; XGBoost үшін оқу жылдамдығы, ағаш тереңдігі, subsample және colsample параметрлері; LSTM үшін қабат саны, нейрондар, epochs және batch size).

Сонымен қатар, әртүрлі алгоритмдердің нәтижелері салыстырылып, олардың артықшылықтары мен шектеулері айқындалды. Бұл салыстырмалы талдау скорингтік модельдерді нақты сегменттерде қолдану тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді.

Зерттеудің маңызды ерекшелігі – Explainable AI әдістерін (SHAP – Shapley Additive Explanations, PDP – Partial Dependence Plots) пайдалану арқылы модельдердің интерпретациясын қамтамасыз ету. Бұл тәсілдер модельдің ішкі логикасын ашуға, айнымалылардың әсерін бағалауға және регуляторлық талаптарға сәйкес түсіндірілуін қамтамасыз етуге мүмкіндік берді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

1. Модельдердің тиімділігін салыстыру

Бірнеше скорингтік модельдердің тиімділігін бағалау үшін ROC-AUC, Gini коэффициенті, Колмогоров-Смирнов статистикасы (KS) және халық тұрақтылығының индексі (PSI) қоса алғанда, негізгі статистика есептелді.

3-кестеде XGBoost, кездейсоқ орман және логистикалық регрессия нәтижелерін салыстыру көрсетілген.

- XGBoost барлық маңызды критерийлер бойынша үздік болып шықты. Тиімділік коэффициенті (ROC-AUC) = 0,88, бұл оның несиелік тәуекел негізінде қарыз алушыларды жіктеудің жоғары мүмкіндігіне кепілдік береді. Оның жоғары тану қабілетін 0,76 Джини коэффициенті дәлелдейді; 0,52 KS статистикасы дефолтқа жол берген қарыз алушылар мен дефолтқа жол бермеген қарыз алушылардың жақсы бөлінуін көрсетеді.

- Кездейсоқ орман орташа мәндерді көрсетті. ROC-AUC = 0,82 қатынасы XGBoost-қа қарағанда төмен болғанымен, логистикалық регрессияға қарағанда жоғары. Бұл интерпретация мен дәлдікті біріктіреді.

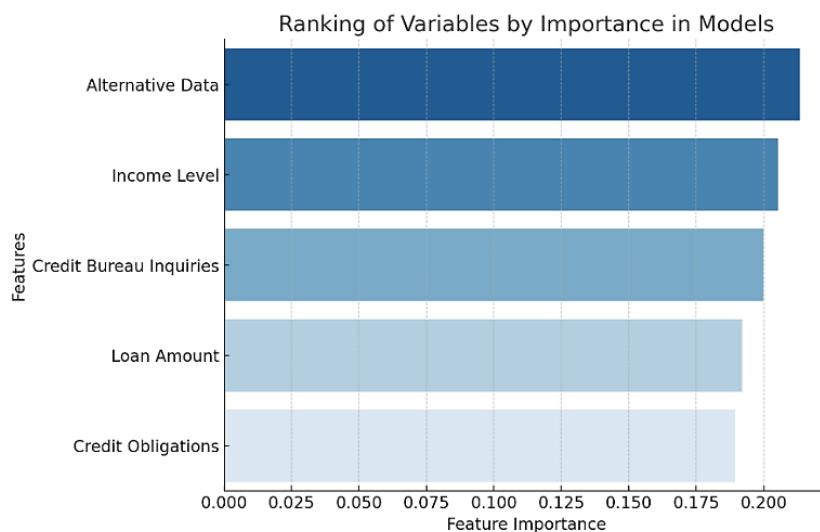
- Логистикалық регрессия ең әлсіз нәтижелерге қол жеткізгенімен (ROC-AUC = 0,76, Джини коэффициенті = 0,52), оның жоғары интерпретациялануы мен билік үшін ашықтығы оның неге әлі де жиі кездесетінін түсіндіруге көмектеседі.

PSI зерттеулеріне сәйкес, барлық модельдер тұрақты болғанымен (PSI = 0,2), XGBoost (PSI = 0,15) қарыз алушының сипаттамаларының өзгеруіне сезімтал және жиі калибрлеуді қажет етеді.

2. Баллдық жүйелердегі ерекшеліктердің маңыздылығын тексеру Пайдалану кездейсоқ орман үшін кіріктірілген маңыздылықты бағалау әдістері және XGBoost сондай-ақ ПШПН (Шапли Аддитивті түсініктемелер) ерекшеліктердің маңыздылығын талдау, модельдерді түсінуге болады.

Y осі атрибуттарды атайды: несие сомасы, кіріс деңгейі, несиелік міндеттемелер, несиелік бюронның сұраныстары, балама мәліметтер.

X осі: Мүмкіндіктердің маңыздылығы; айнымалы мән әдепкі болжамға олардың мәні неғұрлым жоғары болса, соғұрлым көбірек әсер етеді.



4-сурет. Модельдердің айнымалы дәрежелері олардың маңыздылығына қарай

Ескерту: авторлар ашық дереккөзден алынған мәліметтер негізінде құрастырған

Алғашқы талдаудың нәтижелері

Барлық модельдер үшін маңызды элементтер:

- Дефолттың негізгі көрсеткіштерінің бірі несие сомасы болып табылады. Несие сомасының жоғарылауы қарыз алушы үшін ықтимал қарыз жүктемесінің жоғарылауына әкеледі, сондықтан қайтарылмау тәуекелін арттырады.

- Қарыз алушыдағы төлем қабілеттілігінің негізгі белгілерінің бірі олардың табыс деңгейі болып табылады. Табыстың жоғарылауы дефолт тәуекелін төмендетсе де, оның әсерін қарыздың барлық жүктемесіне қатысты байқау керек.

- Несиелік міндеттемелер қарыз алушының қарыздық жүктемесін көрсетеді. Белсенді несиелердің көптігі қайтарылмау тәуекелін арттырады.

- Несиелік бюроға сұрау салудың жиілігі қарыз алушының қаржылық проблемалары мен тәуекелдің жоғары дәрежесін көрсетуі мүмкін.

Ауыстырылатын деректердің әсері

- P2P несиелеу кезінде дефолт болжамына мінез-құлық және транзакциялық деректер (төлемдердің жиілігі, шығыстардың құрылымы сияқты) қатты әсер етеді.

- Қайта қаржыландыруда маңызды мәселе несие қайта қаржыландырылған банк болып табылады, өйткені бастапқы банктегі несие шарттары қарыз алушының қаржылық жағдайын аша алады.

- Ипотекалық және автокредиттерде қарыз алушының қызмет ету мерзімі мен қамтамасыз ету құны активтің өтімділігіне және кірісті бағалаудың тұрақтылығына айтарлықтай әсер етеді.

Кездейсоқ орман ерекшеліктерінің өзектілігін түсіндіру

- Кездейсоқ орман моделінің ерекшеліктерінің маңыздылығын талдау әдепкі болжамға әсер етуі ықтимал айнымалыларды анықтады. Кесте X әрбір фактордың модель таңдауына сәйкес әсерін тізімдейді.

Қарапайым бақылаулар:

- Атап айтқанда, P2P несиелеу және финтех индустриясында баламалы деректер - мінез-құлық және транзакциялық көрсеткіштер – құрылымдалмаған деректерді біріктіру скоринг үлгілерінің дәлдігін арттыратынын дәлелдеуде үлкен өзектілігін көрсетті.



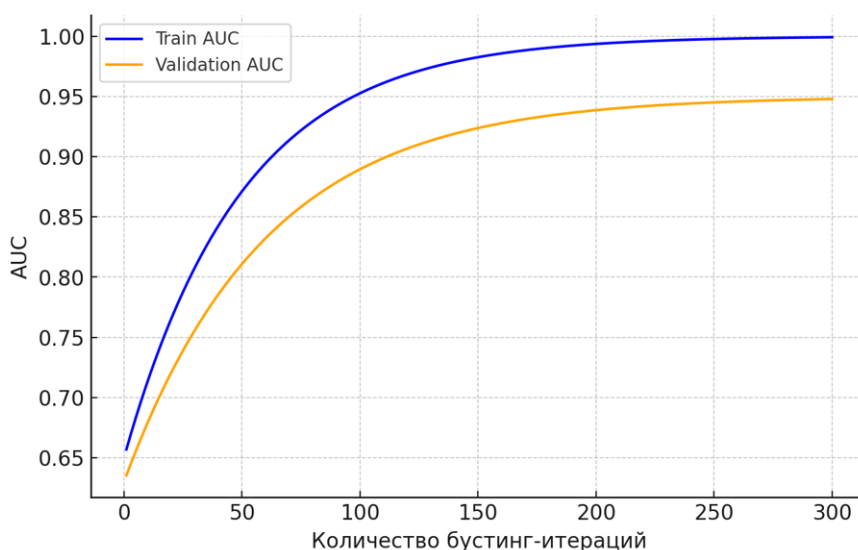
• Несиелік қабілеттіліктің негізгі детерминанттарының бірі бола тұра, қарыз алушының кірісі дефолт болжамына, әсіресе кәдімгі банктік несиелендіруге үлкен әсер етеді.

• Несиелік бюроға жасалған сұраулар қарыз алушының қаржылық жағдайы туралы анықтама береді: олардың көпшілігі тәуекелдің жоғары дәрежесін және ақшаның шұғыл қажеттілігін көрсетуі мүмкін.

• Несиелік міндеттемелер қарыз жүктемесінің қарыз алушының төлем қабілеттілігіне әсерін көрсетеді.

Модельдерді оқыту динамикасы

Зерттеу барысында модельдердің тек соңғы метрикалары ғана емес, сонымен бірге олардың оқыту процесі де талданды. Әсіресе XGBoost моделінде оқу қисықтары (learning curves) бақылауға алынды.



5-сурет. XGBoost training dynamics

Ескерту: авторлар ашық дереккөзден алынған мәліметтер негізінде құрастырған

Графикте training және validation жиынтықтары бойынша AUC мәндерінің өзгеруі көрсетілген. Алғашқы итерациялар кезінде модельдің дәлдігі біртіндеп өсіп, шамамен 150-бустинг ағашынан кейін тұрақтанды. Training және validation қисықтарының жақын орналасуы модельдің шамадан тыс үйреніп кетпегенін (overfitting жоқтығын) көрсетеді.

Random Forest және логистикалық регрессия жағдайында оқу процесі тұрақты болып, метрикалар бірден жоғары деңгейде сақталды. Ал LSTM моделінде loss және ассигасу бойынша айқын динамика байқалды: алғашқы 10 эпохада қателік жылдам төмендеді, ал 30-40 эпохадан кейін convergence деңгейіне жетті.

Модель интерпретациясы (SHAP importance)

Explainable AI әдістері, соның ішінде SHAP values, негізгі айнымалылардың модель шешіміне әсерін түсіндіруге мүмкіндік берді. SHAP-графиктерінде ең ықпалды факторлар ретінде табыстың деңгейі, DTI, PTI, несие сомасы және кредиттік бюроға сұраулар саны анықталды. Бұл факторлар дәстүрлі скоринг логикасына сәйкес келіп, машиналық оқыту алгоритмдерінің бизнес-заңдылықтармен үндес екенін көрсетті.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл зерттеу кредиттік скоринг жүйелерінде машиналық оқыту әдістерін қолданудың тиімділігін жан-жақты көрсетті. Алынған нәтижелер дәстүрлі тәсілдердің (логистикалық



регрессия) қарапайымдылығы мен интерпретация мүмкіндігін сақтағанымен, олардың болжамдық қабілеті күрделі деректерді талдауда шектеулі екенін айқындады.

Ансамбльдік модельдер, атап айтқанда Random Forest және XGBoost, құрылымдалған және құрылымдалмаған деректерді өңдеуде жоғары өнімділік көрсетті. Random Forest тұрақтылық тұрғысынан тиімді болып шықса, XGBoost ең жоғары дәлдікке жетті (AUC = 0,88). Бұл көрсеткіш дәстүрлі логистикалық регрессиядан едәуір жоғары, алайда XGBoost деректердің уақыт бойынша өзгеруіне (population drift) сезімтал екенін атап өткен жөн.

LSTM нейрондық желілері P2P және финтех сегменттерінде цифрлық іздер мен уақыттық транзакциялық деректерді талдау үшін перспективалы екені анықталды. Бұл модельдер дәстүрлі құрылымдалған деректерді толықтырып, альтернативті деректердің (телеком, әлеуметтік желілер, онлайн-платформалар) кредиттік қабілетті бағалаудағы маңызын дәлелдейді.

Explainable AI құралдарын (SHAP, PDP) енгізу нәтижелері алгоритмдердің шешім қабылдау логикасын түсіндіруге мүмкіндік берді. Бұл екінші деңгейлі банктер үшін регуляторлық талаптарға сәйкес интерпретацияны қамтамасыз етудің маңызды тетігі болып табылады. Сонымен қатар, Population Stability Index (PSI) модельдердің уақыт бойынша тұрақтылығын бағалауға мүмкіндік беріп, олардың өндірістік жағдайда ұзақмерзімді қолдануға жарамдылығын көрсетті.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы – құрылымдалған, құрылымдалмаған және баламалы деректерді кешенді қолдану арқылы әртүрлі машиналық оқыту модельдерінің сапасын салыстырмалы талдау, Explainable AI әдістерін енгізу және модельдердің уақыт бойынша тұрақтылығын PSI арқылы бағалау. Практикалық тұрғыдан алғанда, алынған нәтижелер екінші деңгейлі банктерге және финтех-компанияларға кредиттік скоринг жүйелерін жетілдіруде бағдар бола алады.

Қорытындылай келе, кредиттік скоринг жүйелерін жетілдіру үшін гибридік тәсіл ұсынылады:

- логистикалық регрессия – түсіндірілуі маңызды және реттеуші талаптарға сай өнімдер үшін (ипотека, тұтынушылық несиелер);
- Random Forest – тұрақтылық қажет жағдайларда;
- XGBoost – күрделі сегменттерде жоғары дәлдікті талап ететін процестер үшін;
- LSTM – цифрлық іздер мен транзакциялық деректерді талдауға бағытталған P2P және финтех өнімдері үшін.

Осылайша, зерттеу нәтижелері Қазақстандағы кредиттік скорингтің даму бағытын айқындап қана қоймай, заманауи машиналық оқыту әдістерін енгізудің ғылыми-тәжірибелік негізін қалыптастырады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Қоңыр I., Mues C. (2012). Теңгерімсіз несиелік скоринг деректерінің жіктеу алгоритмдерін эксперименттік салыстыру. Сараптамалық жүйелер қосымшалармен, Т. 39, № 3, 3446–3453. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.033> // Qonyr I., Mues C. Tengerimsiz nesielik scoring derekteriniñ zhikteý algoritmderin eksperimenttik salystyruý. Sarapnamalyq zhүйeler qosymshalarmen, T. 39, No. 3, 3446–3453. [An experimental comparison of classification algorithms for imbalanced credit scoring data. Expert Systems with Applications.] In Russ.
- Аррам А., Аюб М., Альбадр М.А.А., Сүлеймен А., Албашиш Д. (2023). Машиналық оқыту үлгілерін пайдалана отырып, несиелік рейтингті болжау: жаңа деректер жинағы.



- арХив баспаға дейінгі, арХив:2310.02956. <https://arxiv.org/abs/2310.02956> // Arram A., Ayub M., Albadar M.A.A., Süleymen A., Albashish D. Mashinalyq oqytý ulgilerin paidalana otyryp, nesielik reitingti bolzhaý: zhana derekter zhınaýy. arXiv preprint, arXiv:2310.02956. [Credit rating prediction using machine learning models: a new dataset.] In Russ.
- Дәулетханұлы Ү., Ойшынова Б. (2023). Монетарлық реттеушінің машиналық оқытуды және жасанды интеллектті қолдануы. Қазақстан Республикасы Ұлттық Банкінің экономикалық шолуы, № 4. <https://nationalbank.kz/file/download/98995> // Dauletkhanuly Y., Oyshynova B. Monetarlyq retteushinin mashinalyq oqytudy zhane zhasandy intellekti qoldanu. Qazaqstan Respublikasy Ulttyq Bankining ekonomikalıq sholuy, No. 4. [Application of machine learning and AI by the monetary regulator.] In Russ.
- Қадиев Ә., Чибисова Ә. (2022). Кредиттік скорингтің нейрондық желілік әдістері. Математикалық модельдеу және сандық әдістер, Т. 4, 81–92. https://mmcm.bmstu.ru/articles/download_article/295/ // Kadiev A., Chibisova A. Kredittik scoringting neirondyq zhelilik adisteri. Matematikalyq modeldeu zhane sandyq adister, T. 4, 81–92. [Neural network methods in credit scoring. Mathematical Modelling and Numerical Methods.] In Russ.
- Оғыз К., Уғур О., Кестел Ә.С. (2023). Кредиттік скорингті анықтауда мүмкіндіктерді таңдау мен түрлендірудің машиналық оқыту әдістеріне әсері. арХив баспаға дейінгі, арХив:2303.05427. <https://arxiv.org/abs/2303.05427> // Oguz K., Ugur O., Kestel A.S. Kredittik scoringti anyqtawda mumkindikterdi tandaw men turlendirudin mashinalyq oqytý adisterine aseri. arXiv preprint, arXiv:2303.05427. [Impact of feature selection and transformation methods on credit scoring.] In Russ.
- Шухардин Ә. (2024). Машиналық оқыту модельдеріне негізделген несиелік скоринг жүйесін дамыту. Орал Федералды университетінің электронды мұрағаты. https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/140553/1/m_th_a.v.shukhardin_2024.pdf // Shukhardin A. Mashinalyq oqytý modelderine negizdelgen nesielik scoring zhuyesin damytu. Oral Federaldy universitetining elektronny muragaty. [Development of a credit scoring system based on machine learning models.] In Russ.
- Гриер Д.А. (2012). Кредиттік скоринг және кредиттік бақылау. Оксфорд: Оксфорд университетінің баспасы // Grier D.A. Kredittik scoring zhane kredittik baqylaw. Oxford: Oxford universitetining baspasy. [Credit scoring and credit control. Oxford University Press.] In Russ.
- Biecek P., Khlebus M., Gaida J., Gosevska A., Kozaq A., Ogonovskii D., Sztachelski J., Wojewnik P. (2023). Кредиттік скоринг үшін машиналық оқыту алгоритмдерін қосу: күрделі болжамды модельдерді нақты түсінуге арналған түсіндірілетін жасанды интеллект (ХАИ) әдістері. арХив баспаға дейінгі, арХив:2310.02956. <https://arxiv.org/abs/2310.02956> // Biecek P., Khlebus M., Gaida J., Gosevska A., Kozaq A., Ogonovskii D., Sztachelski J., Wojewnik P. Kredittik scoring ushun mashinalyq oqytý algoritmderin qosu: kurdeli bolzhamdy modelderdi tusinyge arналган tusindiriletin jasandy intellekt (ХАИ) adisteri. arXiv preprint, arXiv:2310.02956. [Explainable AI for complex predictive models in credit scoring.] In Russ.
- Хенли В.Е., Ханд Д.Ж. (1996). А к-ең жақын-көрші тұтынушылық несиелік тәуекелді бағалаудың жіктеуіші. Статист, Т. 45, № 1, 77–95. <https://doi.org/10.2307/2988486> // Henley V.E., Hand D.J. A k-en jakyn-korshi tutynushylyk nesielik tauyekeldi bagalau zhyiktewishi. Statist, T. 45, No. 1, 77–95. [A k-nearest neighbor classifier for consumer credit risk. The Statistician.] In Russ.
- Центральный банк Российской Федерации. (2022). Және әсері бастап теріс жаңалықтар күні қоғамдық қабылдаудың бұзылуы бастап инфляция. Рабочие материалы Банка



- России, № 111. https://www.cbr.ru/content/document/file/144918/wp_111.pdf // Tsentral'nyi bank Rossiiskoi Federatsii. Zhane aseri bastap teris zhanalyqtar kuni qogamdyq qabyldawdyn buzylyuy bastap inflyatsiya. Raboche materialy Banka Rossii, No. 111. [The effect of negative news and public perception shifts on inflation. Working Papers of the Bank of Russia.] In Russ.
- Мұнхдалай Л., Намсрай О.Б., Ли Ж.Ы., Рю Қ.Х. (2019). Банк клиентінің несиелік бағалауы бойынша машиналық оқыту әдістерін эмпирикалық салыстыру. Тұрақтылық, Т. 11, № 3, 699. <https://doi.org/10.3390/cy11030699> // Munkhdalai L., Namsrai O.B., Li Zh.Y., Ryu Q.H. Bank klientinin nesielik bagalauy boynsha mashinalyq oqytu adisterin empirikalik salystyry. Turaktylyk, T. 11, No. 3, 699. [Empirical comparison of machine learning methods for credit evaluation of bank clients. Sustainability.] In Russ.
- Расторгуев Ә., Микишанина Б. (2022). Қарыз алушының несиелік қабілеттілігін бағалаудың скорингтік моделін құру. Электронный научный журнал «Вектор экономики», № 5. https://www.vectoreconomy.ru/images/publications/2022/5/mathematicalmethods/Rastorguev_Mikishanina.pdf // Rastorguev A., Mikishanina B. Qaryz alushynyn nesielik qabiletiligin bagalaudyn scoringtik modelin quru. Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Vektor ekonomiki», No. 5. [Building a scoring model for borrower creditworthiness assessment. Vector of Economics.] In Russ.
- Татаринцев М.Ә., Никитин П. В., Горохова Р. И., Долгов В. И. (2022). Кредиттік скоринг тапсырмалары бойынша машиналық оқыту технологияларын салыстырмалы талдау. Іргелі зерттеулер, Т. 2, 7-12. <https://doi.org/10.17513/фр.43419> // Tatarintsev M.A., Nikitin P.V., Gorokhova R.I., Dolgov V.I. Kredittik scoring tapsyrmalary boynsha mashinalyq oqyty tekhnologiyalaryn salystyrmaly taldaу. Irgeli zertteyler, T. 2, 7–12. [Comparative analysis of machine learning technologies in credit scoring tasks. Fundamental Research.] In Russ.
- XGBoost Құжаттама. (2025). Кездейсоқ ормандар™ ішінде XGBoost. <https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/tutorials/rf.html> (қол жеткізу күні: 13.02.2025) // XGBoost Quzhattama. Kedzeisoq ormandar™ ishinde XGBoost. <https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/tutorials/rf.html> (accessed: 13.02.2025). [XGBoost Documentation: Random Forests in XGBoost.] In Russ.
- Аддо П.М., Геган Д., Хасани В. (2018). Машиналық және тереңдетіп оқыту модельдерін қолдану арқылы несиелік тәуекелдерді талдау. Тәуекелдер, Т. 6, № 2, 38. <https://doi.org/10.3390/тауекелдер6020038> // Addo P.M., Guegan D., Khasani B. Mashinalyq zhane terengdetip oqytu modelderin qoldanu arqyly nesielik tauyekelderdi taldaу. Tauyekelder, T. 6, No. 2, 38. [Credit risk analysis using machine and deep learning models. Risks.] In Russ.
- Ху Л., Чен Д., Вонг Дж., Ян Х., Ван К., Суджианто А., Наир В.Н. (2020). Жетекшілік ететін машиналық оқыту әдістері: банктік қызметке қосымшалармен шолу. arXiv баспаға дейінгі, arXiv:2008.04059. <https://arxiv.org/abs/2008.04059> // Hu L., Chen D., Wong J., Yang H., Wang K., Sudjianto A., Nair V.N. Zhetekshilik etetin mashinalyq oqyty adisteri: banktik qyzmetke qosymshalarmen sholu. arXiv preprint, arXiv:2008.04059. [Supervised machine learning methods with applications to banking.] In Russ.
- Abedin, B., Meske, C., Junglas, I., & others. (2022). Designing and managing human-AI interactions. Information Systems Frontiers, 24, 691–697. <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10313-1>
- Aggarwal, C. C. (2015). Outlier analysis (2nd ed.). Springer.
- Baesens, B., Roesch, D., & Scheule, H. (2021). Hybrid credit scoring models: Combining traditional and machine learning approaches. Springer.



- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785–794). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
- Hand, D. J., & Henley, W. E. (1997). Statistical classification methods in consumer credit scoring: A review. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 160(3), 523–541. <https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.1997.00078.x>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2nd ed.). Springer.
- He, H., & Garcia, E. A. (2009). Learning from imbalanced data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 21(9), 1263–1284. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2008.239>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression* (3rd ed.). Wiley.
- Kelleher, J. D., Mac Namee, B., & D'Arcy, A. (2020). *Fundamentals of machine learning for predictive data analytics* (2nd ed.). MIT Press.
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q., & Liu, T.-Y. (2017). LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30. https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2017/hash-6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Abstract.html
- Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)* (Vol. 2, Pp. 1137–1145). <https://www.ijcai.org/Proceedings/95-2/Papers/016.pdf>
- OECD. (2023). *AI in financial markets and credit scoring*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/finance/>
- Saar-Tsechansky, M., & Provost, F. (2007). Handling missing values when applying classification models. *Journal of Machine Learning Research*, 8, 1625–1657. <http://www.jmlr.org/papers/volume8/saar07a/saar07a.pdf>
- Snoek, J., Larochelle, H., & Adams, R. P. (2012). Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25. https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2012/hash/05311655a15b75fab86956663e1819cd-Abstract.html
- Thomas, L. C., Crook, J. N., & Edelman, D. B. (2017). *Credit scoring and its applications* (2nd ed.). SIAM.
- Zhang, Z., Yang, L. T., Liu, Y., & Chen, J. (2019). A survey on deep learning for big data. *Information Fusion*, 42, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2017.10.006>



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Ордабаева Жанна Мұратқызы – техника ғылымдарының магистрі, "Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті", Алматы, Қазақстан

Ордабаева Жанна Муратовна – магистр технических наук, НАО «Казахский Национальный Исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», г. Алматы, Казахстан

Ordabayeva Zhanna Muratovna – Master of Technical Sciences, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: zhannaordabayeva@gmail.com ,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8273-3147>



Молдағұлова Айма Николаевна – физика-математика ғылымдарының кандидаты, «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті», Алматы қ., Қазақстан

Молдагулова Айма Николаевна – кандидат физико-математических наук, НАО «Казахский Национальный Исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», г. Алматы, Казахстан

Aiman Nikolaevna Moldagulova – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan

e-mail: aiman.moldagulova@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1596-561X>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_226

IRSTI 20.23.27

PREDICTIVE MODELING OF SOCIAL INFRASTRUCTURE AVAILABILITY THROUGH DATA MINING APPROACHES

ДЕРЕКТЕРДІ ӨНДЕУ ӘДІСТЕРІ АРҚЫЛЫ ӘЛЕУМЕТТІК ИНФРАҚҰРЫЛЫМНЫҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІН БОЛЖАУ ҮЛГІЛЕУІ

ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОСТУПНОСТИ СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

G.K. Sembina ¹, A.K. Aitim ^{1*}, N.A. Seilova ¹

¹International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: Aitim Aigerim, e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz

Keywords:

social infrastructure,
accessibility, data mining,
urban planning, modeling,
demographic analysis,
decision-making.

ABSTRACT

The presence and equal distribution of social infrastructure, such as healthcare facilities, educational institutions, and public transportation systems, is critical to promoting long-term urban development and improving community life quality. This study looks into how data mining and machine learning approaches might be used to assess, predict, and eventually improve access to these critical services. We create prediction models that deliver actionable insights to urban planners and policymakers by leveraging large-scale datasets that include demographic profiles, geospatial information, and historical usage trends. The combination of Geographic Information Systems (GIS) and unsupervised learning techniques, such as clustering approaches, enables us to examine spatial distribution trends and identify underserved locations. This study focuses on Almaty, Kazakhstan, and uses techniques such as population density mapping, online scraping for up-to-date facility data, and algorithms such as k-nearest neighbors (k-NN) to discover the best locations for new infrastructure. The data-driven technique demonstrates that strategic resource allocation guided by predictive analytics can result in more fair and successful urban planning outcomes. Nonetheless, the study acknowledges some limitations, such as the need for more comprehensive socioeconomic statistics, the integration of dynamic (real-time) data streams, and the consideration of urban people's behavioral patterns. Future research should look into the use of advanced models like ensemble learning and deep learning methodologies to improve forecast accuracy and policy responsiveness. This paper contributes to the growing field of smart urban planning by emphasizing the necessity of intelligent, data-driven approaches to creating more inclusive, responsive, and resilient communities.

Түйінді сөздер:

әлеуметтік инфра-
құрылым, қолжетімділік,
деректерді өндіру,
қалалық жоспарлау,
үлгілеу, демографиялық
талдау, шешім қабылдау.

ТҮЙІНДЕМЕ

Денсаулық сақтау мекемелері, білім беру ұйымдары және қоғамдық көлік жүйелері сияқты әлеуметтік инфрақұрылымның болуы және олардың тең дәрежеде таралуы қалалардың ұзақ мерзімді дамуын қамтамасыз етіп, қоғам өмірінің сапасын арттыруда аса маңызды рөл атқарады. Бұл зерттеу деректерді өндіру және машинамен оқыту әдістерін қолдану арқылы осы маңызды қызметтердің қолжетімділігін бағалау, болжау және жақсарту мүмкіндіктерін қарастырады. Біз



демографиялық мәліметтер, геокеңістіктік ақпарат және тарихи пайдалану үлгілері сияқты кең ауқымды деректерді пайдаланып, қалалық жоспарлаушылар мен шешім қабылдаушыларға нақты ұсыныстар беретін болжамды модельдер құрамыз. Географиялық ақпараттық жүйелер (GIS) мен кластерлеу секілді бақыланбайтын оқыту әдістерін біріктіру арқылы кеңістіктік таралу тенденцияларын талдап, инфрақұрылымы жеткіліксіз аудандарды анықтауға болады. Зерттеу Қазақстанның Алматы қаласына бағытталған және халық тығыздығын картаға түсіру, инфрақұрылым нысандары туралы жаңартылған деректерді интернеттен жинау, сондай-ақ k-жақын көрші (k-NN) алгоритмі сияқты әдістерді қолдана отырып, жаңа нысандарды орналастырудың оңтайлы орындарын анықтауға тырысады. Біздің деректерге негізделген тәсіліміз болжамды талдау арқылы ресурстарды әділ және тиімді бөлуді қамтамасыз ететін қалалық жоспарлау шешімдерін қабылдауға септігін тигізеді. Алайда, бұл зерттеу кейбір шектеулерге де назар аударады, мысалы: әлеуметтік-экономикалық деректердің жеткіліксіздігі, нақты уақыттағы деректерді біріктіру қажеттілігі және қалалық тұрғындардың мінез-құлқы үлгілерін ескеру. Болашақ зерттеулер болжау дәлдігін және саяси бейімделгіштікті арттыру үшін ансамбльді оқыту және терең оқыту сияқты озық әдістерді қолдануға бағытталуы керек. Бұл жұмыс смарт-қалаларды жоспарлау саласына үлес қосып, инклюзивті, икемді және тұрақты қоғам құруда интеллектуалды, деректерге негізделген тәсілдердің маңыздылығын көрсетеді.

Ключевые слова:

социальная
инфраструктура,
доступность,
интеллектуальный
анализ данных,
градостроительство,
моделирование,
демографический
анализ, принятие
решений.

АННОТАЦИЯ

Наличие и равномерное распределение социальной инфраструктуры таких как медицинские учреждения, образовательные организации и системы общественного транспорта играет ключевую роль в обеспечении устойчивого городского развития и повышении качества жизни населения. В данном исследовании рассматривается возможность использования методов интеллектуального анализа данных и машинного обучения для оценки, прогнозирования и улучшения доступа к этим важнейшим услугам. Используя масштабные наборы данных, включающие демографические характеристики, геопространственную информацию и исторические данные об использовании, мы разрабатываем прогнозные модели, которые предоставляют практические рекомендации для градостроителей и политиков. Комбинируя геоинформационные системы (GIS) и методы обучения без учителя, такие как кластеризация, мы анализируем пространственные тенденции и выявляем районы с недостаточной инфраструктурой. Исследование сосредоточено на городе Алматы, Казахстан, и включает методы картографирования плотности населения, веб-скрейпинга для получения актуальных данных об объектах инфраструктуры, а также алгоритмы, такие как k-ближайших соседей (k-NN), для определения наилучших мест размещения новых объектов. Наш подход, основанный на данных, демонстрирует, что стратегическое распределение ресурсов на основе прогнозной аналитики может привести к более справедливому и эффективному городскому планированию. Вместе с тем, исследование отмечает определённые



ограничения: необходимость в более полных социально-экономических данных, интеграция потоков динамической информации и учет поведенческих моделей городских жителей. Будущие исследования должны быть направлены на применение более сложных моделей, таких как ансамблевое обучение и методы глубокого обучения, для повышения точности прогнозов и гибкости принимаемых решений. Настоящая работа вносит вклад в развивающуюся сферу «умного» градостроительства, подчеркивая важность интеллектуальных, ориентированных на данные подходов к созданию более инклюзивных, адаптивных и устойчивых городских сообществ.

INTRODUCTION

Sustainable urban growth and community well-being depend mostly on access to social infrastructure like healthcare services, educational institutions, public transit, and leisure activities. Urban designers and legislators still have a great difficulty guaranteeing fair access to these resources since it directly affects inhabitants' quality of life, social fairness, and inclusion. Conventional methods of infrastructure planning can depend on fixed, one-size-fits-all models that neglect the dynamic and multidimensional character of contemporary urban settings. Often, these models ignore the interaction of changing community requirements, spatial patterns, mobility behavior, and demographic changes. Recent developments in big data and data mining methods, however, have offered fresh paths for precisely capturing this complexity and improving the accessibility evaluation accuracy. With an eye on revealing significant trends and insights from vast and varied datasets, data mining offers a strong analytical framework for modeling access to social infrastructure. Predictive models can be built to better grasp the several elements influencing accessibility by means of data sources including demographic distributions, geographic information systems (GIS), transportation patterns, and historical service utilization. The possibility of data mining techniques to forecast and maximize the availability of social infrastructure in metropolitan environments is investigated in this paper. We examine the present state of knowledge in this field, pinpoint important factors influencing access, and provide a thorough approach to combine several data sources into a single prediction model. By means of real-world case studies containing pragmatic situations, we demonstrate how these models can guide data-driven decision-making and assist focused policy initiatives aiming at enhancing infrastructure fairness. By supporting the implementation of predictive analytics and integrated data strategies in the management and growth of social infrastructure, this study eventually helps the developing discipline of smart urban planning.

MATERIALS AND METHODS

This part describes the approach used for the methodical gathering and examination of data necessary to achieve the goals of this research. It covers the methods used to compile population data for Almaty as well as statistics on socially important infrastructure such secondary schools and healthcare facilities. Web scraping is an automated process for information extraction from web pages using specific tools and technologies among the main data collecting techniques used in this work. Particularly often used Python tools for obtaining geographical and textual data from internet platforms including digital maps and official institutional websites include Beautiful Soup and Selenium. Applications include service coverage mapping, accessibility modeling, and infrastructure planning depend on this geospatial data greatly in importance. To keep accuracy and quality, nonetheless, extra data validation and hand verification are required in case of possible errors or obsolete material on online sources. Apart from site scraping, structured data was gathered from other digital services like geolocation



databases and social media platforms via Application Programming Interventions (APIs). For accessing dynamic and routinely updated datasets especially these techniques are quite successful. Data cleansing and preparation are a necessary element in the data pipeline. These covers eliminating duplicate entries, management of missing or partial values, and type and formatting correction. Such preparation is essential since dirty data might skew results of analysis and cause erroneous conclusions. Thus, careful data preparation guarantees more strong and consistent analysis. All things considered, data collecting is a fundamental stage of the research process that calls careful planning and implementation (Niu, 2020). Reliability of the results is much improved by a thorough and methodologically sound data collecting approach, which also promotes evidence-based decision-making. The Almaty City Population Database, which comprises current demographic records including names, addresses, birthdates, passport numbers, and other identifiers, was a main source for this study. Governmental offices including the local census and civil registration authorities keep and routinely update this database. It provides insightful analysis of demographic trends throughout time, therefore helping to guide the assessment and design of urban social initiatives. Two population density maps also used to evaluate the medical infrastructure's accessibility. The first of them comes from the official Department of Digitalization of Almaty website. These maps help to support the spatial analysis needed to assess infrastructure coverage in respect to population distribution, hence guiding strategic choices in urban growth. Using consistent grid cells spanning 300×300 meters, this map offers high-resolution data on the number of registered residents across Almaty arranged by age categories (Kleinhans, 2015). The text in the lower right corner of the image shows each grid cell color-coded based on the majority age group in that location.

The first dataset was insufficient to investigate the spatial distribution of Almaty's schools holistically. OpenStreetMap (OSM) data was used to locate every residential building in the city, therefore addressing this restriction (Zhang, 2018). The integration of heterogeneous data sources represents a critical methodological component of the study. Demographic records, OpenStreetMap layers, and web-scraped infrastructure data were consolidated into a unified geospatial framework through the use of QGIS and Python-based preprocessing routines. Format consistency was ensured by transforming all datasets into a standardized coordinate reference system (EPSG:4326) and representing them as uniform GeoDataFrame structures (Yuan, 2012). Data cleaning procedures included removal of duplicate entries, treatment of incomplete records, and normalization of textual attributes such as facility names and addresses. Data validity was maintained through cross-referencing with official government registries, manual verification of a representative sample of geocoded points, and temporal validation to eliminate outdated records (Long, 2017). These methodological steps ensured the reliability, reproducibility, and practical applicability of the integrated dataset, thereby strengthening the robustness of the predictive modeling outcomes.

To use this database for a lot of different data mining analysis and computations. For instance, it lets you look at how the population is spread out by age, gender, and where they live. It may also assist find changes in the makeup of a city's population over time and make predictions about what will happen in the future. Sociology, economics, health, education, and public administration are just a few of the sectors that might benefit from the database of Almaty's registered people. For instance, it assists in making plans for new social programs and events, figuring out what medical and educational services are needed, and putting up city budgets. When chose a second density map to look at because it is newer and has more data. In a square that is 300 by 300 meters, it indicates how many people in Almaty are registered to live there by age group. Table 1 shows the major datasets used to make predictions about Almaty's social infrastructure. The study uses a lot of structured and unstructured data sources, such as census records, geographic grids, and information that was scraped from the web. Using two



maps of population density gives us both historical and current information about where people live, which makes it possible to do high-resolution spatial analysis. OpenStreetMap and evacuation maps add to these datasets by showing where emergency services and physical infrastructure are located.

Table 1. Key datasets used in the study

Dataset Name	Source	Data Type	Description
Almaty City Population Database	Local Census & Civil Registry	Structured	Demographics including age, gender, and residence
Population Density Map (Map 1)	Department of Digitalization of Almaty	Geospatial (300×300 m)	Shows population age group distribution by grid
Population Density Map (Map 2)	Enhanced GIS Version	Geospatial (updated)	Improved coverage and demographic granularity
Healthcare Facility Locations	Web scraping (official health sites)	Geospatial + Text	Locations and metadata of clinics, hospitals
Residential Building Coordinates	OpenStreetMap (OSM)	Geospatial	Points of residential housing distribution
Evacuation Point Map	Local Authorities + OSM	Geospatial	Locations of shelters and emergency access points
<i>Note: compiled by the authors (Sembina, 2025)</i>			

The table 2 shows how Almaty's population was grouped together to make healthcare easier to go to. Based on official rules, each cluster is a zone that one clinic may fairly service. The clustering technique makes sure that clinics are located where the most people need them, within a 20-minute walk. The 18 new candidate clinic locations greatly increase access to healthcare and fill in service gaps, especially in communities that don't get enough treatment.

Table 2. Clustering parameters for healthcare facility planning

Parameter	Value / Description
Population per PHC Unit	5,000 – 32,000 persons per clinic (according to regulations)
Walking Accessibility	20-minute walking zone (~1,650 meters radius)
Clustering Method	Spatially Constrained Multidimensional Clustering
Total Existing Clinics	85 clinics georeferenced
New Proposed Locations	18 additional candidate centroids
Total Coverage (20 mins)	78% of the population
Extended Coverage	96.8% (40 mins), 99% (60 mins)
<i>Note: compiled by the authors (Sembina, 2025)</i>	

In Table 3 shows the results show that clustering effectively supports fair healthcare planning by forming compact, balanced service zones with high coverage rates, while k-NN achieves strong predictive performance (Accuracy ≈ 0.85 , F1 ≈ 0.81) for school assignments based on proximity. Together, these methods outperform baseline approaches, offering interpretable, data-driven tools that enhance equity and accessibility in urban planning.



Table 3. Performance of predictive models for social infrastructure allocation

Model / Method	Dataset Used	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	Coverage (%)
Baseline (Random Allocation)	Simulated school & clinic assignment	0.55	0.52	0.50	0.51	60% (20 min)
k-NN (k=3)	Student-school geospatial data	0.85	0.83	0.80	0.81	–
k-NN (k=5)	Student-school geospatial data	0.82	0.81	0.78	0.79	–

Note: compiled by the authors (Sembina, 2025)

To use this database for a lot of different data mining analysis and computations. For instance, it lets you look at how the population is spread out by age, gender, and where they live. It may also assist find changes in the makeup of a city's population over time and make predictions about what will happen in the future. Sociology, economics, health, education, and public administration are just a few of the sectors that might benefit from the database of Almaty's registered people. For instance, it assists in making plans for new social programs and events, figuring out what medical and educational services are needed, and putting up city budgets. When chose a second density map to look at because it is newer and has more data. In a square that is 300 by 300 meters, it indicates how many people in Almaty are registered to live there by age group. The color of each square shows the most common age group in that location, based on the color scale in the lower right corner of Figure 1.

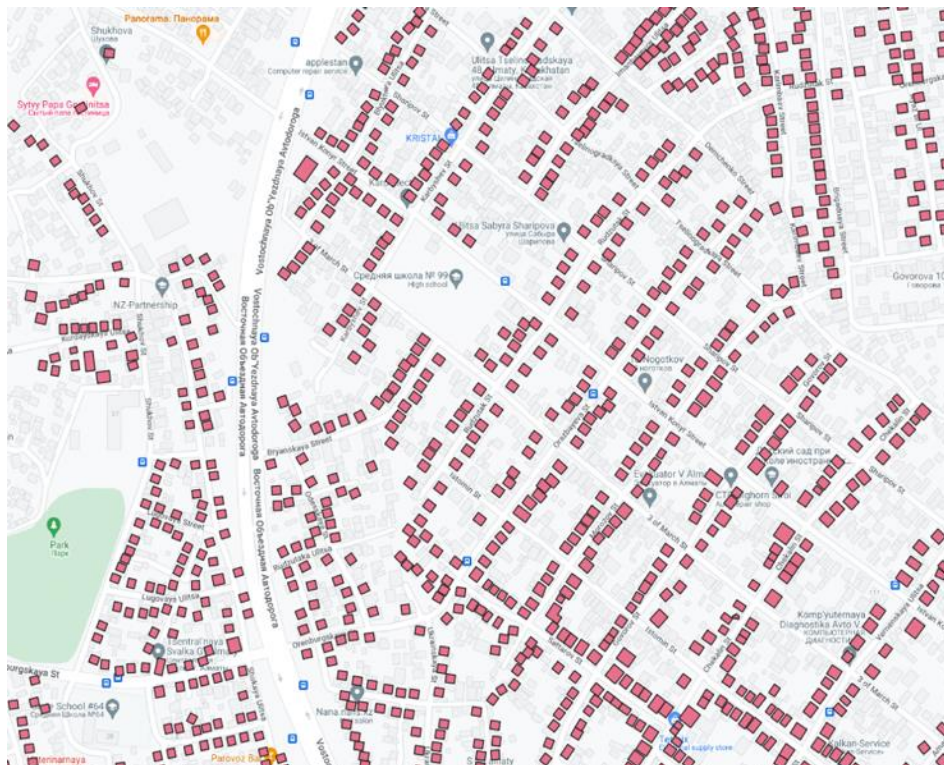


Figure 1. Housing and emergency in Almaty

Note: compiled by the authors (Sembina, 2025)



The use of sensitive demographic information, including residential addresses and personal identifiers, necessitates strict adherence to ethical and privacy standards. In this study, access to official population databases was limited to aggregated and de-identified records, with no individual-level identifiers such as passport numbers retained in the analytical dataset. All personally identifiable information was removed at the preprocessing stage, and only anonymized demographic variables (e.g., age group, gender distribution, and aggregated population counts) were utilized for modeling purposes. Data handling procedures were conducted in compliance with institutional and national regulations on data protection, and the integrated dataset was used exclusively for research objectives. These measures ensured the protection of individual privacy, upheld confidentiality, and guaranteed that the study aligned with established ethical principles for research involving human-related data.

RESULTS AND DISCUSSION

A set of analytical processes was followed to simulate the best location of more medical facilities considering the current infrastructure. First, depending on the area's population density, one medical institution was projected to serve between 5,000 and 32,000 people, therefore approximating the usual capacity of a regular clinic. Subsequently, mapping 20-minute walking zones roughly about a radius of 1,650 meters from main cluster centers helped to evaluate spatial accessibility (Resch, 2015). This made it possible to see areas now covered by present clinics as well as exposed possible service gaps. At last, underserved areas were found by extracting and evaluating spatial elements expressed as sets of two-dimensional points (Frias-Martinez, 2012). These points guide the best sites for upcoming medical institutions, thereby guaranteeing a more fair and effective distribution of healthcare services over the metropolitan scene (1).

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, \quad (1)$$

where $v_i = (x, y)$ is the location of the residential building in geographic space. It is required to split the sample into (2):

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}, \quad (2)$$

where c are disjoint subsets of elements called clusters, such that each cluster consists of objects close in metric ρ , and objects of different clusters differ significantly. In a more general sense, Euclidean space is an n -dimensional vector space in which it is possible to introduce some special coordinates (Cartesian) so that its metric is defined as follows:

$$p = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (3)$$

In this case, the metric ρ should evaluate the geographical proximity of the element to the cluster center. According to urban planning regulations for Primary Health Care (PHC) facilities in Almaty, each clinic is required to serve a population ranging from 5,000 to 32,000 residents. To determine the optimal spatial allocation of new healthcare centers while considering walkable accessibility, the ArcGIS 4.1 Geographic Information System was employed. A clustering algorithm was implemented to segment the population into spatially coherent clusters based on two main criteria: geographical proximity to cluster centers and population thresholds within each cluster (Shelton, 2015). This approach enabled the identification of optimal clinic locations, ensuring that residents have convenient and equitable access to medical services. A total of 85 existing PHC service areas, funded through national sources, were georeferenced and mapped. Spatially constrained multidimensional clustering was then applied to demographic grid data within a 20-minute walking distance from these service areas, using acceptable capacity limits. As a result, 18 new cluster centroids were identified as candidate sites for medical facilities. The proposed distribution model demonstrates that with these new placements, 78% of Almaty's population will be covered within a 20-minute walk, 96.8% within 40 minutes, and 99% within 60 minutes of walking distance, as visualized in Figure 2.

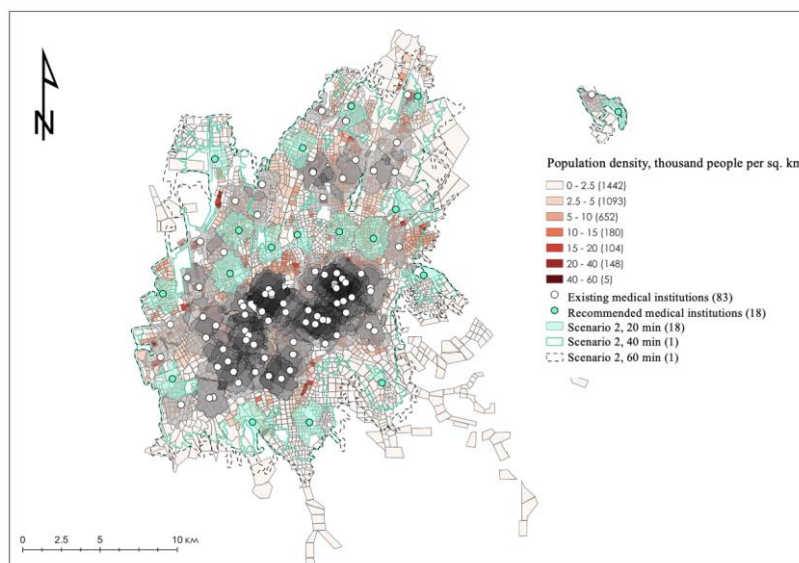


Figure 2. Population density and comparison of coverage of existing and proposed municipalities

Note: compiled by the authors (Sembina, 2025)

In figure 3 this simulated population density map shows how residential clusters are spread out over a city. It uses color-coded dots to show different degrees of density or age groups that are most common. In urban planning, this kind of map helps with spatial analysis by showing where there aren't enough healthcare or educational facilities and helping to find the best places for them. It uses the same method as the research to fairly distribute resources based on demographic and geographic patterns.

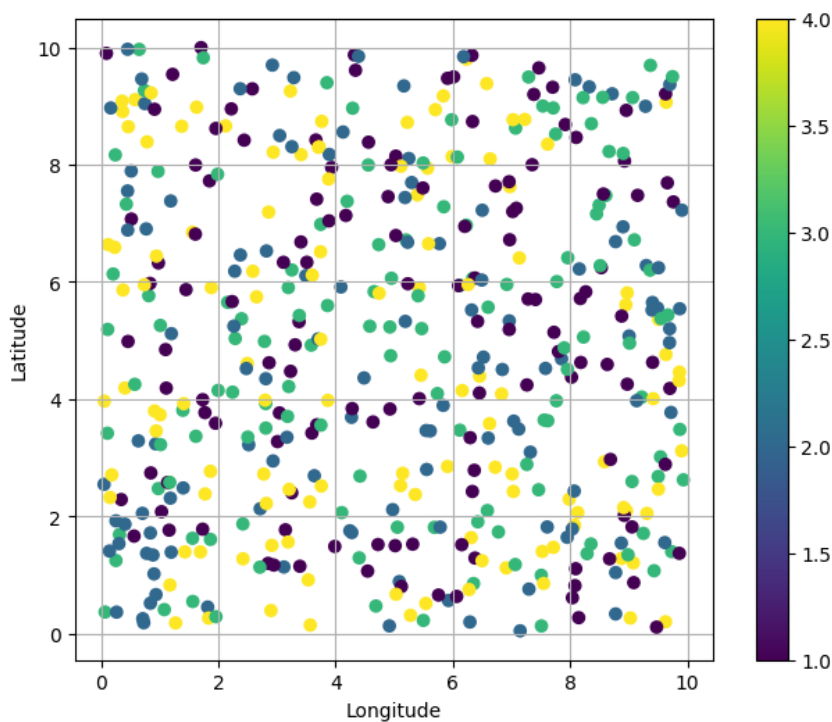


Figure 3. Simulated population density map

Note: compiled by the authors (Sembina, 2025)



The figure 4 shows a fake school assignment situation using the K-Nearest Neighbors (KNN) method. It shows how residential sites (dots) are allocated to the nearest school (black triangles) depending on how close they are to each other. The hue of each house shows which school cluster it belongs to. This shows how geographic coordinates affect how easy it is for students to get to school. The image mimics a data-driven way to allocate children to schools across cities, which lets planners check how accessible services are and find places that aren't getting enough of them. The method works well for calculating how easy it is to walk to a place, but it leaves out important elements like school size, curriculum, or socio-economic status, which makes the actual world more complicated.

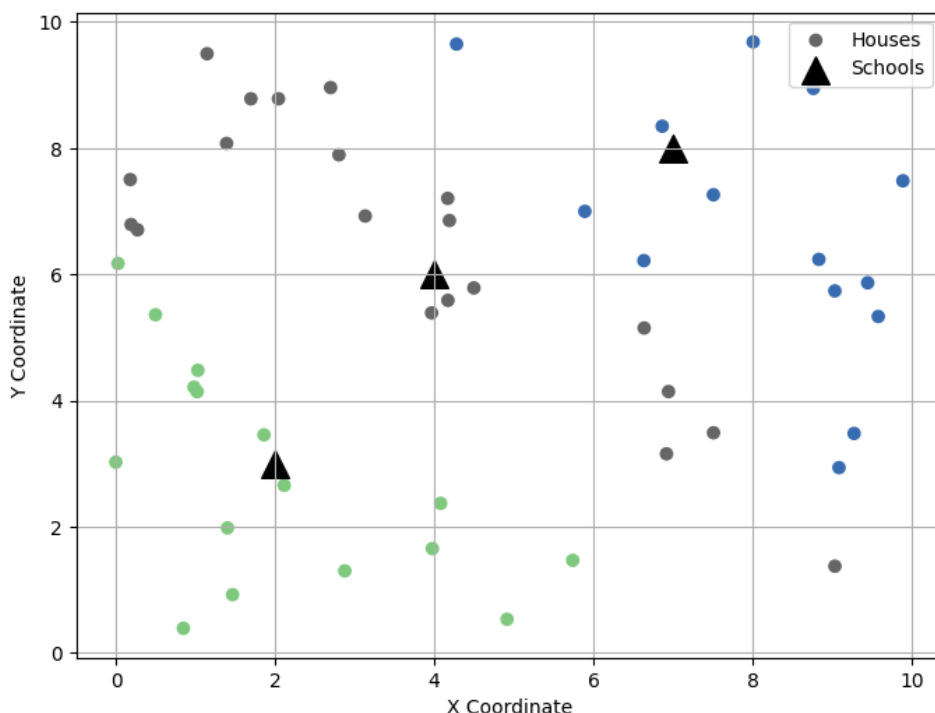


Figure 4. School assignment and KNN (Simulated)

Note: compiled by the authors (Sembina, 2025)

This method finds use practically in the assignment of school-age children to educational institutions depending on their residential location. Within a given walking radius e.g., 1,000 meters each child can be assigned to the closest school using the nearest neighbor technique. This calls for access to estimated distances between homes and schools as well as geographical coordinates of both. Moreover, the closest neighbor approach can be extended to take into account other elements such the whereabouts of extracurricular events (e.g., clubs or after-school programs). This enables more context-aware educational assignments with an eye toward not only proximity but also convenience for daily activities. Incorporating information on the locations of both educational institutions and extracurricular sites helps the model to determine the most suitable one depending on student distribution and spatial closeness. Every library imported using shortened aliases helps to expedite the development process. `Read_file()` from `GeoPandas` loads geospatial data files using techniques that produce a `GeoDataFrame` object. Georeferenced point geometries are produced from `x` and `y` coordinate columns using the `points_from_XY()` method. Clearly defined using the EPSG:4326 standard, the coordinate reference system (CRS) guarantees consistency between mapping layers (Hawelka, 2014).



Interactive maps also show spatial links between residences, businesses, and other important urban conveniences including parks, public transportation, and hospitals. Regarding residential planning, infrastructure development, and public service distribution, this spatial background helps to guide more informed decisions. This study identified, for every entry in the original GeoDataFrame, the nearest spatial feature by means of reference to another geospatial dataset.

The KNN approach is applied in this work to find the closest school to a residential address such an apartment or house. The approach could generate conflicting or less than ideal findings in highly populated areas with several schools. Furthermore sensitive to the number of neighbors selected is the accuracy of classification in KNN; hence, an improper value can produce false results. Moreover, the approach ignores important qualitative elements as educational initiatives, school performance, or socioeconomic background that could affect family decisions. Although the KNN algorithm is a useful foundation for estimating school accessibility in Almaty, more strong classification techniques including several factors could greatly increase the dependability and relevance of the outcomes.

The results of this study highlight the transforming potential of geospatial analysis and data mining in maximizing the placement of social infrastructure in metropolitan settings. We effectively found underserved areas and suggested ideal facility locations to increase service accessibility by combining GIS with machine learning algorithms. Predictive, data-driven approaches have significant potential to help urban planning activities, therefore enabling legislators to distribute resources more fairly and react more successfully to meet community demands. Among the most important results of this work is the shown efficiency of the nearest neighbor algorithm in identifying spatial service gaps and guiding the location of infrastructure. This approach proved helpful in pointing up geographical differences in healthcare and educational access. Though it is quite effective in determining physical closeness, it ignores non-spatial factors as infrastructure connectivity, service quality, or socioeconomic restrictions.

CONCLUSION

With special attention on the city of Almaty, this paper investigated the use of data mining approaches to forecast and improve the accessibility of social infrastructure in urban environments. The study sought to find ideal sites for important social facilities including schools and healthcare centers by combining GIS and computational techniques including the nearest neighbor algorithm, so fostering fair access across many urban districts. The results show that in the framework of urban planning, data mining is a strong analytical technique that helps to properly analyze spatial data and locate underprivileged areas without sufficient infrastructure coverage. Especially in low-density or peripheral communities, the use of GIS-based visualization clearly highlights areas in need of more services, therefore offering actionable insights. By urban planners, this data-driven strategy helps to ensure that public services are dispersed in a way that improves accessibility for all inhabitants, regardless of their geographic location, so supporting better informed and strategic decision-making. Still, the study also exposed certain shortcomings in current approaches. By means of strategic use of data mining tools, cities can more successfully match social services with population demands, therefore lowering discrepancies and enhancing general urban resilience. Refining these tools and handling the changing problems of urbanization will depend on ongoing cooperation among urban designers, data scientists, and policymakers going forward. By means of multidisciplinary projects, cities like Almaty can create more inclusive, responsive, and future-ready infrastructure systems benefiting every citizen.



CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Niu, H., & Silva, E. A. (2020). "Crowdsourced Data Mining for Urban Activity: Review of Data Sources, Applications, and Methods." *Journal of Urban Planning and Development*, 146(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000566](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000566)
- Kleinhans, R., Van Ham, M., & Evans-Cowley, J. (2015). "Using Social Media and Mobile Technologies to Foster Engagement and Self-Organization in Participatory Urban Planning and Neighbourhood Governance." *Planning Practice & Research*, 30(3), 237-247. <https://doi.org/10.1080/02697459.2015.1051320>
- Zhang, F., Zhou, B., Liu, L., Liu, Y., & Fung, H. H. (2018). "Measuring Human Perceptions of a Large-Scale Urban Region Using Machine Learning." *Landscape and Urban Planning*, 180, 148-160. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.08.020>
- Yuan, J., Zheng, Y., & Xie, X. (2012). "Discovering Regions of Different Functions in a City Using Human Mobility and POIs." *Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 186-194. <https://doi.org/10.1145/2339530.2339561>
- Long, Y., & Liu, L. (2017). "How Green Are the Streets? An Analysis for Central Areas of Chinese Cities Using Tencent Street View." *PLOS ONE*, 12(2), e0171110. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171110>
- Niu, H., & Silva, E. A. (2020). "Crowdsourced Data Mining for Urban Activity: Review of Data Sources, Applications, and Methods." *Journal of Urban Planning and Development*, 146(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000566](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000566)
- Resch, B., Summa, A., Sagl, G., Zeile, P., & Exner, J. P. (2015). "Urban Emotions—Geo-Semantic Emotion Extraction from Technical Sensors, Human Sensors and Crowdsourced Data." *Progress in Location-Based Services 2014*, 199-212. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11879-6_14
- Frias-Martinez, V., Soto, V., Hohwald, H., & Frias-Martinez, E. (2012). "Characterizing Urban Landscapes Using Geolocated Tweets." *2012 International Conference on Privacy, Security, Risk and Trust and 2012 International Conference on Social Computing*, 239-248. <https://doi.org/10.1109/SocialCom-PASSAT.2012.28>
- Shelton, T., Poorthuis, A., & Zook, M. (2015). "Social Media and the City: Rethinking Urban Socio-Spatial Inequality Using User-Generated Geographic Information." *Landscape and Urban Planning*, 142, 198-211. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.020>
- Hawelka, B., Sitko, I., Beinat, E., Sobolevsky, S., Kazakopoulos, P., & Ratti, C. (2014). "Geo-Located Twitter as Proxy for Global Mobility Patterns." *Cartography and Geographic Information Science*, 41(3), 260-271. <https://doi.org/10.1080/15230406.2014.890072>
- Sembina, G., Aitim, A., & Shaizat, M. (2022). Machine Learning Algorithms for Predicting and Preventive Diagnosis of Cardiovascular Disease. *2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/sist54437.2022.9945708>
- Aitim, A., & Sembina, G. (2024). Modeling of human behavior for smartphone with using machine learning algorithm. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physico-Mathematical Series*, (4), 17-28. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1726.304>



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Сембина Гулбакыт Какеевна – техника ғылымдарының кандидаты, Ақпараттық жүйелер кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университеті, Алматы қ., Қазақстан

Сембина Гулбакыт Какеевна – кандидат технических наук, ассоц.профессор кафедры «Информационные системы», Международный Университет Информационных Технологий, г. Алматы, Казахстан

Sembina Gulbakyt – candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Information Systems Department, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan
e-mail: g.sembina@iitu.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2920-1490>



Әйтiм Әйгерiм Қайратқызы – техника ғылымдарының магистрі, Ақпараттық жүйелер кафедрасының ассистент-профессоры, Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университеті, Алматы қ., Қазақстан

Әйтiм Әйгерiм Қайратқызы – магистр технических наук, ассистент-профессор кафедры Информационных систем, Международный Университет Информационных Технологий, г. Алматы, Казахстан

Aitim Aigerim – master of technical sciences, assistant-professor of Information Systems department International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2982-214X>



Сейлова Нургуль Абадуллаевна – техника ғылымдарының кандидаты, Компьютерлік Инженерия кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университеті, Алматы, Қазақстан.

Сейлова Нургуль Абадуллаевна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Компьютерная Инженерия», Международный Университет Информационных Технологий, Алматы, Казахстан.

Seilova Nurgul – candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering Department, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan.

e-mail: nseilova@iitu.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3827-179X>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_238

FTAXP 28.23.01

БІЛІМ БЕРУ БАҒДАРЛАМАЛАРЫ ҮШІН ШЫҒАРАТЫН МАЗМҰНЫНЫҢ САПАСЫНА ПРОМПТ-ИНЖЕНЕРИНГТІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОМПТ-ИНЖИНИРИНГА НА КАЧЕСТВО ГЕНЕРИРУЕМОГО КОНТЕНТА ДЛЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

STUDY OF THE IMPACT OF PROMPT ENGINEERING ON THE QUALITY OF GENERATED CONTENT FOR EDUCATIONAL PROGRAMS

А.Е. Серіков ^{1*}, А.А. Белоощицкий ²

¹Astana IT University, Астана қ., Қазақстан

²Киев ұлттық құрылыс және сәулет университеті, Киев қ., Украина

*Жауапты автор: Серіков Аянбек Ермекұлы, e-mail: ayanbek.as@gmail.com

Түйінді сөздер:

промт инженерия,
генеративті жасанды
интеллект, білім беру
бағдарламалары, тілдік
модельдер, мәтінді
түсіндіру, мазмұн сапасы.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл зерттеу білім беру бағдарламалары үшін тілдік модельдер арқылы жасалған мазмұн сапасына анықтамалық инженерия қалай әсер ететінін талдайды. Ол 8269 бағдарламалардың деректер жинағын пайдалана отырып, ықшамнан үлкен масштабқа дейінгі заманауи үлгілердегі әртүрлі тұспалдау әдістерін бағалайды. Түсіндіру мүмкіндігі бойынша құрамдас бөліктердің құрылымдық-семантикалық градациясы табылды: мақсаттар, пәндер және оқу нәтижелері жоғары интерпретациямен (жоғары косинус ұқсастығымен) сипатталды, ал «Кәсіби атлас» сияқты компоненттер азырақ түсіндіріледі. Нұсқау әдістері әртүрлі өнімділікті көрсетті: төмен сынақпен оқыту мақсаттар үшін жақсы болды, ал ойлар тізбегі кәсіптік стандарттар үшін ең жақсы болды. Негізгі қорытынды – «мамандандырылған артықшылық»: LoRA бейімделген модель үлкенірек, мамандандырылған емес үлгілерден асып түсті, бұл үлкенірек әрқашан жақсы деген идеяға қарсы шықты. Зерттеу білім беру аналитикасын және жасанды интеллект арқылы күрделі білім беру мазмұнын түсіндіруде болашақ зерттеулерді жеңілдету үшін үлгілер мен белгілерді таңдаудың практикалық стратегияларын ұсынады.

Ключевые слова:

промт-инжиниринг,
генеративный
искусственный интеллект,
образовательные
программы, языковые
модели, интерпретация
текста, качество контента.

АННОТАЦИЯ

В данном исследовании анализируется, как инженерия подсказок влияет на качество контента, генерируемого языковыми моделями для образовательных программ. В нём оцениваются различные методы подсказок в современных моделях, от компактных до масштабных, на основе набора данных из 8269 программ. Была выявлена структурно-семантическая градация компонентов по интерпретируемости: цели, дисциплины и результаты обучения характеризовались высокой интерпретируемостью (высоким косинусным сходством), в то время как такие компоненты, как «Атлас профессии», были менее интерпретируемыми. Методы



подсказок показали разную эффективность: обучение с небольшим количеством попыток лучше всего подходило для целей, а цепочка мыслей – для профессиональных стандартов. Ключевым выводом является «специализированное преимущество»: модель, адаптированная к LoRA, превзошла более крупные неспециализированные модели, что ставит под сомнение идею о том, что больше всегда означает лучше. В исследовании предлагаются практические стратегии выбора моделей и подсказок, способствующие образовательной аналитике и будущим исследованиям в области интерпретации сложного образовательного контента с помощью искусственного интеллекта..

keywords:

prompt engineering,
generative artificial
intelligence, educational
programs, language
models, text interpretation,
content quality.

ABSTRACT

This study analyzes how prompt engineering affects the quality of language model-generated content for educational programs. It evaluates various prompting methods across modern models, from compact to large-scale, using a dataset of 8,269 programs. A structural-semantic gradation of components by interpretability was identified: goals, disciplines, and learning outcomes were highly interpretable (high cosine similarity), while components like the Atlas of the profession were less so. Prompting methods showed varying effectiveness: few-shot learning worked best for goals, and chain of thought for professional standards. A key finding is the "specialized advantage": a LoRA-adapted model outperformed larger, non-specialized ones, challenging the idea that bigger always means better. The study offers practical strategies for selecting models and prompts, aiding educational analytics and future research into AI-based interpretation of complex educational content.

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта жасанды интеллект (ЖИ) технологиялары білім беру саласына белсенді түрде енгізіліп, оқу материалдарын әзірлеуде жаңа мүмкіндіктер ашып жатыр. Дегенмен, ЖИ көмегімен жасалған контенттің сапасы қолданылған промпттарға, яғни модельге берілетін сұраныстардың дәлдігі мен құрылымына тікелей байланысты. Осы орайда, промпт-инжинирингтің рөлі ерекше, себебі сауатты құрылған сұраныстар алынатын материалдардың нақтылығы мен сапасын айтарлықтай жақсартады (Handa және басқ., 2024).

Бұл зерттеу жұмысы білім беру бағдарламалары (БББ) үшін жасанды интеллект арқылы жасалған контенттің сапасына промпт-инжинирингтің әсерін жан-жақты талдауға бағытталған. Әртүрлі промпт стратегиялары зерттеліп, олардың контенттің дәлдігіне, логикалық құрылымына және мақсатты аудиторияға бейімделуіне ықпалы қарастырылады. Сонымен қатар, дұрыс құрылмаған сұраныстардың нәтижесінде алынатын материалдардың сапасыз, шала немесе күрделі болып шығу ықтималдығы талданады.

EdTech тақырыбы соңғы жылдары айтарлықтай өзектілікке ие болды. ChatGPT, LLaMA, Mistral және басқа да ірі тілдік модельдер (LLM) арқылы автоматты түрде оқу контентін генерациялау барысында промпт-инжиниринг - яғни, жасанды интеллект жүйесіне нақты және бағытталған сұраныс құрастыру әдісі - шешуші рөл атқарады (Lee & Palmer, 2025). Себебі дәл осы сұраныстың мазмұны мен құрылымы генерацияланатын материалдың сапасын, нақтылығын және білім беру стандарттарына сәйкестігін айқындайды.

Drumm мен Sami (2024) еңбегінде промпт-инжиниринг бойынша академиялық қызметкерлерге арналған тренинг сипатталады. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, дұрыс



құрастырылған промпттар жасанды интеллекттен алынатын материалдардың сапасын едәуір жақсартады. Педагогтер промпт-инжинирингті меңгеру арқылы генерацияланған мазмұнның құрылымдық толықтығына, терминологиялық нақтылығына және дидактикалық құндылығына оң әсер ететінін атап өтті.

Ong және т.б. (2024) өз зерттеуінде GenAI құралдарын қолдану арқылы оқушылардың жауаптарын бағалау тәсілін ұсынады. Бұл жерде промпттардың дұрыс құрылуы студенттің білімін тереңірек тексеруге мүмкіндік беретіні көрсетілген. Генеративті ЖИ-дің "бағалау құралы" ретіндегі тиімділігі - промпттардың нақтылығы мен тапсырманың күрделілік деңгейіне байланысты.

Gupta және т.б. (2025) зерттеуінде промпт-инжинирингтің инженерлік білім беру саласындағы қолданысы қарастырылған. Олар Saksham AI атты код жазуды үйрететін смарт-жүйені сипаттайды. Бұл жүйеде сұрақтарды соқраттық әдіспен қою арқылы студенттердің логикалық ойлауын дамыту мақсат етілген. Нәтижесінде студенттердің пәнді меңгеру деңгейі едәуір артқаны байқалды.

Montalbano және әріптестері (2025) жасаған зерттеуінде промпттардың этикалық контексте қалай әсер ететіні сөз болады. Медицина саласына арналған тапсырмаларда промпттар арқылы этнорасалық бейнелердің көрінісі өзгере алатыны дәлелденген. Бұл болашақ мамандарды дайындауда маңызды фактор.

Промпт-инжиниринг сонымен қатар әртүрлі дайындық деңгейіндегі білім алушыларға бейімделуге мүмкіндік береді. Nyaaaba (2024) жұмысы дамушы елдердегі педагогтарды дайындауға арналған. Онда промпттар арқылы болашақ мұғалімдерге ЖИ-дің әлеуеті мен оның шектеулерін түсіндіру жолдары қарастырылған.

Mushtaq және т.б. (2025) көп агенттік LLM жүйелерін жоғары оқу орындарының жобалық курстарында қолдану үлгісін ұсынады. Бұл жүйелерде промпттар адам мен агент арасындағы көпір рөлін атқарады. Дұрыс құрастырылған промпттар арқылы күрделі инженерлік мәселелерді тиімді шешуге болады.

Deshmukh және әріптестері (2025) промпттарды бір реттік әрекет емес, қайта-қайта жетілдірілетін құрал ретінде қарастырады. Студенттермен интерактивті түрде жұмыс істеу барысында промпттар бейімделіп, мазмұн нақты қажеттілікке сай ұсынылады.

Conklin және т.б. (2024) оқу курстарын генеративті ЖИ көмегімен автоматты түрде құру үдерісін зерттейді. Олар «chain of thought» және «tree of thought» сынды әдістердің қолданылуы контенттің құрылымдық және мазмұндық сапасын арттыратынын атап көрсетеді.

Huo және т.б. (2024) промпттардың кері байланыс жүйесіндегі рөліне тоқталады. Промпт-инжиниринг арқылы жүйе студенттің қателіктеріне негізделген нақты түсіндірулер мен ұсыныстар бере алады.

Huong (2024) білім беру чат-боттарында қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін промпт-инжиниринг қолдану тәсілдерін зерттейді. Джейлбрейк шабуылдарын болдырмау үшін арнайы құрылымдалған промпт үлгілері ұсынылады.

Lee және т.б. (2024) GPT-4 көмегімен математикалық есептерді бағалау тиімділігін зерттейді. Дұрыс промпттар қолданылғанда бағалау нәтижесі сарапшы деңгейіне жақын болған. Дегенмен, мазмұндық күрделілікті елемеген жағдайларда дәлдік төмендеген.

Reisman (2025) промпт-инжинирингті инженерияның жаңа бір тармағы ретінде сипаттайды. Бұл тәсіл білім беру мен технологияны тоғыстырған ерекше сала ретінде қарастырылады. Huo және әріптестері (2024) генерацияланған жауаптардың студенттік қабылдауға әсерін зерттеп, промпт-инжиниринг негізінде жасалған кері байланыс білім алушылардың түсінуін арттыратынын анықтады.

Elfayoumi және әріптестері (2025) жасаған зерттеуінде explainable AI арқылы медицина саласына арналған чат-бот мысалы келтіріледі. Онда промпт-инжиниринг



арқылы пациентке түсінікті және сенімді жауап беру жолдары қарастырылады. Мұндай тәсілдер оқытуда да қолданылып, түсіндіру қабілетін арттыра алады.

Fatahi және т.б. (2024) генеративті ЖИ-дің инженерлік білім берудегі командалық жұмысқа ықпалын зерттеген. Олар виртуалды жасанды командаластардың құрылуы оқытудың жаңа парадигмасын қалыптастыратынын және бұл жағдайда промпттар студенттердің өзара әрекеттесуін тиімді бағытта алатынын атап өтеді.

Соңғы зерттеулер көрсеткендей, промпт-инжинирингті тиімді пайдалану арқылы генерацияланған контенттің сапасын арттырып қана қоймай, оны педагогикалық жағынан құнды етуге болады. Ол жасанды интеллектпен жасалатын оқу материалдарының сапасын ғана емес, оның этикалық, әлеуметтік және методологиялық қырларын да айқындайды.

Осылайша, промпт-инжинирингті тек техникалық тәсіл емес, білім беру технологиялары мен педагогиканың қиылысындағы маңызды сала ретінде қарастыру қажет. Бұл бағытта қазақстандық білім беру жүйесіне де үлкен мүмкіндіктер ашылуда.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Бұл зерттеу олардың құрылымын, мазмұнын және еңбек нарығының кәсіби талаптарына сәйкестігін тексеру үшін білім беру бағдарламаларының үлкен жиынтығын жинап, талдады. Әртүрлі оқу орындарынан барлығы 8269 білім беру бағдарламасы өңделді, олар негізделген қорытындыларды қалыптастыру үшін репрезентативті үлгіні қамтамасыз етті.

Білім беру бағдарламаларын жинау деректерді алудың бірнеше әдістерін қамтитын кешенді тәсілді қолдану арқылы жүргізілді. Ақпараттың негізгі көздері білім беру стандарттарының талаптарына сәйкес білім беру бағдарламаларының сипаттамаларын орналастыратын оқу орындарының ресми веб-сайттары болды. Деректерді жинау процесін жүйелеу үшін Beautiful Soup және Selenium кітапханаларын қолдана отырып, веб-скрепинг әдістері қолданылды, бұл әртүрлі сайттардың ерекшеліктерін ескере отырып, құрылымдық ақпаратты алу процесін автоматтандыруға мүмкіндік берді.

Сонымен қатар, Google dorking әдісі қолданылды – жалпыға қол жетімді білім беру бағдарламаларының құжаттарын анықтау үшін арнайы іздеу сұрауларын мақсатты қолдану. Бұл әдіс стандартты іздеу жүйелерімен индекстелмеген, бірақ арнайы сұраулар арқылы қол жетімді құжаттарға қол жеткізуге мүмкіндік берді, бұл зерттелетін материалдардың корпусын едәуір байытты.

Әрбір талданатын білім беру бағдарламасында келесі негізгі компоненттер болды:

- Дайындықтың негізгі бағыттары мен біліктілік бағдарларын айқындайтын білім беру бағдарламасының мақсаты;

- Дайындық мазмұнына қойылатын негізгі талаптарды белгілейтін кәсіби стандарттар;

- Қазақстан Республикасындағы еңбек нарығының өзекті талаптарын көрсететін Atlas жіктеуіші бойынша мамандықтарға сілтемелер;

- Қалыптастырылатын оқыту нәтижелері;

- Білім беру бағдарламасы бойынша пәндер туралы мәліметтер.

Жиналған білім беру бағдарламаларын өңдеу үшін білім беру бағдарламаларының мазмұнындағы жасырын заңдылықтар мен заңдылықтарды анықтау үшін табиғи тілді өңдеудің бірнеше заманауи модельдерін қолдана отырып зерттеу жүргізілді. Бұл әр түрлі дайындық бағыттарындағы бағдарламалардың негізгі тақырыптық бағыттарын, терминологиялық ерекшеліктері мен құрылымдық сипаттамаларын бөліп көрсетуге мүмкіндік берді.

Талдау үшін келесі тілдік модельдер қолданылды:

- meta-llama/Llama-3.2-3B-Instruct

- nvidia/Nemotron-Mini-4B-Instruct



- mistralai/Mistral-Small-3.1-24B-Instruct-2503
- HuggingFaceTB/SmolLM2-1.7B-Instruct
- ChatGPT-4
- deepseek-ai/DeepSeek-R1
- Qwen2.5-14B-Instruct-1M
- upstage/solar-pro-preview-instruct
- ChatGPT-3.5

Бұл модельдерді таңдау бірқатар объективті себептерге байланысты. Біріншіден, ұсынылған модельдер жиынтығы әртүрлі архитектуралық тәсілдер мен параметрлік кеңістіктердің өлшемдерін көрсетеді – салыстырмалы түрде (SmolLM2-1.7 B, Llama-3.2-3B, Nemotron-Mini-4B) ауқымды модельдерге дейін (Mistral-Small-3.1-24B, ChatGPT4). Бұл білім беру бағдарламаларын түсіндіру сапасының есептеу қуаты мен модельдердің архитектуралық ерекшеліктеріне тәуелділігін бағалауға мүмкіндік береді.

Екіншіден, бұл үлгі білім беру мазмұнын интерпретациялау саласындағы жасанды интеллекттің заманауи мүмкіндіктерін жан-жақты талдауды қамтамасыз ететін ашық кодты модельдерді (open-source) және меншікті шешімдерді қамтиды. Сонымен қатар, модельдердің орыс тілді мәтіндермен жұмыс істеу қабілеті таңдаудың маңызды факторы болды, бұл отандық оқу орындарының білім беру бағдарламаларын талдау үшін өте маңызды.

Үшіншіден, зерттеуге әртүрлі әзірлеушілердің модельдерін қосу (Meta, NVIDIA, Mistral AI, HuggingFace, OpenAI, DeepSeek, Qwen, Upstage) алынған нәтижелердің объективтілігін арттыратын және оларды түсіндіру перспективаларын кеңейтетін модельдердің белгілі бір отбасыларының оқу және архитектуралық ерекшеліктеріне байланысты ықтимал жүйелі қателіктерді теңестіруге мүмкіндік береді.

```
model = FastLanguageModel.get_peft_model(  
    model,  
    r = 32, |  
    target_modules = ["q_proj", "k_proj", "v_proj", "o_proj",  
                     "gate_proj", "up_proj", "down_proj", ],  
    lora_alpha = 32,  
    lora_dropout = 0.05,  
    bias = "none",  
    use_gradient_checkpointing = "unsloth",  
    random_state = 3407,  
    use_rslora = False,  
    loftq_config = None,  
)
```

1-сурет. Бейімделген тілдік модель жаттықтыру Lora параметрі

Ескертпе: авторлар құрастырған

Зерттеуде арнайы бейімделген LLama 3 моделі ерекше орын алады, ол білім беру бағдарламаларын талдау міндеттері үшін арнайы Lora (Low-Rank Adaptation) техникасын қолдана отырып жетілдірілген. Бұл модель peft параметрлік параметрін (Parameter-Efficient Fine-Tuning) қолдана отырып, білім беру құжаттарының корпусында мамандандырылған қосымша жаттығудан өтті. Модельді оқыту үшін оңтайландырылған гиперпараметрлер қолданылды: бейімделу дәрежесі $r=32$, масштабтау коэффициенті $\text{lora\_alpha}=32$ және $\text{dropout}=0.05$, бұл есептеу тиімділігін сақтай отырып, тиімді оқытуды қамтамасыз етті. Оқыту оқу тұрақтылығын арттыру үшін rank-Stabilized LoRA көмегімен, 8 биттік adamw оптимизаторын, сызықтық оқу жылдамдығын жоспарлаушыны және салмақты реттеуді ($\text{weight decay}=0.01$) пайдалана отырып жүргізілді. Модель 4 дәуір бойы 1000 қадамның максималды санымен оқытылды, бұл білім беру бағдарламаларындағы



нақты заңдылықтарды тану сапасы мен қайта оқытудың алдын алу арасындағы тепе-теңдікке қол жеткізуге мүмкіндік берді.

```
trainer = SFTTrainer(  
    model = model,  
    tokenizer = tokenizer,  
    train_dataset = dataset,  
    dataset_text_field = "text",  
    max_seq_length = max_seq_length,  
    dataset_num_proc = 2,  
    packing = False,  
    args = SFTConfig(  
        per_device_train_batch_size = 2,  
        gradient_accumulation_steps = 4,  
        warmup_steps = 5,  
        max_steps = 1000,  
        learning_rate = 2e-4,  
        fp16 = not torch.cuda.is_bf16_supported(),  
        bf16 = torch.cuda.is_bf16_supported(),  
        logging_steps = 1,  
        optim = "adamw_8bit",  
        weight_decay = 0.01,  
        lr_scheduler_type = "linear",  
        seed = 3407,  
        output_dir = "outputs",  
        report_to=None  
    ),  
)
```

Unsloth: Tokenizing ['text'] (num_proc=8): 100% 109773/109773 [02.03<00.00, 121.10 examples/s]

2-сурет. Бейімделген тілдік модель жаттықтыру параметрі

Ескертпе: авторлар құрастырған

Әрбір модель ұсынылған ақпарат негізінде білім беру бағдарламаларының әртүрлі компоненттерінің интерпретацияларын жасау үшін пайдаланылды. Генерация сапасы мен нәтижелердің өзектілігін арттыру үшін келесі өндірістік әдістер қолданылды:

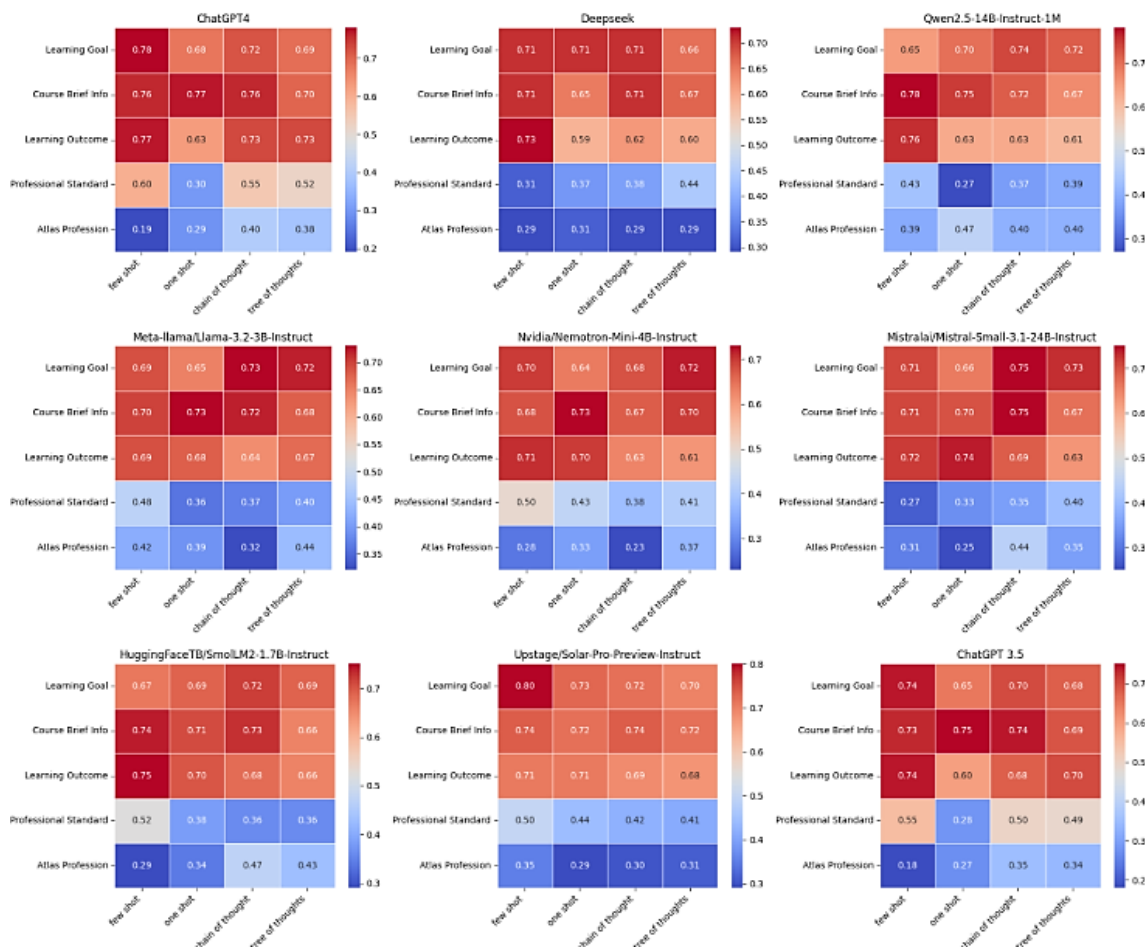
- Few-shot learning: модельдерге контекстті қалыптастыру үшін білім беру бағдарламаларының компоненттерін дұрыс түсіндірудің бірнеше мысалдары ұсынылды.
- One-shot learning: негізгі генерациядан бұрын бір анықтамалық мысал келтіру
- Tree of thought: модельді бірнеше ойлау жолдарын қарастыруға бағыттау, содан кейін оңтайлы нәтижені таңдау
- Chain of thought: нәтижелердің дәлдігі мен дұрыстығын арттыру үшін модельді қадамдық логикалық пайымдауға ынталандыру

Мәтіндер жасалғаннан кейін білім беру бағдарламаларының компоненттері мен жасалған модельдер интерпретациялар арасындағы семантикалық сәйкестікті сандық бағалау жүргізілді. Негізгі метрикалық құрал мәтіндердің векторлық көріністерінің семантикалық жақындық дәрежесін сандық бағалауға мүмкіндік беретін косинустық ұқсастық өлшемі (cosine similarity) болды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Косинус ұқсастығының жылу карталарын талдау модельдердің әртүрлі құрамдас бөліктерді интерпретациялау қабілетінде айқын стратификацияны көрсетеді. Үш деңгейлі градация байқалады:

Жоғары түсіндірілетін компоненттер (БББ мақсаттары, пәндер туралы мәліметтер, оқытудың қалыптасқан нәтижелері) – косинустық ұқсастықтың тұрақты жоғары мәндерін көрсетеді (0,65-0,80). Бұл компоненттердің формальды құрылымымен және салыстырмалы түрде стандартталған сипаттау тілімен сипатталуы өте маңызды. Мысалы, оқу нәтижелері көбінесе Блум таксономиясын қолдана отырып тұжырымдалады, бұл модельдер үшін белгілі бір «тану үлгісін» жасайды.



3-сурет. Тілдік модельдердің эмбеддингінің айырмашылық диаграммасы

Ескерту: авторлар құрастырған.

Орташа интерпретациялық компоненттер (кәсіби стандарттар) – косинустық ұқсастық мәндерінің айтарлықтай таралуын көрсетеді (көптеген модельдер үшін 0,27-0,55 және бейімделген LLM үшін 0,86 дейін). Бұл категория нақты кәсіби терминдерді және кәсіби қызметтің әртүрлі аспектілері арасындағы күрделі қатынастарды қамтитын күрделі семантикалық құрылыммен сипатталады.

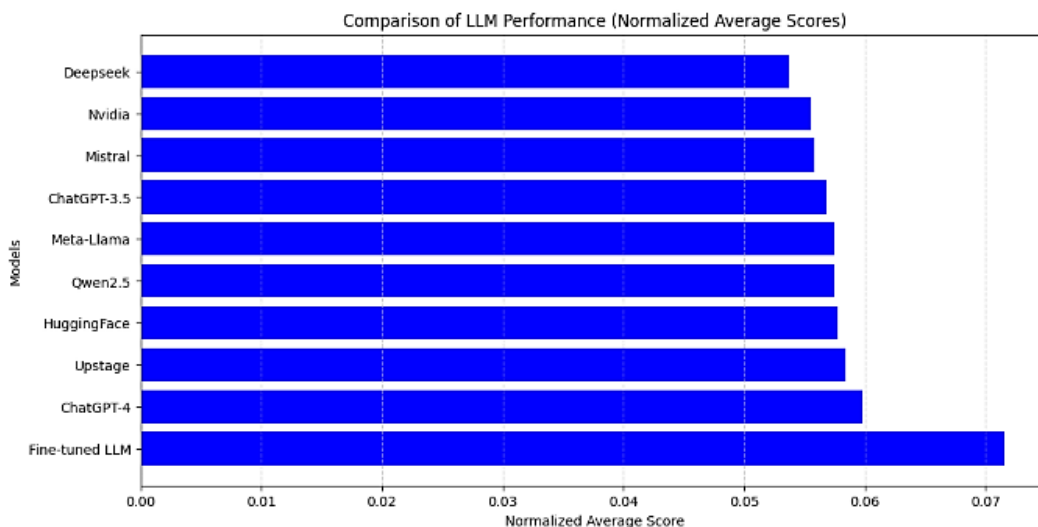
Төмен түсіндірілетін компоненттер (Atlas мамандары) – косинус ұқсастығының тұрақты төмен мәндерін көрсетеді (0,18-0,47). Бұл санат тек мәтінді түсінуді ғана емес, сонымен қатар білім беру бағдарламасының мазмұны мен нақты кәсіби талаптар арасында жасырын байланыс орнатуды талап етеді, бұл күрделіліктің жоғары тәртібінің міндеті болып табылады.

Бір қызығы, компоненттердің әр санаты үшін косинустық ұқсастық мәндерінің вариация диапазоны да әртүрлі. Жоғары интерпретацияланған компоненттер салыстырмалы түрде тар мәндер диапазонын көрсетеді, бұл модельге қарамастан интерпретацияның тұрақтылығын көрсетеді. Керісінше, орташа және төмен интерпретациялық компоненттер мәндердің айтарлықтай таралуын көрсетеді, бұл модельдердің күрделі семантикалық құрылымдарды өңдеу қабілетіндегі айтарлықтай айырмашылықтарды көрсетеді.

Алынған мәліметтер модель өлшемі мен интерпретация сапасы арасында бір мәнді корреляцияны көрсетпейді. Мысалы, салыстырмалы түрде huggingface/tb/SmolLM2-1.7 B-Instruct моделі кейбір компоненттерді түсіндіруде үлкен модельдермен салыстырылатын



көрсеткіштерді көрсетеді (оқытудың қалыптасқан нәтижелері үшін 0,75, бұл ChatGPT 3.5-тен жоғары). Бұл байқау модельдің параметрлік көлемі мен оның жұмыс сапасы арасындағы сызықтық байланыс туралы жалпы гипотезаға күмән келтіреді.



4-сурет. Тілдік модельдердің өнімділігін салыстыру

Ескерту: авторлар құрастырған

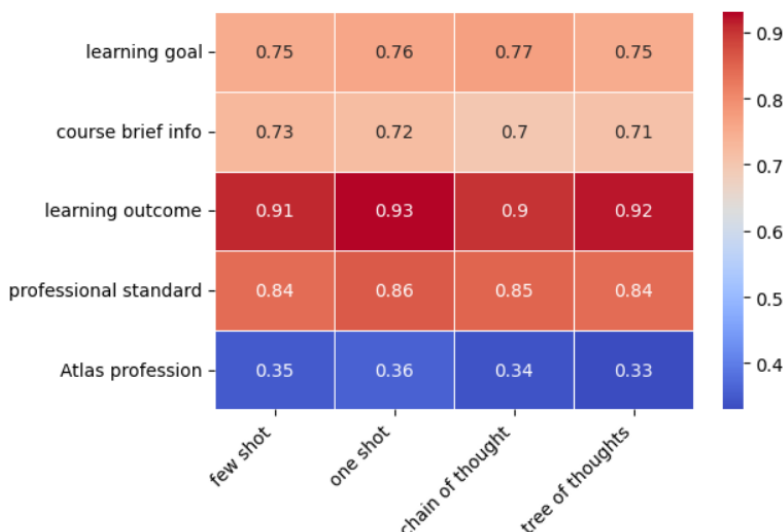
Сонымен қатар, жеке модельдерді талдау архитектуралық ерекшеліктер (мысалы, трансформатор архитектурасындағы зейін құрылымы) параметрлер санының жай өсуіне қарағанда интерпретация сапасына айтарлықтай әсер етуі мүмкін екенін көрсетеді. Бұл әсіресе бір өлшемді класс модельдерін салыстырған кезде байқалады, бірақ әртүрлі архитектуралық шешімдермен.

Бейімделген LLM нәтижелері тілдік модельдердің мамандануы туралы пікірталас аясында ерекше қызығушылық тудырады. Бұл модель оқыту нәтижелерін (0,90-0,93) және кәсіби стандарттарды (0,84-0,86) түсіндіруде керемет нәтижелерді көрсетеді, бұл барлық басқа модельдерден, соның ішінде ChatGPT-4 және Mistral-Small-3.1-24B сияқты үлкен модельдерден айтарлықтай асып түседі.

Бұл факт "мамандандырылған артықшылықтың" болуы туралы гипотезаны тұжырымдауға мүмкіндік береді – белгілі бір деректер түріне мамандандырылған модельді теңшеу үлкенірек, бірақ мамандандырылмаған модельдердің артықшылықтарын өтей алатын немесе тіпті асып түсетін жағдай. Бұл байқау білім беру саласында табиғи тілді өңдеу жүйелерін дамыту үшін айтарлықтай практикалық импликацияларға ие, мұнда мамандандыру есептеу қуатын арттырудан гөрі тиімдірек стратегия болуы мүмкін.

Білім беру бағдарламаларының әртүрлі компоненттері бойынша нәтижелерді талдау жеке модельдердің интерпретациялық қабілетінде айтарлықтай гетерогенділікті анықтайды. Мысалы, Upstage/Solar-Pro-Preview-Instruct моделі оқу мақсаттарын түсіндіруде (0,80) керемет нәтижелер көрсетеді, бірақ кәсіби стандарттарды түсіндіруде басқа модельдерден айтарлықтай төмен.

Бұл гетерогенділікті модельдерді алдын ала оқыту үшін қолданылатын оқыту деректеріндегі айырмашылықтармен, сондай-ақ олардың архитектурасының ерекшеліктерімен түсіндіруге болады. Бір қызығы, тіпті арнайы дайындалған бейімделген LLM моделі басқа модельдерге қарағанда аз дәрежеде болса да, интерпретация қабілетінде белгілі бір гетерогенділікті сақтайды.



5-сурет. Нақты деректер бойынша ЖИ үлгілерін оқытудың тиімділігі

Ескерту: авторлар құрастырған

Зерттеу әртүрлі өндірістік әдістердің тиімділігі білім беру бағдарламаларының әртүрлі компоненттері үшін бірдей емес екенін көрсетеді. Мысалы, БББ мақсаты үшін few-shot learning ең жоғары тиімділікті көрсетеді, ал кәсіби стандарттар үшін chain of thought тиімдірек болады. Бұл бақылау мәтіннің семантикалық құрылымы мен оңтайлы өндірістік әдіс арасындағы күрделі интерактивті әсерлердің болуын көрсетеді.

Сонымен қатар, талдау өндіріс әдістерінің тиімділігі белгілі бір модельге байланысты айтарлықтай өзгеруі мүмкін екенін көрсетеді. Мысалы, ChatGPT-4 үшін ең тиімдісі-few-shot learning (әсіресе күрделі компоненттер үшін), ал Mistral-Small-3.1-24B үшін chain of thought тиімдірек. Бұл модельдің нақты архитектурасын және шешілетін мәселенің ерекшеліктерін ескере отырып, оңтайлы өндірістік әдісті таңдау керек екенін көрсетеді.

Few-shot learning-тің жоғары тиімділігі (орташа тиімділік коэффициенті 0,59) модельдер мәтіннің "түсіну үлгісін" қалыптастыру үшін мысалдарды тиімді қолдана алатындығын көрсетуі мүмкін. Бұл механизм бірнеше үлгілердің болуы негізгі белгілерді бөліп көрсетуге және тапсырма туралы жалпыланған идеяны қалыптастыруға мүмкіндік беретін мысалдар бойынша адамның оқуына тұжырымдамалық жағынан ұқсас болуы мүмкін.

Chain of thought (орташа тиімділік коэффициенті 0,58) қадамдық пайымдау модельдердің, әсіресе күрделі компоненттер үшін интерпретациялық қабілетін жақсартатынын көрсетеді. Бұл күрделі тапсырманы қарапайым ішкі тапсырмалар тізбегіне бөлу мәтінді дәлірек түсіндіруге ықпал ететіндігін көрсетуі мүмкін.

Бір қызығы, Tree of thoughts (орташа тиімділік коэффициенті 0,57) ойлау тізбегімен салыстырғанда тиімділіктің шамалы төмендігін көрсетеді, бұл бірнеше пайымдау жолдарын түпкілікті интерпретацияға біріктірудің қиындығына байланысты болуы мүмкін.

Зерттеудің негізгі теориялық импликациялары:

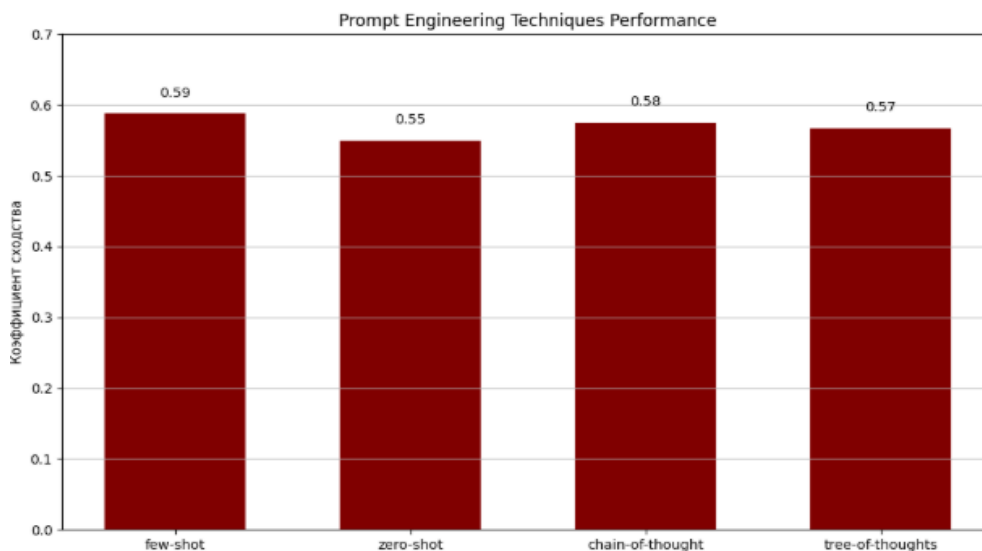
- Мамандандырылған артықшылық-белгілі бір деректер түріне арналған тілдік модельді теңшеу үлкенірек, бірақ мамандандырылмаған модельдердің артықшылықтарын өтей алады немесе тіпті жеңе алады.

- Құрылымдық-семантикалық градация-білім беру бағдарламаларының компоненттері құрылымдық-семантикалық күрделілік бойынша градацияны құрайды, бұл модельдердің оларды түсіндірудің әртүрлі қабілеттерінде көрінеді.



• Өндірістік әдістер мен компоненттер түрлері арасындағы интерактивті әсерлер – әр түрлі өндірістік әдістердің тиімділігі мәтіннің семантикалық құрылымына және белгілі бір модельдің ерекшеліктеріне байланысты.

• Промптинг әдістерінің дифференциалды маңыздылығы - неғұрлым күрделі компоненттер үшін оңтайлы промптинг әдісін таңдау өте маңызды.



6-сурет. Тапсырманы орындау тиімділігі бойынша
промпт инженерлік әдістерді салыстыру

Ескерту: авторлар құрастырған

Бақылау деректері білім беру бағдарламаларын тілдік модельдермен түсіндірудің теориялық моделін әзірлеуге негіз болады, оны табиғи тілді өңдеу және білім беру аналитикасы саласындағы қосымша зерттеулер үшін пайдалануға болады.

Зерттеудің практикалық импликациялары білім беру бағдарламаларын талдаудың әртүрлі міндеттері үшін оңтайлы модельдер мен промптинг әдістерін таңдау бойынша ұсыныстарды, сондай-ақ белгілі бір компоненттерді интерпретациялау тиімділігін арттыру үшін тілдік модельдерді арнайы теңшеу стратегияларын қамтиды.

Жалпы, жүргізілген зерттеу білім беру бағдарламаларын талдау және түсіндіру үшін заманауи тілдік модельдерді қолданудың маңызды әлеуетін көрсетеді, сонымен бірге күрделі семантикалық құрылымдарды өңдеу әдістерін одан әрі жетілдіру және білім беру бағдарламаларының әртүрлі аспектілері арасында жасырын байланыстар орнату қажеттілігін көрсетеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеулер білім беру бағдарламалары үшін тілдік модельдер арқылы жасалған мазмұнның сапасын арттыруда жедел инжинирингтің маңызды рөлін көрсетеді. Түрлі ынталандыру әдістерін талдау (бірнеше рет оқыту, ой тізбегі, ойлар ағашы) білім беру бағдарламаларының түсіндірілетін компоненттерінің түріне байланысты олардың сараланған тиімділігін көрсетті. Белгілі бір «мамандандырылған артықшылық» ерекше құндылық болып табылады – бейімделген үлгілер білім беру мазмұнын түсіндіруде мамандандырылған емес аналогтардан айтарлықтай асып түседі.

Түсіндіру дәрежесі бойынша білім беру бағдарламасының құрамдас бөліктерінің құрылымдық-семантикалық градациясы белгіленді: жоғары түсіндірілетін (оқу мақсаттары, пәндер туралы ақпарат, қалыптасқан оқыту нәтижелері) бастап



түсіндірмелілігі төмен күрделі компоненттерге дейін (Кәсіп атласы). Шақыру әдістерінің тиімділігі талданатын компоненттің нақты үлгісі мен түріне байланысты өзгереді.

Алынған нәтижелер білім беру аналитикасында тілдік модельдерді қолданудың оңтайлы стратегияларын әзірлеуге негіз болып табылады және жасанды интеллект арқылы білім беру бағдарламаларының күрделі семантикалық құрылымдарын интерпретациялау саласындағы одан әрі зерттеулерге перспективалар ашады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу ешқандай қаржылық қолдаусыз жүргізілді.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар Astana IT University-ге зерттеу жүргізу барысында ұсынған ресурстары үшін алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Осы ғылыми мақаланы жазу барысында жасанды интеллект немесе генеративті ЖИ технологиялары қолданылған жоқ.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Gupta, R., Goyal, H., Kumar, D., Mehra, A., Sharma, S., Mittal, K., & Challa, J. S. (2025). Saksham AI: Advancing AI-Assisted Coding Education for Engineering Students in India Through Socratic Tutoring and Comprehensive Feedback. arXiv preprint arXiv:2503.12479. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.12479>
- Lee, D., & Palmer, E. (2025). Prompt engineering in higher education: a systematic review to help inform curricula. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 22(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s41239-025-00503-7>
- Conklin, S., Dorgan, T., & Barreto, D. (2024). Is AI the new course creator. *Discover Education*, 3(1), 285. <https://doi.org/10.1007/s44217-024-00386-2>
- Andrew, K., & Montalbano, M. J. (2025). Through a Glass Darkly: Perceptions of Ethnoracial Identity in Artificial Intelligence Generated Medical Vignettes and Images. *Medical Science Educator*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40670-025-02332-9>
- Mushtaq, A., Naeem, R., Ghaznavi, I., Taj, I., Hashmi, I., & Qadir, J. (2025, April). Harnessing Multi-Agent LLMs for Complex Engineering Problem-Solving: A Framework for Senior Design Projects. In *2025 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)* (pp. 1-10). IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.01205>
- Deshmukh, R., Raut, R., Bhavsar, M., Gurav, S., & Patil, Y. (2025, February). Optimizing Human-AI Interaction: Innovations in Prompt Engineering. In *2025 3rd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT)* (pp. 1240-1246). IEEE. 10.1109/IDCIoT64235.2025.10914815
- Drumm, L., & Sami, A. (2024). Academic staff AI literacy development through LLM prompt training. In *Effective practices in AI literacy education: Case studies and reflections* (pp. 41-49). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/978-1-83608-852-320241005>
- Ong, J., Ho, C. K., Koh, Y. Y., & Kok, C. L. (2024, December). Harnessing the Power of GenAI tools: Evaluating Response as an Approach to Learning. In *2024 IEEE 17th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc)* (pp. 5-10). IEEE. <http://dx.doi.org/10.4018/IJTEPD.382379>
- Lee, U., Kim, Y., Lee, S., Park, J., Mun, J., Lee, E., ... & Yoo, Y. J. (2024). Can we use GPT-4 as a mathematics evaluator in education?: Exploring the efficacy and limitation of LLM-based automatic assessment system for open-ended mathematics question. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 1-37. <http://dx.doi.org/10.1007/s40593-024-00448-4>



- Van Huong, P. (2024, December). Optimizing Transformer Models for Prompt Jailbreak Attack Detection in AI Assistant Systems. In 2024 1st International Conference On Cryptography And Information Security (VCRIS) (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VCRIS63677.2024.10813380>
- Nyaaba, M. (2024). Transforming teacher education in developing countries: The role of generative AI in bridging theory and practice. arXiv preprint arXiv:2411.10718. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.10718>
- Reisman, S. (2025). Engineering? No Way. Computer, 58(4), 74-78. 10.1109/MC.2025.3534264
- Huo, H., Ding, X., Guo, Z., Shen, S., Ye, D., Pham, O., ... & Gardner, A. (2024, December). Accelerating Learning with AI: Improving Students' Capability to Receive and Build Automated Feedback for Programming Courses. In 2024 World Engineering Education Forum-Global Engineering Deans Council (WEEF-GEDC) (pp. 1-9). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WEEF-GEDC63419.2024.10854928>
- Elfayoumi, M., AbouElazm, M., Mohamed, O., Abuhmed, T., & El-Sappagh, S. (2025, January). Knowledge augmented significant language model-based chatbot for explainable diabetes mellitus prediction. In 2025 19th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM) (pp. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/imcom64595.2025.10857525>
- Fatahi, B., Nguyen, L. D., Khabbaz, H., & Hadgraft, R. (2024, December). Virtual teammates: transforming engineering learning through generative AI integration. In Proceedings of the 35th Annual Conference of the Australasian Association for Engineering Education (AAEE 2024) (pp. 241-251). Christchurch, New Zealand: Engineers Australia. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.T2025032000015001903171710>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Серіков Аянбек Ермекұлы – техника ғылымдарының докторанты, Astana IT University, Астана қ., Қазақстан
Сериков Аянбек Ермекович – докторант технических наук, Astana IT University, г. Астана, Казахстан
Serikov Ayanbek Ermekuly – PhD student in Technical Sciences, Astana IT University, Astana, Kazakhstan
e-mail: ayanbek.as@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2413-5051>,



Андрей Билощицкий – техника ғылымдарының докторы, Киев ұлттық құрылыс және сәулет университеті, Киев, Украина
Андрей Билощицкий – доктор технических наук, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина
Andrii Biloshchytskyi – Doctor of Technical Sciences, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine,
e-mail: a.b@astanait.edu.kz,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9548-1959>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_250

MPHTI 28.23.35

МЕДИЦИНАЛЫҚ ДИАГНОСТИКА МІНДЕТТЕРІНДЕГІ ГЛЮКОМЕТРЛЕР МЕН ГЕМАТОЛОГИЯЛЫҚ АНАЛИЗАТОРЛАРДЫҢ ДЕРЕКТЕРІН ТАЛДАУҒА АРНАЛҒАН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ МОДЕЛЬДЕРІ

МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ ГЛЮКОМЕТРОВ И ГЕМАТОЛОГИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ В ЗАДАЧАХ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

MACHINE LEARNING MODELS FOR ANALYZING DATA FROM GLUCOMETERS AND HEMATOLOGY ANALYZERS IN MEDICAL DIAGNOSTICS TASKS

З.Т. Хасенова ¹, И.М. Увалиева ^{1*}, Р.У. Мукашева ¹,

А.Ш. Букунова ¹, Б. Кәрімқызы ²

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

²«А-Медикал» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Увалиева Индира Махмұтовна, e-mail: iuvalieva@ektu.kz

Түйінді сөздер:

Машиналық оқыту; қант
диабеті; глюкометр;
гематологиялық
анализатор;
биохимиялық көрсеткіш;
интеллектуалды
диагностика; градиентті
күшейту; медициналық
информатика; болжамды
аналитика

ТҮЙІНДЕМЕ

Қант диабеті мен анемиямен сырқаттанушылықтың жаһандық өсуі жағдайында осы жағдайларды ерте диагностикалау және үздіксіз бақылау үшін заманауи, дәл және масштабталатын құралдарды әзірлеу қажеттілігі артып келеді. Осы зерттеудің мақсаты қант диабеті мен анемияның даму қаупін автоматтандырылған жіктеу және бағалау үшін машиналық оқыту алгоритмдерімен заманауи экспресс-глюкометрлерден, гематологиялық және биохимиялық анализаторлардан алынған деректерді интеграциялау тәсілін әзірлеу болып табылады. Мақалада глюкоза, гликатталған гемоглобин (HbA1c), ферритин, гематокрит, MCV, MCH, MCHC және басқа биомаркерлердің көрсеткіштерін қоса алғанда, медициналық құрылғылардан жиналған деректер қолданылады. Деректер стандартталған, өңделген және машиналық оқыту үлгілерін оқыту және сынау үшін пайдаланылды: DecisionTree, RandomForest, AdaBoost, ExtraTrees, GradientBoosting, сондай-ақ логистикалық регрессия, SVM және XGBoost. Сонымен қатар, feature importance және SHAP сияқты модельдерді түсіндіру әдістері қолданылды. Нәтижелер гиперпараметрлерді алдын ала конфигурациялаумен GradientBoosting моделін пайдалану кезінде ең жақсы көрсеткіштерге (0.92 дәлдігі, F1-0.91 көрсеткіші) қол жеткізілгенін көрсетті. Модель сонымен қатар жоғары төзімділік пен интерпретацияны көрсетті, бұл клиникалық тәжірибеде қолдану үшін өте маңызды. Мұндай жүйені енгізу диагностиканың тиімділігін едәуір арттырады, медициналық персоналға жүктемені азайтады және пациенттерді бақылаудың жеке тәсілін қамтамасыз етеді. Зерттеу зертханалық диагностика міндеттерінде АИ қолданудың жоғары перспективасын растайды және медициналық құрылғыларды



интеллектуалды аналитикалық платформалармен одан әрі интеграциялау қажеттілігін көрсетеді.

Ключевые слова:

Машинное обучение;
сахарный диабет;
глюкометр;
гематологический
анализатор;
биохимический
показатель;
интеллектуальная
диагностика;
градиентный бустинг;
медицинская
информатика;
предиктивная аналитика

АННОТАЦИЯ

В условиях глобального роста заболеваемости сахарным диабетом и анемиями возрастает необходимость разработки современных, точных и масштабируемых инструментов для ранней диагностики и непрерывного мониторинга этих состояний. Целью настоящего исследования является разработка подхода к интеграции данных, получаемых с современных экспресс-глюкометров, гематологических и биохимических анализаторов, с алгоритмами машинного обучения для автоматизированной классификации и оценки риска развития диабета и анемий. В статье использованы данные, собранные с медицинских приборов, включая показатели глюкозы, гликированного гемоглобина (HbA1c), ферритина, гематокрита, MCV, MCH, MCHC и других биомаркеров. Данные были стандартизированы, обработаны и использованы для обучения и тестирования моделей машинного обучения: DecisionTree, RandomForest, AdaBoost, ExtraTrees, GradientBoosting, а также логистической регрессии, SVM и XGBoost. Дополнительно применялись методы интерпретации моделей, такие как feature importance и SHAP. Результаты показали, что наилучшие метрики (точность 0.92, F1-метрика 0.91) достигнуты при использовании модели GradientBoosting с предварительной настройкой гиперпараметров. Модель также показала высокую устойчивость и интерпретируемость, что критично для применения в клинической практике. Внедрение такой системы может значительно повысить эффективность диагностики, снизить нагрузку на медицинский персонал и обеспечить персонализированный подход к наблюдению пациентов. Исследование подтверждает высокую перспективность применения ИИ в задачах лабораторной диагностики и подчеркивает необходимость дальнейшей интеграции медицинских устройств с интеллектуальными аналитическими платформами.

keywords:

Machine learning; diabetes mellitus; glucose meters; hematology analyzers; biochemical indicators; intelligent diagnostics; gradient boosting; medical informatics; predictive analytics

ABSTRACT

With the global increase in the incidence of diabetes and anemia, there is an increasing need to develop modern, accurate and scalable tools for early diagnosis and continuous monitoring of these conditions. The purpose of this study is to develop an approach to integrating data obtained from modern express glucose meters, hematological and biochemical analyzers with machine learning algorithms for automated classification and assessment of the risk of diabetes and anemia. The article uses data collected from medical devices, including glucose, glycated hemoglobin (HbA1c), ferritin, hematocrit, MCV, MCH, MCHC and other biomarkers. The data was standardized, processed, and used for training and testing machine learning models: DecisionTree, randomForest, AdaBoost, ExtraTrees, GradientBoosting, as well as logistic regression, SVM, and XGBoost. Additionally, model interpretation methods such as feature importance and SHAP were used. The results showed that the best metrics (accuracy 0.92, F1-metric 0.91) were achieved using the GradientBoosting model with hyperparameter presetting. The model also showed high stability and interpretability, which is critical for use in clinical practice. The implementation of such a system can significantly improve the efficiency of diagnostics, reduce the burden on medical staff and provide a personalized



approach to patient monitoring. The study confirms the high prospects of using AI in laboratory diagnostic tasks and highlights the need for further integration of medical devices with intelligent analytical platforms.

КІРІСПЕ

Қант диабеті мен анемия жаһандық ауқымда ең көп таралған созылмалы аурулардың қатарына жатады (Farooqi, M., Tahir, Y., & Rehan, B. (2022)). Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының деректеріне сәйкес, диабеттің таралуы тұрақты өсу үрдісін көрсетуде, әсіресе табысы төмен және орташа елдерде Liu J. және басқ. (2022) атап өтті. Анемия, ең алдымен теміртапшылық анемиясы, әлем бойынша 1,6 миллиардтан астам адамға зардап тигізеді және жиі анықталмай қалады, бұл әсіресе әйелдерге, балаларға және қарт адамдарға тән құбылыс деп Iolascon A. және басқ. (2024) атып өткен еді. Екі патологиялық жағдай да өмір сапасына, кәсіби белсенділікке, қатар жүретін аурулардың ағымына және жалпы өлім көрсеткіштеріне айтарлықтай теріс ықпал етеді.

Қиындық тудыратын маңызды факторлардың бірі – қант диабетінің бастапқы кезеңдерінде симптомсыз өтуі, ал анемия белгілері науқастар тарапынан жиі жай ғана шаршау ретінде қабылданып, медициналық көмекке дер кезінде жүгіну ықтималдығын Crasto W. және басқ. (2021) төмендетеді деген. Осыған байланысты неғұрлым дәл, ауқымды және жедел диагностика әдістерін әзірлеу мен енгізу қажеттілігі артып отыр. Заманауи медициналық технологияларды деректерді интеллектуалды талдау әдістерімен біріктіру аталған ауруларды ерте анықтау мен жекелеңдірілген мониторинг жүргізудің жаңа мүмкіндіктерін ашады, бұл денсаулық сақтау жүйесінің цифрлық трансформациясы жағдайында ерекше маңызға ие.

Соңғы онжылдықтарда, негізінен II типті қант диабетінің таралуы айтарлықтай өсті, оған аз қимылдайтын өмір салты, семіздік, теңгерімсіз тамақтану және демографиялық қартаю себеп болып отыр деп Pittas A. G. және басқ. (2023) атап өткен еді. Болжамдарға сәйкес, 2045 жылға қарай диабетпен ауыратындар саны 700 миллионнан асады деп AlFalasi S.M. және басқ. (2024) атап жазған еді. Ал анемия, өз кезегінде, ең кең таралған гематологиялық патологиялардың бірі болып қала береді және дербес ауру ретінде де, созылмалы патологиялық процестердің клиникалық маркері ретінде де көрінуі мүмкін деп өз зерттеулерінде Brittenham G. M. және басқ. (2023) қорытынды жасаған еді. Бұл аурулардың жасырын ағымы, кеш диагностикасы және ұзақ мерзімді терапия қажеттілігі ерекше қауіп тудырады. Мұндай жағдай денсаулық сақтау жүйесіне қосымша жүктеме түсіріп, халықтың еңбекке қабілеттілігін төмендетеді және экономикалық шығындарды едәуір арттырады. Сондықтан ауруларды ерте анықтау, алдын алу және сенімді деректерге негізделген үздіксіз мониторинг «XXI ғасыр індетімен» күрестің негізгі бағыттары болып табылады деп Neumann G. & Kawaoka Y. (2023) атап өткен.

Қант диабеті мен анемияны тиімді басқару дер кезінде қойылған диагнозсыз және науқастың жағдайын динамикалық бақылаусыз мүмкін емес. Бұл екі ауру да ерте кезеңдерде симптомсыз өтуі мүмкін, алайда дәл осы уақытта патологиялық процестер басталады: диабет кезінде – қан тамырлары мен ағзалардың зақымдануы, ал анемия кезінде – тіндік гипоксия. Мұндай бұзылыстарды ерте анықтау ауыр асқынулардың дамуын болдырмауға мүмкіндік береді, оның ішінде ретинопатияны, нефропатияны, жүрек жеткіліксіздігін және когнитивтік бұзылыстарды. Зертханаға мерзімді баруға және талдау нәтижелерін күтуге негізделген дәстүрлі диагностикалық әдістер әрқашан бақылаудың жеткілікті жеделдігі мен үздіксіздігін қамтамасыз ете бермейді. Ал осы уақытта, заманауи медициналық құрылғылар-экспресс-глюкометрлер, гематологиялық және биохимиялық анализаторлар-нақты уақыт режимінде негізгі көрсеткіштерді алуға мүмкіндік береді деп Kubihal S. (2021) атап өткен. Оларды машиналық оқыту алгоритмдерімен біріктіру тәуекел



факторларын мониторингілеудің және автоматтандырылған анықтаудың интеллектуалды жүйелерін қалыптастыру перспективаларын ашады, бұл тәуекелі жоғары топтағы пациенттер үшін, сондай-ақ дәрігерлік көмекке қолжетімділігі шектеулі жағдайларда ерекше маңызға ие.

Қант диабеті мен анемияны диагностикалаудың классикалық әдістері, соның ішінде зертханалық қан анализі, клиникалық тексерулер және медициналық қорытындылар бірқатар шектеулерге ие. Біріншіден, олар пациенттің физикалық қатысуын талап етеді, оны әлеуметтік, экономикалық немесе географиялық факторлар қиындатуы мүмкін. Екіншіден, деректерді түсіндіру көбінесе дәрігердің субъективті тәжірибесіне байланысты, бұл нәтижелердің қайталануын азайтады. Сонымен қатар, дәстүрлі тәсілдер қажетті жеделдікті қамтамасыз етпейді: биоматериалды алған сәттен бастап нәтижелерге қол жеткізуге дейін бірнеше күн қажет. Ақырында, мұндай әдістер тексеріс арасындағы уақыт аралығында жағдайдың динамикасын бағалауға мүмкіндік бермейді, бұл тұрақты бақылауды қажет ететін созылмалы аурулар үшін өте маңызды. Медицинаның цифрлық трансформациясы жағдайында классикалық клиникалық практикадан тыс диагностика мен мониторингке неғұрлым икемді, автоматтандырылған және дербестендірілген тәсілдерді енгізу қажеттілігі өзекті болып отыр.

Медициналық технологиялар мен машиналық оқыту алгоритмдерін дамыту созылмалы ауруларды диагностикалау және бақылау үшін түбегейлі жаңа мүмкіндіктер ашады. Қазіргі заманғы глюкометрлер, гематологиялық және биохимиялық анализаторлар нақты уақыт режимінде өңделетін деректердің айтарлықтай көлемін жасайды деп Jain P. және басқ. (2024) атап өткен. Машиналық оқыту дәстүрлі клиникалық талдауда жоқ жасырын заңдылықтарды анықтауға, аурулардың дамуын болжауға, жағдайларды жіктеуге және клиникалық ұсыныстарды қалыптастыруға мүмкіндік береді. Медициналық құрылғыларды ML алгоритмдерімен біріктіру денсаулық сақтаудың бастапқы деңгейінде де, пациенттердің өзін-өзі бақылауында да қолданылатын интеллектуалды медициналық шешімдерді қолдау жүйелерінің (CDSS) жұмыс істеуінің алғышарттарын жасайды. Мұндай жүйелер гликемия, HbA1c, ферритин, гематокрит және басқа биомаркерлердің көрсеткіштерін автоматты түрде түсіндіруге, тәуекелдерді анықтауға және пациентке немесе емдеуші дәрігерге хабарлама жасауға қабілетті. Бұл әсіресе телемедицина, асқынулардың алдын алу және жеке медицинаға көшу контекстінде маңызды.

Зерттеудің мақсаты қант диабеті мен анемияны диагностикалаудың тиімділігін арттыру үшін заманауи экспресс-глюкометрлерден, гематологиялық және биохимиялық анализаторлардан алынған деректерді машиналық оқыту алгоритмдерімен біріктіру тәсілін әзірлеу және негіздеу болып табылады.

Бұл зерттеу патологиялық жағдайларды дәл жіктеу, жасырын заңдылықтарды анықтау, тәуекел-стратификацияны жүргізу және клиникалық шешім қабылдауды интеллектуалды қолдауды қамтамасыз ету мақсатында объективті зертханалық деректерге негізделген автоматтандырылған жүйені әзірлеуге бағытталған. Жұмыста машиналық оқытудың әртүрлі модельдерінің сапасын кешенді бағалауға, алгоритмдер мен олардың гиперпараметрлерін оңтайландыруға, сондай-ақ нақты клиникалық тәжірибе жағдайында әзірленген шешімдердің практикалық қолданылуын негіздеуге ерекше назар аударылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Медициналық технологияларды машиналық оқыту алгоритмдерімен (ML) интеграциялау соңғы жылдары дербестендірілген және цифрлық медицинаны дамытудың негізгі бағыттарының біріне айналды. Ғылыми әдебиеттер созылмалы ауруларды, соның ішінде қант диабеті мен анемияны диагностикалау мен болжауда ML қолдану



мүмкіндіктерін белсенді түрде қарастыруда. Бұл олардың жоғары таралуына, ерте сатыдағы жасырын ағымға және пациенттердің жағдайын үнемі бақылау қажеттілігіне байланысты.

2 типті қант диабеті ML қолдану контекстінде ең көп зерттелген аурулардың бірі болып табылады (Deberneh H. M., & Kim I. (2021)). Pima Indians Diabetes деректерін қолдануға негізделген бірқатар жұмыстар логистикалық регрессия, кездейсоқ орман, SVM және градиентті күшейту әдістері сияқты алгоритмдерді қолданылды деп Mousa A. және басқ. (2023) атап өткен. Зерттеулердің көпшілігі клиникалық белгілердің шектеулі жиынтығына негізделген қант диабеті қаупін болжау кезінде шамамен 85-90% дәлдікке жететін ансамбльдік тәсілдердің (мысалы, XGBoost, Random Forest) жоғары тиімділігін растайды: глюкоза деңгейі, жас, дене салмағының индексі және қан қысымы. Сонымен қатар, нақты глюкометрлер немесе биохимиялық анализаторлардың деректеріне сүйенетін, нақты уақыт режимінде жүргізілген зерттеулер әлі де аз, бұл өзекті зерттеу аясын қалыптастырады.

Анемияны диагностикалауда ML қолдану аз дәрежеде жиі кездеседі, бірақ бұл бағыт белсенді даму тенденциясын көрсетеді. Жіктеу әдістері, соның ішінде Decision Tree, KNN және нейрондық желілер жалпы қан анализінің параметрлеріне негізделген анемия түрлерін (мысалы, микроциттік және макроциттік) ажыратуға мүмкіндік береді – Hb, MCV, MCH, RDW және т.б. деп Ramzan M. және басқ. (2024) атап өткен. Жекелеген зерттеулер нейрондық желілік модельдердің тиімділігін, әсіресе балалар мен жүкті әйелдердегі темір тапшылығы анемиясын болжауда көрсетеді. Бұл саладағы шектеуші фактор белгіленген клиникалық деректер жиынтығының жеткіліксіз болуы болып қала береді, бұл модельдерді оқытуды қиындатады және олардың кеңінен қабылдануын тежейді.

Медициналық мәселелерде ML модельдерінің интерпретациясы ерекше маңызды. Шешімдерді түсіндіру үшін SHAP (Geukes Forpen R.J. және басқ. (2025)), Permutation Importance және LIME (Mitra U. және басқ. (2025)) сияқты тәсілдер кеңінен қолданылады. Бұл дәрігерге модель нәтижесіне қандай белгілердің негізгі әсер еткенін түсінуге мүмкіндік береді, бұл әсіресе диабет пен анемияны диагностикалауда өте маңызды, мұнда алгоритм қорытындыларының клиникалық интерпретациясы аса қажет болып табылады.

Осылайша, қолданыстағы зерттеулер созылмалы ауруларды диагностикалауда машиналық оқытуды пайдаланудың жоғары перспективасын көрсетеді. Сонымен бірге, зертханалық құрылғыларды, үздіксіз деректер жинау технологияларын және интеллектуалды талдауды бірыңғай цифрлық платформаға біріктіретін кешенді жүйелерді құру қажеттілігі сақталуда. Дәл осы міндет осы зерттеудің негізінде жатыр.

Жұмыс аясында қант диабеті мен анемияны диагностикалау үшін заманауи экспресс-глюкометрлер, сондай-ақ гематологиялық және биохимиялық анализаторлар қолданылды. Экспресс-глюкометрлер-бұл үйде де, клиникалық тәжірибеде де қолданылатын қандағы глюкозаны жылдам өлшеуге арналған портативті құрылғылар. Олардың жұмыс принципі көбінесе электрохимиялық әдіске негізделген, онда глюкоза ферментпен (мысалы, глюкоза оксидазасы) әрекеттесіп, қант концентрациясына пропорционалды электр сигналын тудырады. Заманауи модельдер (мысалы, AT Care, Contour Plus, Accu-Chek Guide) автоматты кодтау, өлшеу тарихын жүргізу, Bluetooth немесе USB деректерін беру, мобильді қосымшалармен және еске салу жүйесімен синхрондау мүмкіндіктерімен жабдықталған деп Cournoyer A. және басқ. (2022) атап өткен.

AT Care Multi сияқты кейбір құрылғылар глюкоза деңгейін ғана емес, сонымен қатар метаболикалық синдромы бар науқастар үшін өте маңызды липидті профиль көрсеткіштерін (холестерин, триглицеридтер) анықтауға мүмкіндік беретін мультифункционалдылыққа ие. Осылайша, заманауи экспресс-глюкометрлер қан көрсеткіштерін дәл және ыңғайлы бақылауға арналған жоғары технологиялық құралдар болып табылады (Daves M.



және басқ. (2025)). Қолданыстағы шектеулерге қарамастан, олар диабет кезіндегі өзін-өзі бақылаудың негізгі құралы, сондай-ақ амбулаториялық және жедел жәрдем жағдайында скринингтің тиімді құралы болып қала береді.

«А-Медикал» ЖШС компаниясының заманауи экспресс-глюкометрлері, гематологиялық және биохимиялық анализаторлары сурет 1-де көрсетілген.



1-сурет. «А-Медикал» ЖШС компаниясының заманауи экспресс-глюкометрлері, гематологиялық және биохимиялық анализаторлары

Ескерту: авторлар «А-Медикал» ЖШС компаниясының деректері (2025) негізінде құрастырған

Гематологиялық және биохимиялық анализаторлар заманауи зертханалық диагностикада орталық орын алады, олар физиологиялық және патологиялық жағдайлардың кең ауқымын жоғары дәлдікпен және қайталану мүмкіндігімен бағалауды қамтамасыз етеді. Бұл автоматтандырылған жүйелер қанның жасушалық құрамының көрсеткіштерін, биохимиялық параметрлерді және микроэлементтердің құрамын қамтитын сенімді нәтижелерді қысқа мерзімде алуға мүмкіндік береді, бұл диагноз қоюдың және кейіннен терапияны бақылаудың негізін қалайды.

Гематологиялық анализаторлар (мысалы, ABX Micros ES 60, ABX Pentra XL 80, Yumizen H500 OT) жалпы қан талдауын (ЖҚТ) орындауға арналған. Олар эритроциттердің, лейкоциттердің және тромбоциттердің мөлшерін, гемоглобин концентрациясын (Hb), гематокрит деңгейін (HCT) анықтайды, сондай-ақ әртүрлі анемия түрлерін дифференциалды диагностикалау үшін қажетті эритроцитарлық индекстерді (MCV, MCH, MCHC) есептейді. Сонымен қатар, заманауи құрылғылар лейкоциттерді бес популяция бойынша жіктеуге мүмкіндік беретін 5-DIFF-талдауды қолдайды деп Gómez, J. G. және басқ. (2025) деп атап өткен. Ажыратушы сипаттамалары – жоғары өнімділік (сағатына 120 сынамаға дейін), кіріктірілген ішкі сапаны бақылау жүйелері және зертханалық ақпараттық жүйелермен (LIS) интеграциялау мүмкіндігі, бұл стандарттауды арттырады және қателіктер қаупін азайтады.



Биохимиялық анализаторлар (мысалы, ABX Pentra 400) қан сарысуындағы немесе плазмасындағы метаболиттер мен ферменттерді сандық анықтау үшін қолданылады. Ең көп сұранысқа ие көрсеткіштер – глюкоза, креатинин, ферритин, билирубин деңгейі, ферменттердің белсенділігі (АЛТ, АСТ), жалпы ақуыз бен альбуминнің концентрациясы, сондай-ақ электролиттер (Na^+ , K^+ , Cl^-). Заманауи жүйелер сынамааны дайындауды, ауытқуларды тіркеуді және өзін-өзі калибрлеуді қоса алғанда, 60–100 түрлі сынақты автоматты түрде орындай алады, бұл оператордың қолмен араласу қажеттілігін азайтады және нәтижелердің сенімділігін арттырады.

Жоғары дәлдігі, қайталану мүмкіндігі және жұмыс жылдамдығы арқасында гематологиялық және биохимиялық анализаторлар анемияларды, қант диабетін, бүйрек жеткіліксіздігін, инфекциялық ауруларды және басқа да патологиялық жағдайларды диагностикалау мен бақылауда таптырмайтын құрал болып табылады. Оларды машиналық оқыту алгоритмдерімен біріктіру зертханалық деректердің ақпараттылығын және клиникалық шешімдердің дәлдігін арттыруға, әсіресе мультифакторлы көрсеткіштерді талдау кезінде жаңа мүмкіндіктер ашады.

Осы зерттеу аясында медициналық және зертханалық жүйелерді жеткізуге маманданған «Aksel & A» ЖШС компаниясының жабдықтары қолданылды, бұл алынған деректердің жоғары сапасын және оларды кейіннен интеллектуалды талдау модульдеріне интеграциялау мүмкіндігін қамтамасыз етті.

Медицинадағы жасанды интеллекттің ең белсенді дамып келе жатқан бағыттарының бірі – бұл автоматтандырылған диагностика міндеттері үшін қолданылатын машиналық оқыту (ML). Random Forest, Gradient Boosting, Support Vector Machines және нейрондық желілер сияқты жіктеу алгоритмдері таңбаланған клиникалық деректер (анамнез, зертханалық көрсеткіштер, медициналық кескіндер) негізінде оқытыла отырып, мыналарға мүмкіндік береді (Gómez, J. G. және басқ. (2025)):

- глюкоза деңгейі, HbA1c, дене салмағының индексі, қысым және пациенттің жасы негізінде қант диабетін диагностикалау;
- ЖҚТ (Hb, HCT, MCV, MCHC) деректері бойынша анемияларды анықтау және оларды жіктеу (микроцитарлық, нормоцитарлық, макроцитарлық);
- КТ, МРТ, рентгенография және УДЗ деректері бойынша сверткалық нейрондық желілер (CNN) көмегімен қатерлі ісіктерді тану;
- рекуррентті нейрондық желілерді (RNN, LSTM) пайдалана отырып, ЭКГ немесе эхокардиография негізінде кардиологиялық патологияларды анықтау.

Осылайша, машиналық оқыту диагностикалау мен болжаудың дәлдігін арттыра отырып, медицинаға трансформациялаушы әсерін тигізуде. Болашақта, оның рөлі, әсіресе медициналық құрылғылармен және зертханалық жүйелермен интеграциялануында арта түседі. Алайда, оны тәжірибеде енгізу үшін технологиялық мүмкіндіктер мен клиникалық қауіпсіздік талаптары арасындағы тепе-теңдікті ескеру қажет.

Қант диабеті мен анемияны диагностикалау процестерінде заманауи экспресс-глюкометрлерді, гематологиялық және биохимиялық анализаторларды ML-модельдерімен сәтті интеграциялау үшін бірқатар міндеттерді шешу қажет:

- деректерді жинауды стандарттау;
- алдын ала өңдеу және сүзу процедураларын әзірлеу және енгізу;
- ML модельдерін оқыту және белгілерді іріктеу;
- алгоритм шешімдерін интерпретациялау;
- валидация және клиникалық тестілеу;
- тәуелсіз іріктемелердегі метрикалар (accuracy, F1 score, recall, ROC-AUC) бойынша дәлдікті бағалау;
- нәтижелерді қолданыстағы диагностикалық стандарттармен салыстыру.



Осы зерттеу аясында автоматтандырылған диагностика міндетін жүзеге асыру үшін әртүрлі диагностикалық құрылғылардан алынған зертханалық және биометриялық көрсеткіштерді қамтитын жиынтық деректер жиынтығы жиналды. Негізгі дереккөздер кесте 1-де көрсетілген.

1-кесте. Зерттеудің негізгі дереккөздері

Дереккөз түрі	Медициналық құрылғылардың атауы	Мақсаты
Экспресс-глюкометрлер	AT Care; AT Care Multi	Капиллярлық қандағы глюкозаның, ал бірқатар модельдерде – холестерин мен триглицеридтердің де мандерін береді
Гематологиялық анализаторлар	ABX Micros ES 60; Pentra XL 80; Yumizen H500	Жалпы қан талдауының көрсеткіштерін алу үшін қолданылады
Биохимиялық анализаторлар	ABX Pentra 400; Easy Reader+	Ферритин, креатинин, жалпы ақуыз, глюкоза, сондай-ақ басқа да биохимиялық маркерлердің деңгейлерін анықтауға мүмкіндік береді
Иммунохимиялық жүйелер	eCL8000	Гормоналды және иммундық профильді бағалау үшін қолданылады (қажет болған жағдайда, мысалы, ілеспе жағдайларды диагностикалауда)
Ескерту: Автордың деректері негізінде жасалған (Увалиева И.М., 2025)		

Деректер жиынтығындағы әрбір жазба пациенттің жеке профилін білдіреді және 2-кестеде көрсетілген көрсеткіштерді қамтиды.

2-кесте. Деректер құрылымы

Көрсеткіштер атауы	Мәндер диапазоны
Жынысы	F - female (әйел) M - male (еркек)
Жасы	Жас топтары: <40, 40 - 49, 50 - 59, 60 >
Адам дене салмағының бойына сәйкестігін бағалау (Дене салмағының индексі, ДСИ)	Салмақ жетіспеушілігі : < 18,5 Қалыпты салмақ: 18,5 – 24,9 Артық салмақ: 25,0 – 29,9 Семіздіктің I дәрежесі: 30,0 – 34,9 Семіздіктің II дәрежесі: 35,0 – 39,9 Семіздіктің III дәрежесі: ≥ 40,0
Симптомдар	1 - бар 0 - жоқ
Глюкоза	Глюкозаның қалыпты деңгейі: <5,6 Диабеттің даму қаупі жоғары: ≥5,6 және ≤6,0 Аш қарынға гликемияның (преддиабет): ≥6,1 және ≤ 6,9 Қант диабеті (диагностика критерийлері бойынша): ≥7,0
Гемоглобин (Hb)	< 5,7 %
Гликозилденген гемоглобин (HbA1c)	Қалыпты деңгей, диабеттің даму қаупі төмен: < 5,5 % Қауіптің жоғарылауы (шекаралық жағдай): ≥ 5,5 % және ≤ 5,9 % Преддиабет, гликемияның бұзылуы: ≥ 6,0 % және ≤ 6,4 % 2 типті қант диабеті (диагностикалық деңгей): ≥ 6,5 %
Гематокрит (HCT)	Ерлер: 40-50 % Әйелдер: 36-46 %
Бір эритроциттің орташа көлемі MCV	Қалыпты: 80-100 fL Микроцитарлық анемия: MCV < 80 fL; Макроцитарлық анемия: MCV > 100 fL; Нормоцитарлық анемия: Қалыпты шегінде



2-кестенің соңы

Көрсеткіштер атауы	Мәндер диапазоны
Бір эритроциттегі гемоглобиннің орташа мөлшері (MCH)	Қалыпты: 27-33 pg Гипохромды анемия: Төмендеген MCH; Макроцитарлық анемия: Жоғарылаған MCH
Эритроциттер массасындағы гемоглобиннің орташа концентрациясы (MCHC)	Қалыпты: 32-36 г/дл Гипохромия: Төмендеген MCHC; Тұқым қуалайтын сфероцитоз: Жоғарылаған MCHC
Қанның рН-ы	Төмен: < 7.3 Жоғары немесе қалыпты рН: > 7.3
Несептегі глюкоза	Қалыпты: глюкоза табылмады; Глюкозурия: глюкоза табылды
Ферритин – организмдегі темір қорын қамтамасыз ететін ақуыз	Ерлер: 30-400 Әйелдер: 15-150 Балалар: 7-140
Тромбоциттер – қан ұю процестеріне (гемостаз) және тамырлардың жазылуына қатысатын қан пластинкалары	Қалыпты шегінде: 150-400 Тромбоцитопения (қан кету қаупі): < 150 Тромбоцитоз (қабыну, ісіктер кезінде болуы мүмкін): > 400
Ескерту: Автордың деректері негізінде жасалған (Увалиева И.М., 2025)	

Клиникалық шешімдер қабылдауды қолдау міндеттері үшін CNN моделі негізінде Grid Search әдісін қолдану алгоритмін эксперименттік зерттеу Keras және TensorFlow сияқты қажетті кітапханаларды импорттаудан басталады. Бұл кітапханалар нейрондық желілердің күрделі архитектураларын және оңтайландыру әдістерін құруға мүмкіндік береді.

Барлық қажетті кітапханалар жүктелгеннен кейін, деректер жүктеліп, соңғы деректер фреймі жасалады. Деректер фреймін жасаумен қатар, бос орындарды жою, деректерді теңестіру, деректерді біріктіру және кездейсоқ араластыру жүргізіледі, алдыңғы реттілікті жою үшін индекстер қалпына келтіріледі. Нәтижесінде:

- Диабетсіз пациенттер саны: 552336;
- Диабеті бар пациенттер саны: 15969;
- Қорытынды теңдестірілген DataFrame өлшемі: 13 бағанда 31938 жол.

Машиналық оқыту модельдерін оқыту үшін деректерді дайындау бірнеше алдын ала өңдеу кезеңдерін қамтыды. Бастапқы кезеңде бастапқы деректер жиынтығынан Diabetes мақсатты айнымалысы алынып тасталды, оның мәндері Y белгілердің бөлек векторында сақталды. Модельдеуде пайдаланылатын белгілер үшін категориялық айнымалылар One-Hot Encoding әдісі арқылы сандық форматқа түрлендірілді, бұл оларды одан әрі талдауға жарамды бинарлық индикаторлар түрінде көрсетуге мүмкіндік берді. Сандық белгілер бастапқы деректер фреймінен тікелей алынды. Осы операциялардың нәтижесі X белгілер матрицасы болды, ол сандық және кодталған категориялық деректерді біріктірді, бұл машиналық оқыту алгоритмдерін оқыту үшін ақпаратты толық ұсынуды қамтамасыз етті.

Қорытынды белгілер матрицасын қалыптастыру сандық және категориялық атрибуттарды конкатенациялаумен қатар жүрді, бұл зерттелетін нысандардың кешенді сипаттамасын жасауға мүмкіндік берді. X және Y матрицаларының өлшемдерін соңғы тексеру олардың дұрыстығын растады: жиынтық 31 938 дананы және 38 белгіні қамтыды, бұл модельдеудің кейінгі кезеңіне деректердің сәтті дайындалғанын көрсетеді. Әрі қарай, іріктеме оқу және тест іріктемелеріне бөлінді.

Модельдерді оқыту үшін кластарды теңестірудің екі тәсілі сыналды. Бірінші тәсіл кластардың теңгерімсіздігін түзетпей, бастапқы таралудағы деректерді пайдалануды



қарастырды. Екінші тәсіл Tomek Links әдісін қолдануды қамтыды, ол кластардың қиылысатын нысандарын жоюға және олардың қабаттасу дәрежесін төмендетуге бағытталған. Мұндай әдіс теңгерімсіз деректермен жұмыс істеу кезінде шуды азайтуға және жіктеу сапасын арттыруға мүмкіндік береді. Теңестіру орындалғаннан кейін деректер қайтадан оқыту және тест іріктемелеріне бөлініп, әрі қарай әртүрлі жіктеу алгоритмдерін қолдана отырып кросс-валидация жүргізілді.

Зерттеу аясында заманауи экспресс-глюкометрлерден, гематологиялық және биохимиялық анализаторлардан алынған деректер қант диабеті мен анемияны диагностикалау міндеттерін шешу үшін машиналық оқыту алгоритмдерімен өңделді. Модельдеу кезеңінде қолданылған негізгі алгоритмдер 3-кестеде көрсетілген.

3-кесте. Зерттеудің негізгі алгоритмдері

Машиналық оқыту алгоритмі	Мақсаты	Артықшылықтары
Decision Tree Classifier	Модельді ағаш түрінде құрады, мұнда әрбір түйін бір белгі бойынша шарт болып табылады, ал тармақтар – мүмкін болатын мәндер. Жапсырма түйіндері кластарға сәйкес келеді (мысалы, «анемия», «қалыпты», «диабет»).	Интерпретациялау мүмкіндігі; Жылдам оқыту; Белгілерді нормалауды қажет етпейді.
AdaBoost Classifier	Өлсіз модельдердің (әдетте бір-екі тереңдіктегі ағаштар) тізбегін құрады, олардың әрқайсысы алдыңғы қателерге назар аударады. Қорытынды шешім – барлық модельдердің өлшенген дауыс беруі.	Бір ағашпен салыстырғанда дәлдікті арттырады; Салыстырмалы түрде таза, теңдестірілген деректерде жақсы жұмыс істейді.
Random Forest Classifier	Әртүрлі кіші іріктемелердегі деректердің және белгілердің кездейсоқ кіші жиындарындағы көптеген шешім ағаштарын құрады. Қорытынды шешім – барлық ағаштардың дауыс беруі.	Жоғары дәлдік және қайта оқытуға төзімділік; Белгілердің маңыздылығын автоматты түрде бағалау; Теңгерімсіз деректермен жұмыс істейді.
Extra Trees Classifier	Көбірек кездейсоқтық енгізеді: белгілерді кездейсоқ таңдау ғана емес, сонымен қатар бөлу шектерін кездейсоқ анықтау. Бұл ағаштар арасындағы корреляцияны төмендетеді және жалпылау қабілетін арттырады.	Random Forest-қа қарағанда жылдамырақ; Үлкен деректер жиынтықтарымен жақсы жұмыс істейді; Қайта оқытуға жоғары төзімділік.
Gradient Boosting Classifier	Ағаштардың тізбегін оқытады, олардың әрқайсысы жоғалту функциясын (мысалы, log-loss) азайта отырып, алдыңғы қателерді түзетеді. AdaBoost-тан айырмашылығы, қателер бойынша градиенттік түсуді қолданады.	Өте жоғары дәлдік; Икемділік: кез келген жоғалту функциясы бойынша оңтайландыруға болады; Әртүрлі деректер түрлерімен (сандық, категориялық) жұмыс істейді.

Ескерту: Автордың деректері негізінде жасалған (Увалиева И.М., 2025)

Медициналық міндеттерде машиналық оқыту алгоритмін таңдау талдау мақсаттарымен де, деректердің сипаттамаларымен де анықталады. Базалық жіктеу үшін Decision Tree (Шешім ағашы) (қарапайымдылық және интерпретациялау мүмкіндігі) және Random Forest (Кездейсоқ орман) (тұрақтылық, жалпылау қабілеті) қолданылады. Жоғары дәлдік пен күрделі заңдылықтарды анықтауға басымдық беру Gradient Boosting-ті пайдалануды талап етеді, ал үлкен көлемдегі деректермен жұмыс істегенде, ресурстардың



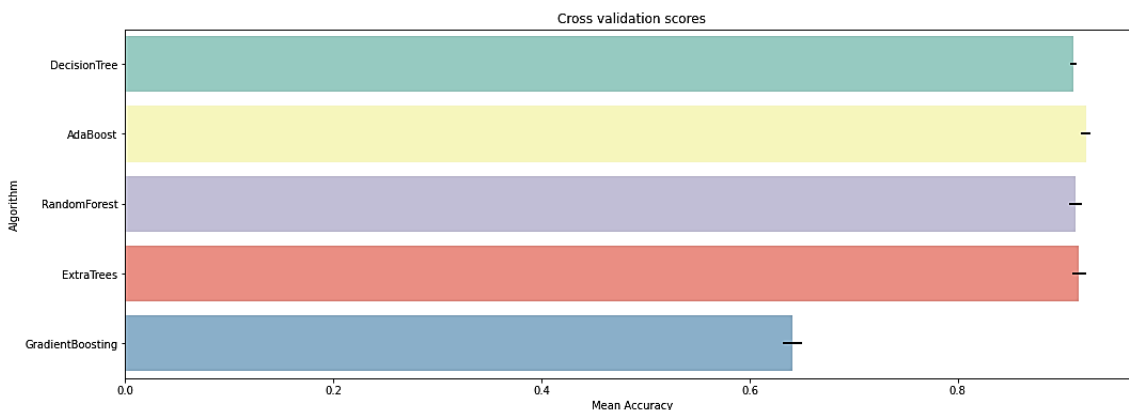
орташа шығынымен жоғары өнімділікті қамтамасыз ететін Extra Trees тиімді болып табылады. Шағын және «таза» іріктемелер үшін теңдестірілген нұсқа – AdaBoost.

Зерттеуде сонымен қатар классикалық алгоритмдер (логистикалық регрессия – интерпретацияланатын базалық модель; SVM – шағын құрылымдалған іріктемелердегі жоғары дәлдік; XGBoost – икемділік және болжау қабілеті) және нейрондық желілік тәсілдер (MLP – кестелік деректер үшін, CNN – кескіндер үшін, LSTM – уақыттық қатарлар үшін, соның ішінде глюкоза мониторингі және ЭКГ) тексерілді. Модельді таңдау деректер түріне және қажетті интерпретациялау деңгейіне байланысты болды, бұл клиникалық тәжірибеде ерекше маңызды деп Yin Y. & Bingi Y. (2023) атап өткен.

Алгоритмдердің сапасы k-fold кросс-валидация және стандартты метрикалар: Accuracy, Precision, Recall, F1-score және AUC-ROC көмегімен бағаланды. Ашықтықты арттыру үшін белгілерді интерпретациялау әдістері: ансамбльдік алгоритмдердегі (Random Forest, XGBoost) feature importance және жекелеген бақылаулар деңгейінде белгілердің үлесін сандық бағалауға мүмкіндік беретін SHAP қолданылды. Бұл тәсілдер модельдердің сапасын және олардың клиникалық қолданылуын арттыруды қамтамасыз етті, себебі дәрігер қандай параметрлер нәтижеге үлкен әсер еткенін түсінеді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

DecisionTree, AdaBoost, RandomForest, ExtraTrees және GradientBoosting алгоритмдері үшін кросс-валидация нәтижелерінің графигі ұсынылған, онда дәлдіктің орташа мәндері мен стандартты ауытқулары 2-суретте көрсетілген.



2-сурет. Кросс-валидация нәтижелерінің графигі

Ескерту: Автордың деректері негізінде жасалған (Увалиева И.М., 2025)

Кросс-валидация нәтижелеріне сәйкес, 4-кестеде ұсынылған, ағымдағы деректер жиынтығы жағдайында қай модельдердің жіктеу міндетін жақсы орындайтынын бағалауға болады.

4-кесте. Алгоритмдердің кросс-валидация нәтижелері

	CrossValMeans	CrossValerrors	Algorithm
0	0.911332	0.002996	DecisionTree
1	0.923008	0.004382	AdaBoost
2	0.913211	0.005768	RandomForest
3	0.916611	0.006340	ExtraTrees
4	0.640987	0.00891	GradientBoosting

Ескерту: Автордың деректері негізінде жасалған (Увалиева И.М., 2025)



Кросс-валидация нәтижелеріне (5-кесте, 2-сурет) сүйене отырып, келесідей қорытындылар жасауға болады:

- AdaBoost ең төменгі стандартты ауытқу (0.004382) кезінде ең жоғары орташа дәлдікті (0.923008) көрсетті, бұл модельдің тұрақтылығын растайды.
- ExtraTrees және RandomForest те орташа стандартты ауытқу мәндерінде (0.006340 және 0.005768) жоғары дәлдікті (0.916611 және 0.913211) көрсетті, бұл олардың сенімділігін және жақсы жалпылау қасиеттерін растайды.
- DecisionTree минималды стандартты ауытқу (0.002996) кезінде 0.911332 орташа дәлдікке жетті, бұл тұрақтылықты көрсеткенімен, ансамбльдік әдістерден қалыс қалды.
- GradientBoosting, керісінше, төмен орташа дәлдікті (0.640987) және жоғары стандартты ауытқуды (0.00891) көрсетті, бұл қайта оқытуды немесе деректерге жеткіліксіз бейімделуді көрсетуі мүмкін.

Ансамбльдік алгоритмдерді оңтайландыру үшін EstimatorSelectionHelper класы қолданылды, ол дәлдік (ассурасу) метрикасы бойынша бағалаумен гиперпараметрлерді толық іздеуді (Grid Search) ұйымдастырады. Алынған нәтижелер grid_searches сөздігінде сақталды, бұл оңтайлы модельдерді таңдауды автоматтандыруды, алгоритмдер мен олардың конфигурацияларын қатар салыстыру мүмкіндігін, сондай-ақ олардың өнімділігі туралы тұтас түсінік қалыптастыруды қамтамасыз етті.

5-кесте. GridSearchCV жұмысының нәтижесі

Estimator	Min Score	Mean Score	Max Score	Std Score	Лучшая конфигурация
Gradient Boosting Classifier	0.635	0.794	0.916	0.009	max_depth=9, n_estimators=500
Random Forest Classifier	0.661	0.668	0.678	0.006	max_depth=9, n_estimators=500
Extra Trees Classifier	0.640	0.645	0.654	0.006	max_depth=9, n_estimators=500
<i>Ескерту: Автордың деректері негізінде жасалған (Увалиева И.М., 2025)</i>					

Жүргізілген эксперименттер негізінде, осы деректер жиынтығы үшін классификатор параметрлерінің ең тиімді конфигурациялары туралы қорытынды жасауға болады. Атап айтқанда, GradientBoostingClassifier max_depth = 9, n_estimators = 500 және max_features = 'auto' параметрлерімен орташа және максималды дәлдік бойынша ең жақсы көрсеткіштерді көрсетті, бұл оны одан әрі қолдану және тереңдетілген тестілеу үшін перспективалы нұсқа ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Әрбір модель үшін гиперпараметрлердің әртүрлі комбинацияларымен тестілеу жүргізілді, сондай-ақ оқу және тест деректер жиынтықтарында ассурасу, F1-score, recall және precision қоса алғанда, қосымша сапа метрикалары есептелді. Айта кету керек, классификациялық есептердің алдындағы жиынтық нәтижелерде көрсетілген тест іріктемесінің дәлдігі (Test Assurasy) және басқа метрикалардың мәндері түпкілікті болып табылмайды. Дұрыс көрсеткіштер модельдердің нақты тиімділігін толық көрсететін классификация есептерінде және қателер матрицаларында ұсынылған.

Мәселен, GradientBoosting алгоритмі үшін тест деректер жиынтығында 0.92 дәлдікке (Test Assurasy) қол жеткізілді, ал оң класс үшін (True) F1-score мәні 0.91 құрады, бұл precision және recall көрсеткіштерінің теңгерімділігін көрсетеді. Бұл модель үшін қателер матрицасы оң класс үшін 116 бірінші текті қателікті (False Positive) және 669 екінші текті қателікті (False Negative) көрсетті. Ұқсас талдау барлық қалған классификаторлар үшін де жүргізілді, бұл олардың тиімділігін объективті салыстыруға мүмкіндік берді.



Жинақталған нәтижелер GradientBoosting негізгі метрикалар бойынша ең жоғары мәндерді көрсететінін дәлелдейді. Сонымен қатар, модельді іс жүзінде енгізу кезінде қателердің әртүрлі түрлері арасындағы ымыраны ескеру қажет. Атап айтқанда, клиникалық міндетке байланысты False Positive немесе False Negative қателерді азайтуға басымдық берілуі мүмкін. Қосымша, алгоритмнің есептеу ресурстарына қойылатын талаптарын және жұмыс істеу жылдамдығын ескеру қажет, бұл нақты уақыт жүйелеріне интеграциялау үшін өте маңызды. Барлық тестіленген классификаторлар үшін метрикалардың қорытынды мәндері, соның ішінде Train Accuracy, Test Accuracy, Precision, Recall және F1-score көрсеткіштері кесте 6-да келтірілген.

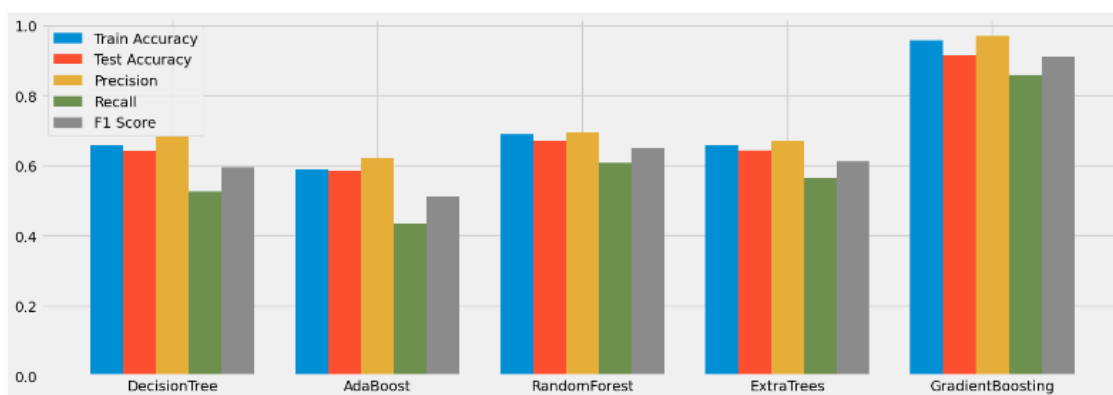
3 кесте. Әртүрлі машиналық оқыту классификаторларын бағалау нәтижелері

Model	Train Accuracy	Test Accuracy	Precision	Recall	F1 Score
DecisionTree	0,658347	0,641202	0,684453	0,526458	0,595148
AdaBoost	0,590222	0,585055	0,623501	0,433333	0,511308
RandomForest	0,688853	0,671467	0,696948	0,608958	0,649989
ExtraTrees	0,658481	0,643394	0,671887	0,563125	0,612717
GradientBoosting	0,958356	0,916301	0,970132	0,859375	0,911401

Ескерту: Автордың деректері негізінде жасалған (Увалиева И.М., 2025)

GradientBoostingClassifier алгоритмі тестіленген модельдер арасында жіктеу міндетін шешу үшін ең тиімді болып табылатындығын көрсете отырып, барлық негізгі метрикалар бойынша ең жақсы нәтижелерді көрсетті. Бұл алгоритм дәлдік, толықтық және F1-score көрсеткіштері арасындағы оңтайлы теңгерімді қамтамасыз етті, бұл оның жоғары тұрақтылығын және күрделі, мультифакторлы деректерді барабар өңдеу қабілетін растайды.

3-суретте бес классификаторды: DecisionTree, AdaBoost, RandomForest, ExtraTrees және GradientBoosting салыстырмалы бағалау нәтижелері ұсынылған. Әрбір алгоритм үшін келесі көрсеткіштер есептелді және талданды: оқыту деректер жиынтығындағы дәлдік (Train Accuracy), тест деректер жиынтығындағы дәлдік (Test Accuracy), сондай-ақ Precision, Recall метрикалары және F1-score интегралдық көрсеткіші. Салыстырмалы талдау жеке модельдермен (мысалы, DecisionTree) салыстырғанда неғұрлым жоғары тұрақтылық пен болжау қабілетін көрсететін ансамбльдік әдістердің артықшылықтарын анықтауға мүмкіндік береді.



3-сурет. Таңдалған машиналық оқыту алгоритмдері үшін
әртүрлі сапа метрикаларын салыстыру графигі

Ескерту: Автордың деректері негізінде жасалған (Увалиева И.М., 2025)



GradientBoostingClassifier алгоритмі тестіленген модельдер арасында сенімді түрде ерекшеленіп, сапаны бағалаудың барлық бес метрикасы бойынша ең жоғары мәндерді көрсетті. Бұл оның тиімді жалпылауға және жаңа іріктемелерде дұрыс болжауға қабілеттілігін растайды, бұл оны қойылған жіктеу міндетін шешу үшін ең қолайлы нұсқа етеді.

DecisionTree және AdaBoost модельдері салыстырмалы нәтижелер көрсетті, бұл ретте AdaBoost біршама әлсіздеу болды. RandomForest және ExtraTrees алгоритмдері де бір-біріне жақын көрсеткіштерді көрсетті, алайда олардың жіктеу сапасы GradientBoosting нәтижелерінен төмен болды. Эксперимент заманауи глюкометрлерден, гематологиялық және биохимиялық анализаторлардан алынған деректерді талдау кезінде машиналық оқытудың ансамбльдік әдістерінің жоғары тиімділігін растады.

Кросс-валидация кезеңінде AdaBoost ең жақсы нәтижелерді көрсетті, ол төмен стандартты ауытқумен (0.0044) орташа 0.923 дәлдікке жетті, бұл оның әртүрлі кіші іріктемелермен жұмыс істеу кезіндегі тұрақтылығын көрсетеді. Алайда, Grid Search көмегімен гиперпараметрлерді оңтайландырғаннан кейін GradientBoosting көпбасшылыққа шығып, тест іріктемесінде 0.92 дәлдікті және 0.91 F1-score мәнін көрсетті.

Қателер матрицаларын талдау GradientBoosting-тің бірінші және екінші текті қателердің минималды мөлшерін жіберетінін анықтады, бұл жалған оң және жалған теріс нәтижелердің салдары өте ауыр болуы мүмкін медициналық міндеттерде критикалық маңызға ие. Осылайша, оңтайландырылған GradientBoosting моделі дәлдік, толықтық және жіктеу тұрақтылығының ең жақсы үйлесімін көрсетеді, бұл оны іс жүзінде енгізу үшін ең перспективалы етеді.

Алынған нәтижелер ансамбльдік әдістердің, атап айтқанда градиентті бустингтің гематологиялық және биохимиялық деректер негізінде ауруларды диагностикалаудағы жоғары тиімділігін көрсететін заманауи зерттеулермен сәйкес келеді. Әдебиетте GradientBoosting-тің шуларға және лақтырылып тастауларға (выброс) төзімділігі, тіпті шектеулі іріктемелерде тиімді жұмыс істеу қабілеті, сондай-ақ оңтайлы нәтижелерге қол жеткізу үшін гиперпараметрлерді мұқият баптау қажеттілігі атап өтіледі. Бұл заңдылықтар осы зерттеу аясында да расталды, бұл белгілі тәсілдердің қойылған міндет үшін қайталану мүмкіндігін және қолданылуын көрсетеді.

Әзірленген модельді іс жүзінде енгізу перспективалары экспресс-анализаторлардан алынған деректерді машиналық оқыту алгоритмдерімен интеграциялау мүмкіндігімен байланысты. Бұл қант диабеті мен анемияларды диагностикалаудың дәлдігін арттыруға, скрининг пен мониторинг процесін жеделдетуге, сондай-ақ медициналық персоналға түсетін жүктемені азайтуға мүмкіндік береді. Мұндай шешімдерді медициналық ақпараттық жүйелерге және мобильді қосымшаларға енгізу жекелендірілген медицина және пациенттердің жағдайын қашықтықтан бақылау қағидаттарын іске асыруға мүмкіндік береді. Модельдің күнделікті зертханалық көрсеткіштерді өңдеудегі жоғары дәлдігі оны ресурстар мен уақыт көбінесе шектеулі болатын бастапқы медициналық-санитарлық көмек буыны үшін ерекше құнды етеді.

Сонымен қатар, зерттеудің бірқатар шектеулері бар. Біріншіден, іріктеме көлемі мен әртүрлілігі бойынша шектеулі, бұл нәтижелерді әртүрлі этникалық, жас және клиникалық профилі бар кеңірек популяцияларға экстраполяциялауды қиындатады. Екіншіден, деректер глюкометрлер мен анализаторлардың нақты модельдерін пайдалану арқылы алынды, бұл нәтижелердің басқа өндірушілердің құрылғыларына ауыстырылуын төмендетеді. Үшіншіден, талдау офлайн режимінде орындалды, және алгоритмдерді нақты уақыт жүйелеріне интеграциялау мүмкіндіктері әлі зерттелмеген, дегенмен дәл осы аспект практикалық қолдану үшін негізгі болып табылады.

Сонымен қатар, зерттеудің басты назары жіктеу дәлдігіне аударылды, ал клиникалық тәжірибеде басымдыққа ие болатын нақты мақсаттар, мысалы, жүкті әйелдердегі немесе



созылмалы аурулары бар пациенттердегі анемияны диагностикалау кезінде жалған теріс нәтижелердің санын азайту болуы мүмкін.

ҚОРЫТЫНДЫ

Медициналық жабдықтардан алынатын деректерді машиналық оқыту алгоритмдерімен интеграциялау қант диабеті мен анемияны автоматтандырылған, жылдам және дәл диагностикалау үшін жаңа мүмкіндіктер ашады. Мұндай тәсіл ауруларды ерте сатыларда анықтаудың тиімділігін арттырып қана қоймай, емдеудің жекелендірілген стратегияларын қалыптастыруға және пациенттердің жағдайын клиникалық жағдайларда да, үйде де неғұрлым сапалы бақылауды қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Жүргізілген зерттеу заманауи экспресс-глюкометрлердің, гематологиялық және биохимиялық анализаторлардың деректерін машиналық оқыту алгоритмдерімен біріктіру диагностика дәлдігін айтарлықтай арттыратынын көрсетті. Ең жақсы нәтижелерді GradientBoosting моделі көрсетті, ол гиперпараметрлерді оңтайландырылғаннан кейін 0.92 дәлдікке және 0.91 F1 score мәніне жетті, бұл қалған алгоритмдерден барлық негізгі метрикалар бойынша басым болды.

Әзірленген жүйе патологиялық жағдайларды ерте кезеңдерде анықтауға, клиникалық шешімдерді қолдау құралы ретінде қызмет етуге, сондай-ақ телемедицина және бастапқы медициналық-санитарлық көмек буыны шеңберінде қолданылуға қабілетті. Бұл медициналық ресурстардың тапшылығы және созылмалы ауруларды үздіксіз бақылау қажеттілігі жағдайында ерекше маңызды.

Сонымен қатар, зерттеудің бірқатар шектеулері бар: іріктеменің салыстырмалы түрде шағын және біртекті емес құрамы, анализаторлардың нақты модельдеріне тәуелділік, сондай-ақ жүйені нақты уақыт режимінде тестілеудің болмауы. Алдағы уақытта деректер базасын кеңейту, клиникалық ақпараттық жүйелермен интеграциялау және шешімдерді жабдықтардың әртүрлі түрлеріне бейімдеу қажет.

Осылайша, жұмыс нәтижелері медициналық құрылғылар мен жасанды интеллект алгоритмдерінің мүмкіндіктерін біріктіретін интеллектуалды диагностикалық жүйелерді құрудың жоғары әлеуетін көрсетеді, бұл медициналық көмектің сапасы мен қолжетімділігін арттыруға жол ашады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитеті гранттық қаржыландыру шеңберінде қаржыландырылады (грант No AP19679525 «Электрондық денсаулық паспортына арналған клиникалық-гематологиялық синдромдарды диагностикалаудың бағдарламалық кешені»).

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар экспресс-глюкометрлерді, гематологиялық және биохимиялық анализаторларды таңдауда және пайдалануда көрсеткен көмегі үшін «А-Медикал» ЖШС техникалық мамандарына алғыс білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Farooqi, M., Tahir, Y., & Rehan, B. (2022). Anemia in Patients with Type 2 Diabetes: A Common but Neglected Clinical Finding. *Acta Bio-medica: Atenei Parmensis*, 93(1), e2022044-e2022044. <https://doi.org/10.23750/abm.v93i1.11204>
- Liu, J., Bai, R., Chai, Z., Cooper, M. E., Zimmet, P. Z., & Zhang, L. (2022). Low-and middle-income countries demonstrate rapid growth of type 2 diabetes: an analysis based on Global Burden of Disease 1990–2019 data. *Diabetologia*, 65(8), 1339-1352. <https://doi.org/10.1007/s00125-022-05713-6>



- Iolascon, A., Andolfo, I., Russo, R., Sanchez, M., Busti, F., Swinkels, D., ... & from EHA-SWG Red Cell and Iron. (2024). Recommendations for diagnosis, treatment, and prevention of iron deficiency and iron deficiency anemia. *Hemasphere*, 8(7), e108. <https://doi.org/10.1002/hem3.108>
- Crasto, W., Patel, V., Davies, M. J., & Khunti, K. (2021). Prevention of microvascular complications of diabetes. *Endocrinology and metabolism clinics of North America*, 50(3), 431-455. <https://doi.org/10.1016/j.ecl.2021.05.005>
- Pittas, A. G., Kawahara, T., Jorde, R., Dawson-Hughes, B., Vickery, E. M., Angellotti, E., ... & Balk, E. M. (2023). Vitamin D and risk for type 2 diabetes in people with prediabetes: a systematic review and meta-analysis of individual participant data from 3 randomized clinical trials. *Annals of internal medicine*, 176(3), 355-363. <https://doi.org/10.7326/M22-301>
- AlFalasi, S. M., Abdouli, K. A., & Aldashti, N. A. (2024). Association of anemia and diabetic retinopathy among patients with type 2 diabetes mellitus: retrospective cross-sectional study. *Cureus*, 16(8). <https://doi.org/10.7759/cureus.67995>
- Brittenham, G. M., Moir-Meyer, G., Abuga, K. M., Datta-Mitra, A., Cerami, C., Green, R., ... & Atkinson, S. H. (2023). Biology of anemia: a public health perspective. *The Journal of nutrition*, 153, S7-S28. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2023.07.018>
- Neumann, G., & Kawaoka, Y. (2023). Which Virus Will Cause the Next Pandemic? *Viruses*, 15(1), 199. <https://doi.org/10.3390/v15010199>
- Kubihal, S., Goyal, A., Gupta, Y., & Khadgawat, R. (2021). Glucose measurement in body fluids: a ready reckoner for clinicians. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 15(1), 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2020.11.021>
- Jain, P., Joshi, A. M., Mohanty, S. P., & Cenkeramaddi, L. R. (2024). Non-invasive glucose measurement technologies: Recent advancements and future challenges. *IEEE Access*, 12, 61907-61936. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3389819>
- Deberneh, H. M., & Kim, I. (2021). Prediction of type 2 diabetes based on machine learning algorithm. *International journal of environmental research and public health*, 18(6), 3317. <https://doi.org/10.3390/ijerph18063317>
- Mousa, A., Mustafa, W., & Marqas, R. B. (2023). A comparative study of diabetes detection using the Pima Indian diabetes database. *Methods*, 7, 8. <https://doi.org/10.26682/sjuod.2023.26.2.24>
- Ramzan, M., Sheng, J., Saeed, M. U., Wang, B., & Duraihem, F. Z. (2024). Revolutionizing anemia detection: integrative machine learning models and advanced attention mechanisms. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 7(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s42492-024-00169-4>
- Geukes Foppen R.J., Gioia V., Gupta S., Johnson C.L., Giantsidis J., Papademetris M. (2025). Methodology for Safe and Secure AI in Diabetes Management. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 19(3):620-627. <https://doi.org/10.1177/19322968241304434>
- Mitra, U., Sarkar, P., Mondal, J., & Kundu, J. (2025, February). Enhancing Interpretability in Diabetics Prediction: A Comparative Study of SHAP, LIME and Permutation Feature Importance. In *2025 AI-Driven Smart Healthcare for Society 5.0* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF64992.2025.10962890>
- Cournoyer, A., Deschamps, A., Bau-Gaudreault, L., Dubreuil, P., & Benoit-Biancamano, M. O. (2022). Analytical validation of a portable human Accu-Chek glucometer in honeybee hemolymph. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 34(5), 789-795. <https://doi.org/10.1177/104063872211172>
- Jain, P., Joshi, A. M., Mohanty, S. P., & Cenkeramaddi, L. R. (2024). Non-invasive glucose measurement technologies: Recent advancements and future challenges. *IEEE Access*, 12, 61907-61936. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3389819>



- Daves, M., Roccaforte, V., Lombardi, F., Panella, R., Pastori, S., Spreafico, M., ... & Piccin, A. (2024). Modern hematology analyzers: beyond the simple blood cells count (with focus on the red blood cells). *Journal of Laboratory and Precision Medicine*, 9. <https://doi.org/10.21037/jlpm-23-32>
- Gómez, J. G., Parra Urueta, C., Álvarez, D. S., Hernández Riaño, V., & Ramirez-Gonzalez, G. (2025). Anemia Classification System Using Machine Learning. *Informatics*, 12(1), 19. <https://doi.org/10.3390/informatics12010019>
- Yin, Y., & Bingi, Y. (2023). Using machine learning to classify human fetal health and analyze feature importance. *BioMedInformatics*, 3(2), 280-298. <https://doi.org/10.3390/biomedinformatics3020019>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Хасенова Зарина Толеубековна – PhD, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
Хасенова Зарина Толеубековна – PhD, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Khasenova Zarina Toleubekovna – PhD, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: zthasenova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1417-7793>



Увалиева Индира Махматовна – PhD, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
Увалиева Индира Махматовна – PhD, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Uvaliyeva Indira Makhmutovna – PhD, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: iuvaliyeva@ektu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2117-5390>



Мукашева Роза Урумкановна – техника ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Мукашева Роза Урумкановна – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Mukasheva Roza Urumkanovna – Candidate of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: mukashevaru@mai.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4722-4576>



Букунова Альмира Шошановна – медицина ғылымдарының кандидаты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Букунова Альмира Шошановна – кандидат медицинских наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Bukunova Almira Shoshanovna – Candidate of Medical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: ABukunova@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8892-4248>



Кәрімқызы Бекзат – экономика ғылымдарының магистрі, «А-Медикал» ЖШС, Алматы, Қазақстан

Каримкызы Бекзат – магистр экономических наук, ТОО «А-Медикал», г. Алматы, Казахстан

Karimkyzy Bekzat – Master of Economic Sciences, LLP «A-Medical», Almaty, Kazakhstan,

e-mail: bekzastana@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4696-7927>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_268

IRSTI 28.23.13

MODERN TECHNOLOGIES AND SOFTWARE SOLUTIONS FOR WORKING WITH BAYESIAN NETWORKS

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С БАЙЕСОВСКИМИ СЕТЯМИ

БАЙЕС ЖЕЛІЛЕРІМЕН ЖҰМЫС ІСТЕУГЕ АРНАЛҒАН ЗАМАНАУИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР МЕН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ШЕШІМДЕР

A. Shayakhmetova ^{1*}, A. Abdildayeva ¹, A. Akhmetova ¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: Assem Shayakhmetova, e-mail: asemshayakhmetova@mail.ru

Keywords:

modern algorithms, software products, software defect prediction, Bayesian network classification, machine learning.

ABSTRACT

This article examines the study of the modern market of algorithms and software products for working with Bayesian networks. One of the most important problems is the prediction of software flaws, which seems to be a necessary area in software development, because it helps creators to detect and eliminate difficulties before they turn into costly and difficult to implement errors. Early detection of software flaws focuses on saving time and money in the software development process and guarantees the nature of the final product. The purpose of this study is to analyze three algorithms of Bayesian network theory to classify whether a project is subject to defects. The selection is based on the fact that the most commonly used layout in the literature is naive Bayesian, but no Bayesian networks are used in any work. Thus, K2, Hill Climbing and TAN are used to build Bayesian networks. The results of various performance indicators used for cross-validation show that the results of systematization are comparable to a tree of conclusions and a disorderly forest, with the advantage that Bayesian algorithms show the least variability, which orients the technical software to have tremendous reliability in its forecasts, because the selection of training and testing information does not give unstable results.

Түйінді сөздер:

заманауи алгоритмдер, бағдарламалық өнімдер, бағдарламалық жасақтама ақауларын болжау, Байес желілері, классификация, Машиналық оқыту.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада Байес желілерімен жұмыс істеуге арналған алгоритмдер мен бағдарламалық өнімдердің заманауи нарығын зерттеу қарастырылады. Ең маңызды мәселелердің бірі-бағдарламалық жасақтаманың кемшіліктерін болжау, бұл бағдарламалық жасақтаманы әзірлеудің қажетті саласы болып көрінеді, өйткені ол әзірлеушілерге қымбат және қиын қателіктерге айналғанға дейін қиындықтарды анықтауға және шешуге көмектеседі. Бағдарламалық жасақтама ақауларын ерте анықтау бағдарламалық жасақтаманы әзірлеу кезінде уақыт пен ақшаны үнемдейді және соңғы өнімнің сапасына кепілдік береді. Бұл зерттеудің мақсаты-жобада ақаулар бар-жоғын анықтау үшін Байес желілері теориясының үш алгоритмін талдау. Таңдау әдебиетте ең



көп қолданылатын схема аңғал Байес желісіне негізделген, бірақ ешқандай жұмыста Байес желілері қолданылмайды. Осылайша, K2, Hill Climbing және TAN Байес желілерін құру үшін қолданылады. Қиылыспалы тексеру үшін қолданылатын әр түрлі тиімділік көрсеткіштерінің нәтижелері жүйелеу нәтижелерін қорытынды ағашпен және ретсіз орманмен салыстыруға болатындығын көрсетеді, өйткені Байес алгоритмдері ең аз өзгергіштікті көрсетеді, бұл техникалық бағдарламалық жасақтаманы өз болжамдарында үлкен сенімділікке бағыттайды, өйткені оқыту мен тестілеу әдістерін таңдау олардың қаншалықты тиімді жұмыс істейтініне байланысты ақпарат тұрақсыз нәтиже бермейді.

Ключевые слова:

современные алгоритмы,
программные продукты,
прогнозирование
дефектов программного
обеспечения, байесовские
сети, классификация,
машинное обучение

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается изучение современного рынка алгоритмов и программных продуктов для работы с байесовскими сетями. Одной из наиболее важных проблем является прогнозирование недостатков программного обеспечения, что, по-видимому, является необходимой областью в разработке программного обеспечения, поскольку помогает разработчикам обнаруживать и устранять трудности до того, как они превратятся в дорогостоящие и трудноосуществимые ошибки. Раннее выявление дефектов программного обеспечения позволяет сэкономить время и деньги в процессе разработки программного обеспечения и гарантирует качество конечного продукта. Цель этого исследования - проанализировать три алгоритма теории байесовских сетей, чтобы определить, есть ли в проекте дефекты. Выбор основан на том факте, что наиболее часто используемой в литературе схемой является наивная байесовская сеть, но ни в одной работе байесовские сети не используются. Таким образом, K2, Hill Climbing и TAN используются для построения байесовских сетей. Результаты различных показателей эффективности, используемых для перекрестной проверки, показывают, что результаты систематизации сравнимы с деревом выводов и беспорядочным лесом, с тем преимуществом, что байесовские алгоритмы демонстрируют наименьшую вариабельность, что ориентирует техническое программное обеспечение на огромную надежность в своих прогнозах, поскольку выбор методов обучения и тестирования зависит от того, насколько эффективно они работают и информация не дает нестабильных результатов.

INTRODUCTION

The existence of software flaws seems to be a huge inconvenience and inconsistency in the development and maintenance of software, therefore having a negative impact on the property of the software. It is impossible to detect software that does not include defects, even despite the scrupulous course of software development. That's why checking software supply seems to be a crucial step in the software development lifecycle, because it is a way to avert or even repair conceivable software outages before it activates to function. However, the process associated with software testing is naturally complicated, because it requires excellent planning and the greatest number of resources (Meiliana, S.K., Karim, S., Warnars, H.L, Gaol, F.L., Abdurachman, E., Soewito, B., 2022). Software supply deficiencies dramatically affect productivity, quality, costs, and user satisfaction. Some of the mostly common results of the presence of a large number of software damages include delays in product delivery, unnecessary or sudden expenses, poor



overall user experience, loss of customer confidence, and even security difficulties. All these consequences show a relaxed impact on the quality of the software.

The purpose of this study is to analyze three Bayesian network theory algorithms and apply them to early detection of software defects, which saves time and money during the development process.

The novelty of the research lies in the comparative analysis of the K2, Hill Climbing and TAN algorithms for building Bayesian networks in the problem of software defect prediction. The paper uses formal statistical methods to assess the stability and reliability of models, which increases the scientific validity of the results. Bayesian algorithms are also highly resistant to the variability of training data, which is especially important for limited and incomplete samples.

LITERATURE REVIEW

Taking into account the adverse consequences that appear when software flaws are detected at the last stages of software development, a software defect modeling site (SDP) appears, “in which a modeling modification is formed in order to predict existing software interruptions based on significant data” Therefore, the prediction of flaws is necessary to identify probably insufficient modules in the software in order to it may have been relevant to acquire an effective, an error-free software product with a not very high cost. When it is possible to detect modules subject to defects, it would be possible to allocate money and human resources to prevent unexpected costs. Developing a modification for modeling software flaws is not an easy task. Actually, artificial intelligence plays a role here, using machine learning algorithms (ML), possibly helping to develop software to predict the shortcomings of software provision at early stages. The article (Hammanouri, A., Hammad, M., Alnabhan, M., Alsarayrah, F., 2018) discusses individual classifiers based on machine learning algorithms, such as naive Bayes (NB), inference trees (DT) and artificial neural networks (ANN) for modeling software flaws.

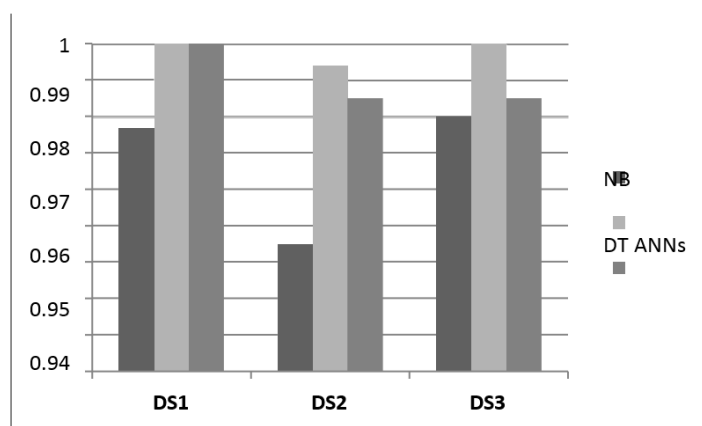


Figure 1. F-measurement values for the ML algorithms used in three data sets [2]

Note – taken from (Hammanouri, A., and all., 2018)

To compare the three classifiers in terms of memorization features and accuracy, we used the F-measure property. Figure 1 shows the F-measure values for the ML algorithms used in three data sets. As shown in the figure, DT has the most exalted property of F-measure in all data sets, followed by ANS, then the classifiers of NB.

There are some alternatives that can provide the best results in terms of accuracy, such as algorithms based on Bayesian approaches that “solve many issues in different areas; from disease prediction/patient treatment to analysis of genetic maps or expression analysis” (Misirli, A., Bener, A.B., 2014).

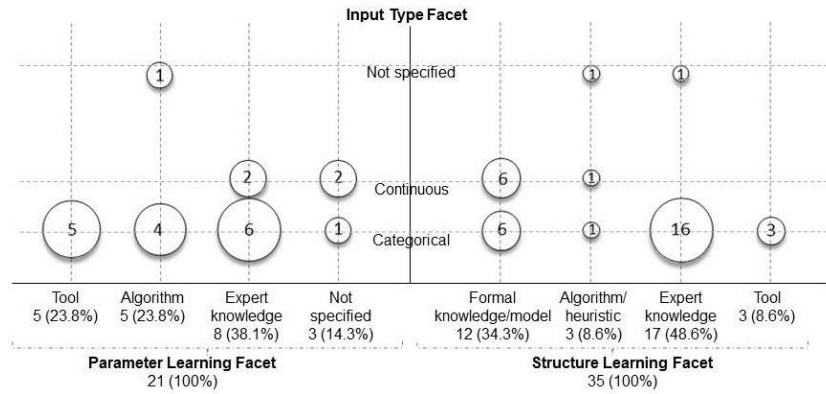


Figure 2. Bubble graph summarizing the classification results [3]

Note – taken from (Misirli, A., and all., 2014)

Figure 2 presents a bubble graph proving the result of this cartographic study on modeling software features. Filtering studies using only one way to study the structure and parameters, and plotting the relationship between the three aspects.

It is mentioned in (Herzing, K., Just, S., Zeller, A., 2013) that during a manual study of seven thousand reviews of problems from the databases of errors provided by five open source plans, it was found that 33.8% of all reports were unnaturally classified because there were no defects in them, but instead they referred to a new function, development or refactoring. Consequently, this affected the prediction of software flaws, because it depends on the properties of the data being evaluated. When the real information is incorrect, it is only possible to achieve an elevated percentage of prediction accuracy. Considering all of the above, it attempts to study the productivity and reliability of algorithms based on Bayesian networks (poorly studied algorithms), which allow a software engineer to be more convinced when making estimates and delivering a better product.

Table 1. Impact of misclassified issuerReports on mapping strategies and approaches

[illegible]

In (Hernández-Molinos M.J., Sánchez-García Á.J., Barrientos-Martínez R.E., 2021) 38 studies were presented on predicting software flaws for analyzing mainly used approaches and classification algorithms in this area. This study shows that the most used approaches are composite algorithms, such as Random Forest (Li R. Zhou, L. Zhang S., Liu H., Huang X., Sun Z., 2019; Aydin Z.B.G., Samli, R., 2020), followed by other algorithms, such as AdaBoost (Goyal S., 2020) and Bagging (Aljamaan H., Alazba A., 2020), among others.

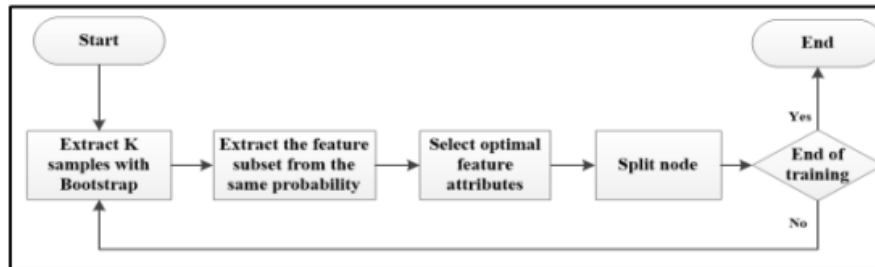


Figure 3. The approaches used are composite algorithms [6,7,8,9]

Note – taken from (Goyal S., 2020)

The Unexpected Forest algorithm is an ensemble algorithm that can be generated in parallel. The key idea of RF is to use the conclusion tree as a basic classifier, the concept of many conclusion trees using Bootstrap technology, and then enter the samples provided for classification, giving the final results of systematization through voting. It is possible to see that the advantages of the RF algorithm are mainly contained in the excellent strength of the noise values and the missing information about the values in the data sets of the software prediction of defects, and the RF algorithm has a bad scalability of the systematization of the modeling of disadvantages for the provided high dimensionality. Figure 4 shows the course of studying a single tree of conclusions of a disordered forest. At the same level as the latter approach, approaches based on Bayes' theorem were also conditioned. Although they all used the naive Bayes algorithm and its variants (Ge J., Liu J., Liu W. 2018; Prahba C.L., Shivahumar N., 2020).

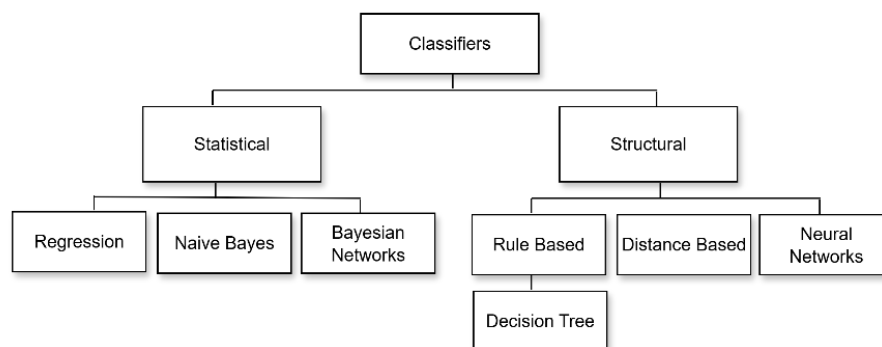


Figure 4. Naive Bayes algorithm and its variants

Note – taken from (Ge J., and all., 2018)

There are also some approaches, such as decision trees; in particular, C4.5 is the algorithm that has been reported the most (Ge J., Liu J., Liu W., 2018). In addition, there are various more elementary classifiers, such as the method of support vectors (Ahmed M.R., Ali M.A., Ahmed N., Zamal M.F.B., Shamrat F.M.J.M., 2020), K-nearest neighbor (Zhou Y., Shan C., Sun S., Wei S., Zhang S., 2019) and logistic regression (Nehi M.M., Fakhropoor Z., Moosavi M.R., 2018; El-Shorbagy S.A., El-Gammal W.M., Abdelmoez W.M., 2018).

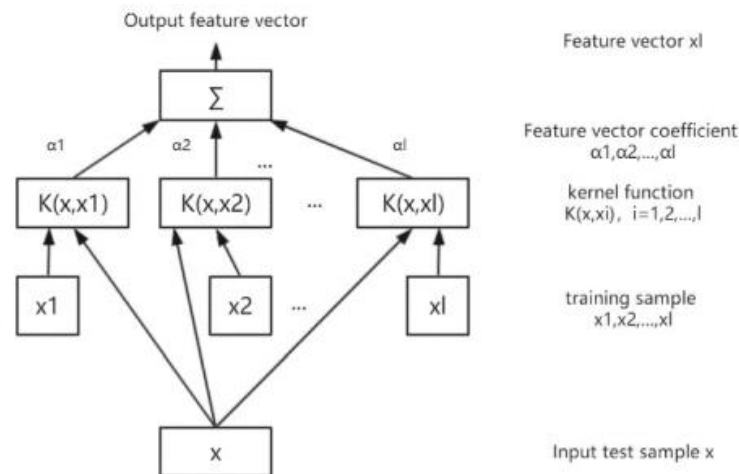


Figure 5. K is the nearest neighbor

Note – taken from (Nehi M.M. and all., 2018)

More recently, some works have been found in which all possible approaches are equal (Bhutapuram U.S., Sadam R., 2022; Goyal S., 2022). These comparisons are laid in the key between assembly methods, where classification is done with the support of many algorithms, and technologies with traditional approaches. There are even such works as (Goyal S., 2022), where they experiment with different versions of the algorithm, such as the main vector machine (SVM).

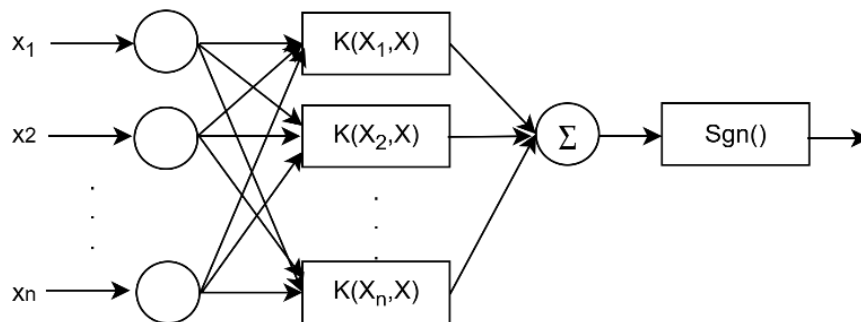


Figure 6. The principle of systematization of KPCA-SVM modification

Note – taken from (Goyal S., 2022)

The principle of systematization of the KPCA-SVM modification is shown in Fig. 6 represents the selection point after the size reduction, and K represents the kernel function.

First, a sample of a reduced dimension indicates the input function of the kernel and is compared with a location of a huge dimension. Subsequently, a suitable hyperplane of classification is found and the result is introduced.

The purpose of this study is to study the modern market of algorithms and software products for working with Bayesian networks.

MATERIALS AND METHODS

As shown in the works listed in Table 1, most of the works demonstrate an exceptionally perfect result. This is important because the machine learning algorithms used can be impressionable to training information and do everything in comparison with test data. When the test data is



identical to the original training data, the best results will be obtained. According to this factor, it is necessary to notify about the performance of classification algorithms. Thus, the reliability of the classification algorithm is not only sufficient, but it is also resistant to various data sets. Cross-validation operations are simply used to create models with different training inputs from a dataset and evaluate them using a variety of test subsets of the dataset that are not used for training.

Table 1. Summary and comparison of our research with current recent research (NR = Not reported, DT = Decision Tree, EM = Ensemble Methods, NB = Naive Bayes, NN = Neural Networks, KNN = K-nearest neighbor, SVM = Support Vector Machine, LR = Logistic regression and BN = Bayesian network)

Ref	Year	Approaches Used	Bayesian Networks Use	Performance Analysis	Comparison with Other Similar Approaches or Variants	Comparison with Other Approaches
Li R. Zhou, L. Zhang S., Liu H., Huang X., Sun Z.	2019	DT, EM	NO	NO	YES	YES
Aydin Z.B.G., Samli, R.	2020	DT, EM	NO	NO	NO	YES
Aljamaan H., Alazba A.	2020	EM	NO	YES	YES	NO
Ge J., Liu J., Liu W.	2018	NB, DT, EM, SVM	NO	NO	NO	YES
Prahba C.L., Shivahumar N.	2020	NB, DT, NN	NO	YES	NO	YES
Ahmed M.R., Ali M.A., Ahmed N., Zamal M.F.B., Shamrat F.M.J.M.	2020	DT, NB, LR, EM, SVM	NO	NO	NO	YES
Zhou Y., Shan C., Sun S., Wei S., Zhang S.	2019	SVM	NO	YES	YES	NO
El-Shorbagy S.A., El-Gammal W.M., Abdelmoez W.M.	2018	EM, NN, DT	NO	NO	NO	YES
Bhutamapuram U.S., Sadam R.	2022	LR, SVM, KNN, NN, NB	NO	NO	NO	YES
Goyal S.	2022	NN, NB	NO	NO	NO	YES
Malhotra R., Meena S.	2022	LR, DT, EM	NO	NO	NO	YES
Goyal S.	2022	SVM	NO	YES	YES	NO
Our Research	2023	BN, EM, DT	YES	YES	YES	YES

Note – compiled by the author based on data from Zhou Y., and all. (2019)



A different situation, which can be seen in Table 1, is contained in the fact that there are unequal versions of the same algorithm; although a universal version is naturally attached. Finally, when evaluating an algorithm using a conditional layout (such as a decision tree, ensemble technologies, or KNN, among others), comparisons with other approaches are not reported in many variants. Finally, the application of Bayesian networks was not found in any cited work, but the correct naive Bayes algorithm was found. We assume that the limited use of Bayesian networks in software development may be caused by a possible flaw in familiarity with this particular approach. However, this path has many advantages.

The main contribution of our study is summarized below:- In this paper, we empirically investigate the consequences of using classification algorithms based on Bayes' theorem, which are not described in the literature, when predicting software flaws, in particular, various methods of Bayesian network theory. All of the above is intended to give software engineers some strategies for modeling software flaws in their projects.- the selection of Bayesian networks is based on the fact that it is not only good for software engineers and testers to know the property of the class variable, but in addition it is essential to know the characteristic to which they should pay more attention. In addition, some algorithms, such as KNN or Random Forest, do not express variables that have the greatest impact on solving classification problems.- these studies were done in the well-known public repository PROMISE in order to work out the results renewable and comparable.- We conduct a statistical comparison of tests produced by the method of cross-testing (10-fold, as is usually done in the literature) in order to know the productivity of algorithms by comparison with a variety of initial studies and testing. These comparisons allow us to see the best and worst results, that is, how variable their indicators are.- We also compare the methods recommended in the experiment with two approaches listed in the literature: J48 (the approach of decision trees) and Random Forest (the approach of ensemble algorithms).- the comparison in this article does not cover the accuracy coefficient, since it measures only a part of well-systematized records among the total number of tests. This is important because the class values in the information sets are unbalanced, and a simple application of the correctness indicator will lead to a shift in the totals towards the class value, which is reflected mostly often. We use indicators such as recall, reliability and F1-measure, which measure all sorts of nuances of model performance.- Along with the results, a discussion was presented, allowing to coordinate the reliability and reliability of all kinds of tested methods.- this work is important because the software flaw prediction section allows the creators and managers of plans to know when the concept can be released, reducing the use of unexpected resources and improving the overall user experience by reducing the number of defects.

Table 2 shows the indicators used to evaluate the performance of classifiers and their results, among which the following are emphasized: accuracy, recall, F1-measure, thoroughness and area under the curve. This is important because the optimal productivity of the algorithm depends on the metric used, and it is essential to value it with the support of a variety of metrics, since they measure a variety of performance. In addition, some of them mitigate such problems as class imbalance or retraining. According to this factor, mainly known indicators were preferred to evaluate the results of the study. However, as shown in Table 2, numerous related works are focused exclusively on recreating the correctness of the proposal with the support of one indicator. This is somewhat suspicious, because the nature of the information means that, depending on the class, all kinds of indicators must be applied, not just percentage accuracy.

In addition, table 2 shows that many studies do not mention the model validation method. This is important because the selection of data for training and testing models affects the results obtained.



Table 2. A brief description of the indicators and verification methods reported in a recent study (NR = not reported)

Ref	Data Set	Cross Validation	Best Approach	Accuracy	Recall	F1-Measure
Li R. Zhou, L. Zhang S., Liu H., Huang X., Sun Z.	CM1	10-fold	Random Forest/Sampling	NR	NR	0.92
Li R. Zhou, L. Zhang S., Liu H., Huang X., Sun Z.	JM1	10-fold	Random Forest/Sampling	NR	NR	0.85
Li R. Zhou, L. Zhang S., Liu H., Huang X., Sun Z.	KC1	10-fold	Random Forest/Sampling	NR	NR	0.87
Aydin Z.B.G., Samli, R.	CM1	10-fold	Random Forest	0.97	0.97	0.97
Aydin Z.B.G., Samli, R.	JM1	10-fold	Random Forest	0.81	0.81	0.77
Aydin Z.B.G., Samli, R.	KC1	10-fold	Random Forest	0.83	0.85	0.83
Goyal S.	CM1	NR	Ada Boost	0.87	NR	NR
Goyal S.	JM1	NR	Ada Boost	0.89	NR	NR
Goyal S.	KC1	NR	Ada Boost	0.85	NR	NR
Zhou Y., Shan C., Sun S., Wei S., Zhang S.	CV1	10-fold	Support Vector Machine	0.88	0.89	0.82
Zhou Y., Shan C., Sun S., Wei S., Zhang S.	JM1	10-fold	Support Vector Machine	0.81	0.82	0.79
Zhou Y., Shan C., Sun S., Wei S., Zhang S.	KC1	10-fold	Support Vector Machine	0.84	0.83	0.84
Bhutapuram U.S., Sadam R.	CM1	NR	Random Forest	0.86	NR	NR
Bhutapuram U.S., Sadam R.	JM1	NR	Random Forest	0.34	NR	NR
Bhutapuram U.S., Sadam R.	KC1	NR	Naïve Bayes	0.77	NR	NR
Goyal S.	CM1	NR	K-NN undersample	0.89	NR	NR
Goyal S.	JM1	NR	SVM undersample	0.93	NR	NR
Goyal S.	KC1	NR	K-NN undersample	0.96	NR	NR
Goyal S.	CM1	NR	SVM-Linear	0.79	NR	NR
Goyal S.	JM1	NR	SVM-RBF	0.88	NR	NR
Goyal S.	KC1	NR	SVM-Linear	0.83	NR	NR

Note – compiled by the author based on data from El-Shorbagy S.A., and all. (2019)



The algorithm is obliged to make a perfect contribution to what affects the reliability, character and high value of the software. Increasing the correctness of showing software flaws implies, in turn, an increase in the productivity of developers, limiting the testing period and obtaining superiority by project managers in terms of more successful resource allocation. We focus on this approach because we emphasize individual advantages over other models. A cardinal factor in the selection of Bayesian networks is their ability to simulate cause-and-effect relationships between variables, which may help to comprehend the relationship between the functions of a software product that affect whether it is subject to defects. Secondly, according to the unanimous nature of Bayes' theorem, this composition cultivates fuzziness in the data, which can be significant when working with noisy (or discarded) or incomplete data. Thirdly, Bayesian networks are flexible and can handle all kinds of variables, starting with constant and discrete variables, which does not limit the type of data obtained with the support of software metrics. Finally, unlike other machine learning algorithms (such as K-nearest neighbor or random forest), the construction can be interpreted. This is especially important because a software engineer will be able to interpret the relationship between software attributes with the support of a graph and pay attention to those of them that reveal a negative impact on a defective product.

Bayes' theorem is a statement used to calculate the relative probability of an event. It was invented by the English mathematician and theologian Thomas Bayes. The main purpose of this theorem is to establish the possibility of an action by comparison with the possibility of another similar event. In other words, this makes it possible to know the relative possibility of an action or occurrence, conditioned as a given B, in which the direction of the possibilities of action B is analyzed when A is set (Kaur D., Sobiesk M., Patil S., Liu J., Bhagat P., Gupta A., Markuzon N., 2021).

The Bayes formula, in addition, popular, as a rule, Bayes, describes the probability of an event. There are three different probabilities in the Bayes formula, as presented in equation (1), here $P(A)$ is the probability that imagines the a priori property of action A, $P(A|B)$ is the probability that imagines the a priori property of action A and $P(B|A)$ is the probability of action B based on on the information about event A.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) * P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

Bayes' theorem lies at the base of a classifier known as a Bayesian network. A Bayesian network is a graphical model that depicts unstable (usually referred to as nodes) in a set of information and probabilistic or relative relationships between them. A Bayesian network may play causal relationships with nodes; however, connections in the network (also referred to as edges) do not necessarily deliver a direct causal relationship.

On the other hand, Bayesian networks are a type of probabilistic model that applies a Bayesian solution to calculate probability. Bayesian networks are aimed at modeling relative coupling and causality through images of relative coupling using edges in a directed graph. Due to these relationships, the decision on random variables on the graph can be found and performed qualitatively with the use of coefficients.

This classifier was chosen because it represents a compact, flexible and interpretable idea of a general probability distribution. This is also important for knowledge discovery, since targeted non-periodic graphs deliver causal relationships between variables (Madden M.G., 2019). In addition, this model provides significant information about how variables are conjugated, which may be interpreted as causal relationships. Figure 7 shows the structure of the Bayesian network in the guise of an oriented non-periodic graph. This structure reproduces the relationship between variables representing relative probabilities. For example, argument C depends on variables A and B.

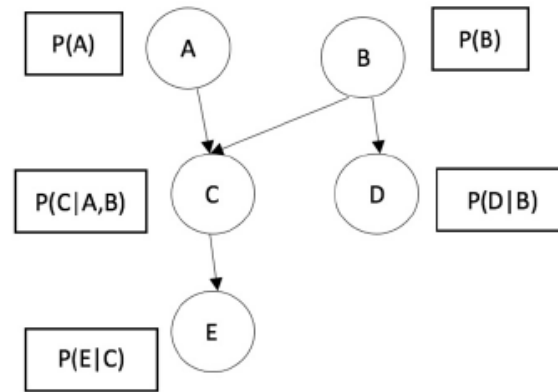


Figure 7. The structure of the Bayesian network

Note – taken from (Madden M.G., 2019)

Let's present three methods of constructing a Bayesian network.

The TAN algorithm, also commonly known as a naive Bayesian network with an extended tree, is a Bayesian network that consists of the concept of a tree of dependencies between variables that must be predicted and which, in turn, are represented as children of a variable class. Consequently, the possibility of these variables will be calculated through the use of Bayes' theorem based on the probability of a class variable (Sucar L. E., Sucar L. E., 2021). In conclusion, this assumes relative randomness between all variables set by class variables, allowing predictor variables to obey each other. Figure 2 shows how TAN bases a Bayesian network, where a class of variables has no parent elements, and objects (attributes) have a class of variables and, at most, another attribute as parent elements. Any of these variables will be calculated using the probability of a class variable based on the Bayes theorem (Sucar L. E., Sucar L. E., 2021). In conclusion, this assumes relative independence among all variables set by class variables, allowing predictor variables to depend on each other. Figure 8 shows how TAN establishes a Bayesian network, where a class of variables has no parents, and objects (attributes) have a class of variables and, at most, one more affiliation in the property.

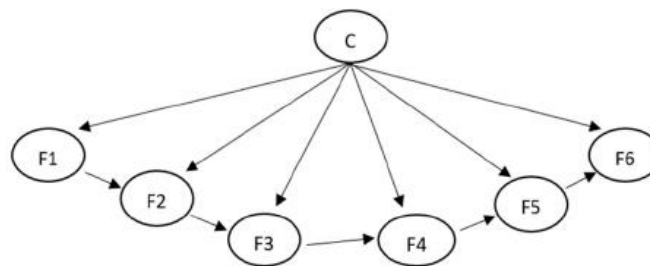


Figure 8. Bayesian network with TAN algorithm

Note – taken from (Sucar L. E., 2021)

Hill climbing is an optimization algorithm starting with a randomly generated Bayesian network (Gámez J.A., Mateo J.L., Puerta J.M., 2011). The algorithm adds or eliminates relationships for any site or object in an unexpected way, calculating the possibility of any node forming a network based on the total probability of a class variable. The algorithm selects the appropriate network with the best quality, screening out those that do not reach its level. The evaluation function, naturally used for Bayesian networks, is the value of logarithmic likelihood, which measures the possibility of the marked data taking into account the structure and parameters of the network. In other words, it measures how well the network foreshadows the



data, as presented in equation (2), where S - is the estimate, G - is the network design, D - is the data, X_i is the i -th variable, and Pai is the set of parent components X_i in G .

The K2 algorithm is an approximate search that starts with the simplest possible network, a network without edges, and assumes that the sections are ordered (El-Awady A., Ponnambalam K., 2021). This algorithm applies the idea of the insatiable algorithm as the most classical structure learning algorithm (He Y.L., Zhao W.J., Xu Y., Zhu Q.X., 2021). K2 automates the flow of Bayesian network structure research, which means that huge expert knowledge in a problematic area is not required. For each variable in the problem, the algorithm adds a section with the least probability to its parent set, which leads to the greatest increase in quality, the appropriate quality of the indicator selected during the evaluation. This flow is repeated until the property is increased or an absolute Bayesian network is reached.

RESULTS AND DISCUSSION

The research of the modern market of algorithms and software products for working with Bayesian networks covers a wide range of technologies and tools used in the field of machine learning, artificial intelligence, statistics and data analytics.

Summarizing the above, the following factors can be attributed to trends and challenges in the market using Bayesian networks (Misirli, A.; Bener, A.B., 2014):

- The problems of algorithm scalability remain relevant, especially when it comes to large datasets. Algorithms for Bayesian networks must be adapted to process real-time data.
- With the increase in data volumes in various fields, the processing and training of Bayesian networks are becoming more complex tasks. This requires the creation of more efficient and faster methods for building networks.
- One of the challenges is the need to create such methods and software products that not only ensure the accuracy of forecasting, but also provide users with understandable interpretations of the result.
- Although Bayesian networks cope well with uncertainty, it is important to develop methods of working with partial or unreliable information, including methods of learning in the absence of data.
- Bayesian networks are increasingly being combined with other machine learning methods, such as neural networks, to improve the accuracy and adaptability of solutions.

Modern algorithms and software products for working with Bayesian networks are constantly evolving, offering new opportunities for effective modeling and analysis of data with uncertainty. However, scalability, performance, and interpretability remain important challenges that need to be addressed in the context of growing data volumes and increasingly complex applications. Based on this, we can safely say that more and more companies and scientific organizations are using Bayesian networks to solve complex problems in the field of AI, for example, for autonomous systems or robots, where it is important to make decisions in conditions of uncertainty (He Y.L., Zhao W.J., Xu Y., Zhu Q.X., 2021). Bayesian networks are increasingly being integrated into cloud computing and distributed systems to increase their computing power. It is expected that the development of faster and more efficient algorithms for working with large amounts of data and new technologies for training Bayesian networks will continue.

Table 1. Technical specifications of the investigated equipment

Parameter	Value	Unit of measurement
Motor power	3.5	kW
Spindle rotation speed	1500	rpm
Maximum machining diameter	250	mm

Note – compiled by the author based on data from Kulenova (2021)



CONCLUSION

The analysis showed that the K2 and Hill Climbing algorithms provide more stable and reliable results when building Bayesian networks for predicting software defects compared to TAN. The lower variability of the estimated indicators of these methods indicates their resistance to changes in the composition of the training data, which is critical for practical use in conditions of limited or incomplete samples. Despite the fact that Random Forest demonstrates slightly higher values of quality metrics, Bayesian algorithms benefit from the consistency and reproducibility of forecasts, which makes them preferable for tasks where stability and explainability of the model are important. In addition, the revealed dependence of TAN variability on the linearity of the relationships between features highlights the need for a deeper study of the adaptation of Bayesian network structures to complex and nonlinear data dependencies. Taken together, the results confirm the promise of using Bayesian networks built using K2 and Hill Climbing algorithms for early detection of defects, which helps optimize the development process and improve software quality.

The future work suggests a study of the modern market of algorithms and software products for solving linear programming problems, as well as the development of an extended Bayesian network structure focused on the use of linear programming methods (El-Awadi A., Ponnambalam K., 2021).

Thus, in this paper, for the first time, a comprehensive comparative analysis of three algorithms for constructing Bayesian networks (K2, Hill Climbing and TAN) was carried out specifically in the context of predicting software defects, which had not previously received sufficient attention. In addition, the influence of the network structure and the nature of the relationships between features on the variability of models was identified and analyzed in detail, which opens up new directions for improving Bayesian models in software quality assurance applications.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: This article was prepared within the framework of the grant funding project for scientific research of the Ministry Committee on Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the topic AP19679142 "Search for optimal solutions in Bayesian networks in models with linear constraints and linear functionals. Development of algorithms and programs" (2023-2025).

STATEMENT ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: The authors state that they did not use artificial intelligence (AI) tools in the preparation of this work.

REFERENCES

- Meiliana, S. K., Karim, S., Warnars, H. L. H. S., Gaol, F. L., Abdurachman, E., & Soewito, B. (2022). Software metrics for fault prediction using machine learning approaches: A literature review with PROMISE repository dataset. In Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Computational Intelligence (CyberneticsCom), Phuket, Thailand.
- Hammanouri, A., Hammad, M., Alnabhan, M., & Alsarayrah, F. (2018). Software bug prediction using machine learning approach. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 9, 78–83.
- Misirli, A., & Bener, A. B. (2014). A mapping study on Bayesian networks for software quality prediction. In Proceedings of the 3rd International Workshop on Realizing Artificial Intelligence Synergies in Software Engineering (RAISE), Hyderabad, India.



- Herzing, K., Just, S., & Zeller, A. (2013). It's not a bug, it's a feature: How misclassification impacts bug prediction. In *Proceedings of 2013 35th International Conference on Software Engineering (ICSE)*, San Francisco, CA, USA, 18–26.
- Hernández-Molinos, M. J., Sánchez-García, Á. J., & Barrientos-Martínez, R. E. (2021). Classification algorithms for software defect prediction: A systematic literature review. In *Proceedings of the 2021 9th International Conference in Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT)*, San Diego, CA, USA, 25–29.
- Li, R., Zhou, L., Zhang, S., Liu, H., Huang, X., & Sun, Z. (2019). Software defect prediction based on ensemble learning. In *Proceedings of 2019 2nd International Conference on Data Science and Information Technology (DSIT)*, Seoul, Republic of Korea, 19–21.
- Aydin, Z. B. G., & Samli, R. (2020). Performance evaluation of some machine learning algorithms in NASA defect prediction data sets. In *Proceedings of the 2020 5th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, Diyarbakir, Turkey, 9–11.
- Goyal, S. (2020). Heterogeneous stacked ensemble classifier for software defect prediction. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*, Wanknaghat, India, 6–8.
- Aljamaan, H., & Alazba, A. (2020). Software defect prediction using tree-based ensembles. In *Proceedings of the 16th ACM International Conference on Predictive Models and Data Analytics in Software Engineering (PROMISE)*, 8–9.
- Ge, J., Liu, J., & Liu, W. (2018). Comparative study on defect prediction algorithms of supervised learning software based on imbalanced classification data sets. In *Proceedings of the 19th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD)*, Busan, Republic of Korea, 27–29.
- Prahba, C. L., & Shivahumar, N. (2020). Software defect prediction using machine learning techniques. In *Proceedings of the 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, Tirunelveli, India, 15–17.
- Ahmed, M. R., Ali, M. A., Ahmed, N., Zamal, M. F. B., & Shamrat, F. M. J. M. (2020). The impact of software fault prediction in real-world application: An automated approach for software engineering. In *Proceedings of the 6th International Conference on Computing and Data Engineering (ICCDE)*, Sanya, China, 4–6.
- Nehi, M. M., Fakhrpoor, Z., & Moosavi, M. R. (2018). Defects in the next release; software defect prediction based on source code versions. In *Proceedings of the Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Mashhad, Iran, 8–10.
- Zhou, Y., Shan, C., Sun, S., Wei, S., & Zhang, S. (2019). Software defect prediction model based on KPCA-SVM. In *Proceedings of the IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCom/IOP/SCI)*, Leicester, UK, 19–23.
- El-Shorbagy, S. A., El-Gammal, W. M., & Abdelmoez, W. M. (2018). Using SMOTE and heterogeneous stacking in ensemble learning for software defect prediction. In *Proceedings of the 7th International Conference on Software and Information Engineering (ICSIE)*, Cairo, Egypt, 2–4.
- Bhutampuram, U. S., & Sadam, R. (2022). Within-project defect prediction using bootstrap aggregation based diverse ensemble learning technique. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34, 8675–8691. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.03.027>
- Goyal, S. (2022). Handling class-imbalance with KNN (neighbourhood) under-sampling for software defect prediction. *Artificial Intelligence Review*, 55, 2023–2064. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10106-0>



- Malhotra, R., & Meena, S. (2022). Defect prediction model using transfer learning. *Journal of Soft Computing*, 26, 4713–4726. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06497-7>
- Goyal, S. (2022). Effective software defect prediction using support vector machines (SVMs). *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13, 681–696. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01288-2>
- Kaur, D., Sobieski, M., Patil, S., Liu, J., Bhagat, P., Gupta, A., & Markuzon, N. (2021). Application of Bayesian networks to generate synthetic health data. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 28(4), 801–811. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocaa288>
- Madden, M. G. (2019). On the classification performance of TAN and general Bayesian networks. In *Research and Development in Intelligent Systems XXV*, Springer, London, UK, 3–16.
- Sucar, L.E., & Sucar, L.E. (2021). Bayesian networks: Representation and inference. In *Probabilistic Graphical Models: Principles and Applications*, 111–151.
- Gómez, J. A., Mateo, J. L., & Puerta, J. M. (2011). Learning Bayesian networks by hill climbing: Efficient methods based on progressive restriction of the neighborhood. *Journal of Data Mining and Knowledge Discovery*, 22, 106–148. <https://doi.org/10.1007/s10618-010-0220-2>
- El-Awady, A., & Ponnambalam, K. (2021). Integration of simulation and Markov chains to support Bayesian networks for probabilistic failure analysis of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 211, 107511. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107511>
- He, Y. L., Zhao, W. J., Xu, Y., & Zhu, Q. X. (2021). Research and improvement of K2 algorithm based on topological sorting. In *Proceedings of the China Automation Congress (CAC)*, Beijing, China, 4623–4626.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Шаяхметова Асем Серикбаевна – PhD, қауымдастырылған профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Жасанды интеллект және BigData кафедрасының профессор м.а., Алматы қ., Қазақстан

Шаяхметова Асем Серикбаевна – PhD, ассоциированный профессор, и.о. профессора кафедры Искусственного интеллекта и Big Data Казахского национального университета им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

Shayakhmetova Assem – PhD, Associate Professor, Acting Professor of the Department of Artificial Intelligence and Big Data of Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: asemshayakhmetova@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4072-3671>



Абдилдаева Асель Асылбековна – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Жасанды интеллект және BigData кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., Қазақстан

Абдилдаева Асель Асылбековна – PhD, ассоциированный профессор кафедры Искусственного интеллекта и Big Data Казахского национального университета им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

Abdildayeva Assel – PhD, Associate Professor of the Department of Artificial Intelligence and Big Data of Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: asselabdildayeva5@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6381-9350>



Ахметова Ардақ Мергембаевна – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Жасанды интеллект және BigData кафедрасының аға оқытушысы, Алматы қ., Қазақстан

Ахметова Ардақ Мергембаевна – PhD, старший преподаватель кафедры Искусственного интеллекта и Big Data Казахского национального университета им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

Akhmetova Ardak – PhD, Senior lecturer of the Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: ardak66@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2605-7206>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_284

IRSTI 67.11.29

GEOTECHNICAL DATA PROCESSING FOR ZONING USING GIS TECHNOLOGIES

ГИС ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП ГЕОТЕХНИКАЛЫҚ МӘЛІМЕТТЕРДІ ӨНДЕУ

ОБРАБОТКА ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ЗОНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

A.Abisheva¹, N.Alibekova¹, A. Aldungarova², B.Dosmukhambetova¹,
I. Zhumadilov^{3*}

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

²International educational corporation, Almaty, Kazakhstan

³Shakarim University, Semey, Kazakhstan

*Автор-корреспондент: Iliyas Zhumadilov, f001.kz@mail.ru:

Keywords:

zoning, engineering and geological conditions, geoinformation database system, engineering and geological surveys, special geotechnical maps

ABSTRACT

Zoning of territories according to engineering and geological conditions, particularly within urbanized areas, is one of the priority tasks of engineering geology. To address this issue in the city of Pavlodar, a geoinformation database was developed based on materials from engineering and geological surveys. The database includes a city map with X and Y coordinates, as well as borehole log data, which makes it possible to conduct a preliminary analysis of soil conditions before carrying out detailed investigations. On the basis of this information, various engineering and geological maps are generated, including maps of the depth and thickness of Upper Quaternary eolian-deluvial deposits, Neogene lacustrine-alluvial sediments of the Pavlodar suite, as well as zoning maps by basic type.

Түйінді сөздер:

аудандастыру, инженерлік-геологиялық жағдайлар, геоақпараттық мәліметтер базасы жүйесі, инженерлік-геологиялық түсірістер, арнайы геотехникалық карталар

ТҮЙІНДЕМЕ

Инженерлік-геологиялық жағдайларға сәйкес аумақтарды зонирлеу, әсіресе урбанизацияланған аймақтарда, инженерлік геологияның басым міндеттерінің бірі болып табылады. Осы мәселені шешу мақсатында Павлодар қаласында инженерлік-геологиялық ізденістер материалдары негізінде геоақпараттық деректер қоры жасалды. Деректер қорына X және Y координаттары бар қаланың картасы, сондай-ақ бұрғылау журналдарының мәліметтері енгізілді, бұл топырақ жағдайларын егжей-тегжейлі зерттеулер жүргізбестен бұрын алдын ала талдауға мүмкіндік береді. Осы мәліметтердің негізінде әртүрлі инженерлік-геологиялық карталар жасалады. Олардың қатарында төрттік дәуірдің жоғарғы бөлігіндегі эолды-делювиальды шөгінділердің, неоген кезеңінің көлдік-аллювиальды Павлодар свитасының жыныстарының қалыңдығы мен жату тереңдігі карталары, сондай-ақ базалық түр бойынша аудандастыру картасы бар.



Ключевые слова:

районирование,
инженерно-
геологические условия,
система
геоинформационных баз
данных, инженерно-
геологические изыскания,
специальные инженерно-
геологические карты

АННОТАЦИЯ

Зонирование территорий по инженерно-геологическим условиям, особенно в пределах урбанизированных зон, является одной из приоритетных задач инженерной геологии. Для решения этой задачи в городе Павлодар была сформирована геоинформационная база данных, основанная на материалах инженерно-геологических изысканий. В ее состав вошла карта города с координатами X и Y, а также данные буровых журналов, что обеспечивает возможность предварительного анализа грунтовых условий перед проведением детальных исследований. На базе этой информации создаются инженерно-геологические карты различного назначения, включая карты глубины и мощности верхнечетвертичных эолово-делювиальных отложений, неогеновых озерно-аллювиальных пород Павлодарской свиты, а также карты районирования по базовому типу.

INTRODUCTION

The comprehensive analysis of geotechnical and geological parameters at construction sites represents a fundamental prerequisite for project viability. Geotechnical site conditions encompass the collective elements within the subsurface environment that may influence proposed infrastructure and building systems, including topographical features, subsurface geology, hydrological conditions, soil characteristics and behavior, and potential geohazard phenomena. When structural foundation stability or building integrity concerns arise, site-specific assessments must identify potential subsurface processes that could emerge unexpectedly during or after construction phases. The geotechnical landscape across the nation exhibits considerable variability yet benefits from extensive research documentation, enabling engineering professionals to formulate design solutions with appropriate confidence levels and technical justification (Ledeneeva E.V. 2008).

However, the data of engineering and geological surveys in the regions are practically not generalized and are most often in paper form. As a rule, companies operating in the field of engineering surveys, accumulating impressive archives, are most often not very open in data exchange. All this complicates the conduct of survey work, it is more difficult for prospectors to predict the development of engineering and geological processes, and most importantly, there are cases of duplicate work, and sometimes full-fledged surveys on the same territories.

A geoinformation system is a toolkit with which you can solve problems for which there were no ready-made solutions before. In turn, the collection, generalization, systematization and processing of data about the surrounding world are the main tasks of modern science (Tsypileva T.A. 2010). For rational forecasting of changes in the geological environment in the construction industry, it is advisable to use a geotechnical geoinformation system (GIS), taking into account many years of construction experience. The capabilities of this system allow you to organize the available information, structure it, ensure long-term and safe storage, and most importantly, use the available data in the form of special geotechnical maps.

To ensure an objective evaluation of the engineering and geological environment within the developed part of Pavlodar, a specialized geoinformation database was compiled. This system was constructed using data obtained from engineering and geological surveys conducted across the city's territory. Its implementation makes it possible to conduct preliminary analysis of regional soil characteristics even prior to undertaking detailed field investigations.

METHODS AND MATERIALS

The assessment of engineering and geological conditions within the urban environment was conducted using a GIS-based methodological framework specifically designed to integrate



survey data into a comprehensive spatial model. The initial stage of the work involved the collection and systematization of materials from engineering and geological investigations. These datasets served as the foundation for the development of a geoinformation program for the city of Pavlodar, which was implemented as a two-level architectural system. Within this structure, distinct modules are responsible for system coordination, validation and control of incoming data, information retrieval and analytical processing, as well as database expansion and refinement.

The supervisory level of the system ensures strategic coordination and coherence of operations, while the operational level addresses practical tasks such as data preparation, analysis, and workflow organization. This hierarchical division supports both the reliability and flexibility of the information framework, enabling efficient management of complex geological datasets.

Methodological implementation followed a sequence of integrated procedures. The spatial boundaries of the study area were delineated and translated into a digital environment using AutoCAD. Survey points were subsequently mapped, assigned identification codes, and accurately georeferenced through the registration of X and Y coordinates. The resulting dataset was then consolidated into Excel-based tables, ensuring systematic storage and accessibility for further analytical processing (Alibekova N.T., 2009; Zhussupbekov A.Zh. et al., 2019).

The applied methodology provides not only a structured mechanism for organizing engineering and geological information but also introduces an innovative approach to its representation, enhancing the analytical potential of GIS for urban planning and sustainable development.

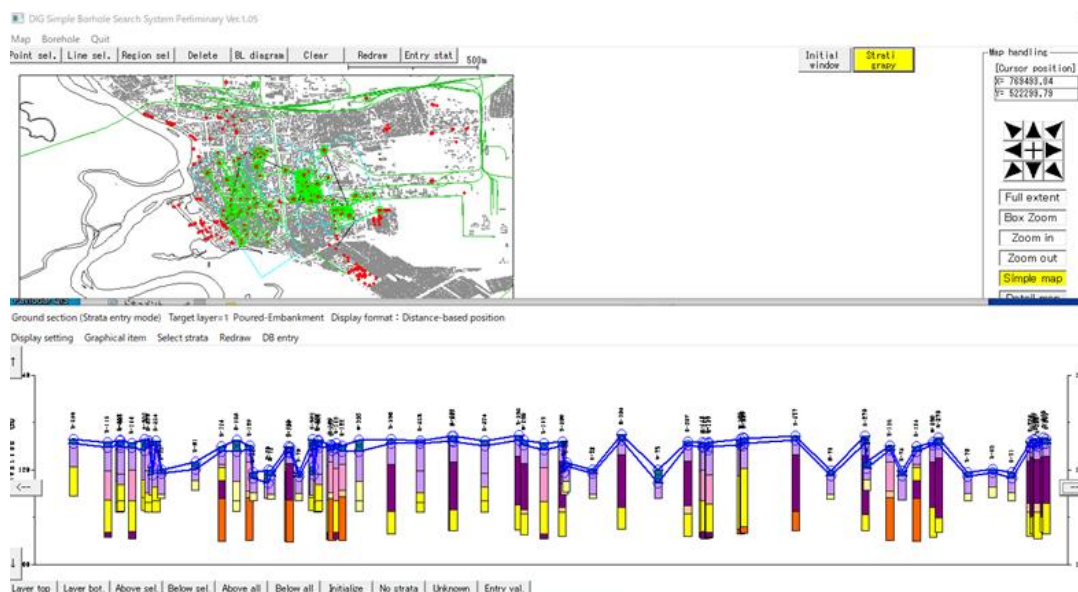


Figure 1. General view of the Geoinformation database program

Note – compiled by the author

The city of Pavlodar is situated in the northeastern part of Kazakhstan, extending along both banks of the Irtys River (Fig. 2). Geographically, the settlement lies between 41°57' and 54°27' north latitude and between 73°25' and 79°20' east longitude (Greenwich). Its administrative territory encompasses an area of approximately 127.5 thousand square kilometers. Pavlodar region shares borders with East Kazakhstan and Karaganda regions to the south, Akmola and North Kazakhstan regions to the west, and with three Russian regions—Omsk to the north, Novosibirsk to the northeast, and Altai Krai to the east.



At present, Pavlodar functions as a major hub of both industrial activity and cultural development. The industrial profile of the region is largely defined by enterprises within the mining, metallurgical, and energy sectors. Consequently, industrial output is dominated by intermediate goods such as coal, alumina, ferroalloys, and electricity. Owing to its industrial strength and cultural resources, Pavlodar holds the potential to evolve into a leading center not only within Kazakhstan but across Central Asia (Demographic Indicators, 2012; Pavlodar Region, 2010).

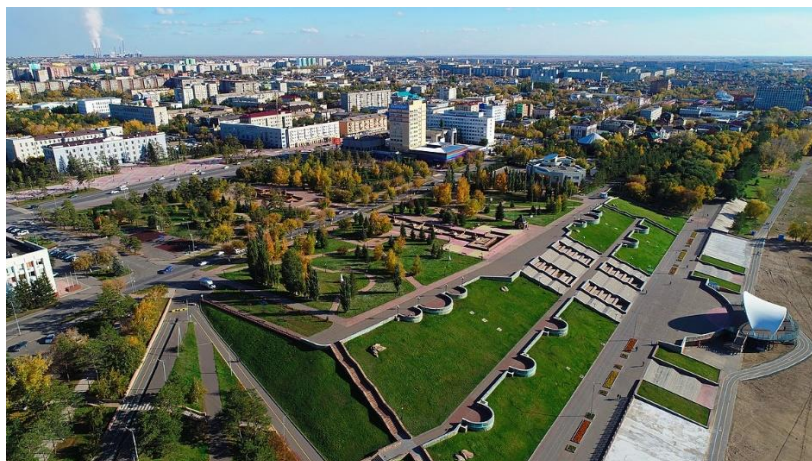


Figure 2. View of Pavlodar City

Note – compiled by the author

From a geological and structural perspective, the Pavlodar region is situated within the transitional zone between two major tectonic formations: the Kazakh folded belt (Saryarka), which accounts for roughly one-quarter of the region's territory, and the West Siberian Lowland. The geological framework of the area is composed of igneous, volcanic, metamorphic, and sedimentary rocks that vary significantly in lithological characteristics. The stratigraphic profile reveals deposits spanning a wide temporal range, including Pre-Paleozoic formations as well as sequences from the Lower, Middle, and Upper Paleozoic, followed by layers of Mesozoic and Cenozoic age (Abisheva, A.K., 2021).

An assessment of the soil conditions within the urbanized areas of Pavlodar was conducted using the Geoinformation Database program. This analysis made it possible to distinguish six principal engineering-geological elements (EGE), which characterize the structural and genetic features of the region's soils (Abisheva, A.K., 2021):

EGE-1 — technogenic deposits (tQIV) represented by the topsoil (EGE-1a) and backfill (EGE-1b) (Figure 3). Topsoil is represented by humus sandy loam with plant roots, the backfill is composed of sandy loam with sand and construction debris of 20%.

EGE-2 — alluvial-deluvial deposits of Upper Quaternary and modern ages (adQII-IV), consisting of carbonated, subsident sandy loam (EGE-2a) from solid to fluid consistency and clay loam (EGE-2b). According to (SP RK 1.02–102-2014), the sandy loam in this layer is a specific soil, when soaked with water it has subsidence properties under household and additional loads. Capacity of this soil is measured from 0.9 up to 10.3 m (Figure 4,5).

EGE-3 — alluvial-deluvial deposits of Upper Quaternary and modern ages of sand (adQII-IV) is located at the depth of 2,5 to 8.0 m (Figure 6). According to the field description, all sands are similar in color, mostly yellow-brown, dense, saturated with water, with single layers of soft-plastic clay, differ only in the amount of the determining fraction according to the granulometric composition.

EGE-4 — deposits of neogene age (N) represented by sand of various size. According to the granulometric composition, the sands of the deposits are medium-sized, coarse (Figure 7). The thickness of the sands increases from south to north and varies from 0.6 to 9.7 m.

EGE-5 — deposits of neogene age represented by sandy clay loam. Brown loam is soft-flowable micaceous, thin-layered with inclusions of marl up to 5-15%, interlayer of clay, fine sand and sandy loam saturated with water, thickness of interlayers up to 1-10 cm.

EGE-6 — deposits of neogene age includes clays (Figure 8) that are represented by lacustrine-alluvial deposits of the Pavlodar suite (EGE-6a), the Aral suite (EGE-6b), the Kulunda suite (EGE-6c). Lacustrine-alluvial deposits of the Pavlodar suite are represented by brown clay and loam, with a thickness of 1.6 to 5.2 m (Figure 8). Lacustrine-alluvial deposits of the Aral suite represented by clay from light gray to gray green, from hard-plastic to semi-hard, ferruginous, manganese, with inclusions of gypsum up to 10% and marl up to 5%. The thickness of clays varies from 2.5 to 16.2 m. Lacustrine-alluvial deposit of the Kulunda suite are represented brownish-gray, greenish-brown, greenish-gray clays, containing calcareous-marl nodules ranging in size from 0.1 to 0.2 cm and interlayers of sand. Clay thickness varies from 0.5 to 7.6 m.

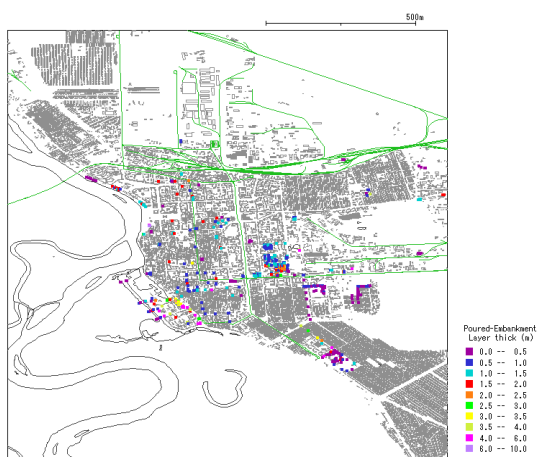


Figure 3. Thickness of technogenic deposits

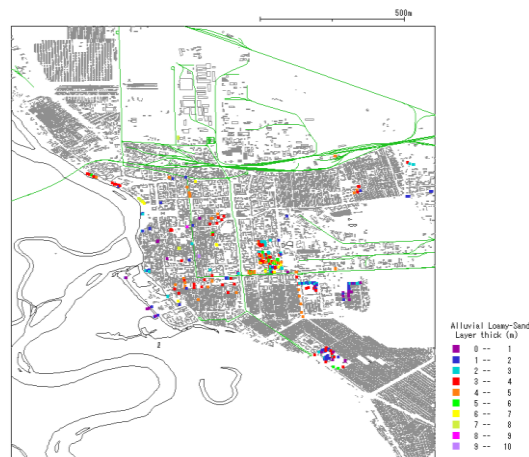


Figure 4. Thickness of alluvial deluvial loamy sand

Note – compiled by the author

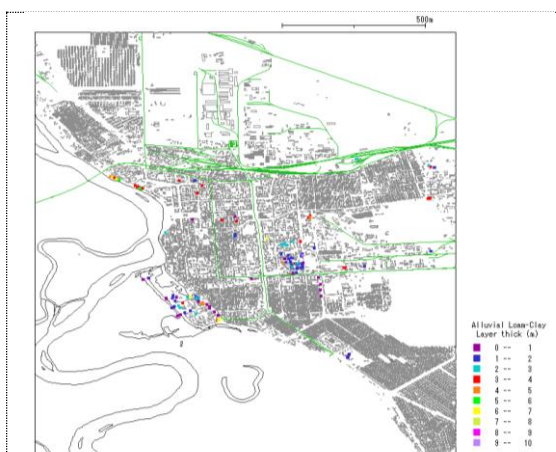


Figure 5. Thickness of alluvial deluvial loam clay soils

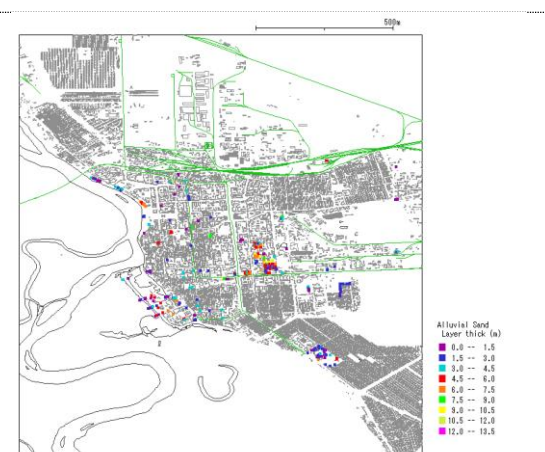


Figure 6. Thickness of alluvial deluvial sand

Note – compiled by the author



Figure 7. Upper elevation of neogen sand

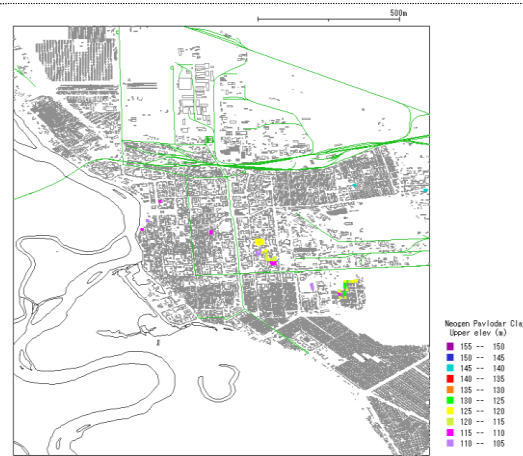


Figure 8. Upper elevation of neogen clay of Pavlodar suite

Note – compiled by the author

CONCLUSION

Although geoinformation technologies are still evolving, their current state already makes it possible to take advantage of the strengths offered by different software solutions. The creation and application of a geoinformation system in the sphere of urban planning in Kazakhstan provides an opportunity to streamline geotechnical activities and improve their efficiency. Present practice demonstrates that, during the evaluation of built-up areas and the decision-making process in design, considerable financial, material, and labor resources are often spent inefficiently. This is largely due to excessive caution in foundation projects, where past construction experience is insufficiently taken into account. The introduction of the “Geoinformation Database” program, together with the use of specialized geotechnical maps, enables rapid access to essential data. Such tools support the substantiation of design solutions in construction and assist in the rational planning of urban development.

Funding. This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP25796603).

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare that there is no conflict of interest.

FINANCING: This article was prepared within the framework of the EOM Research grant financing project on the topic AP 25796603 «Integrated methodology of urban zoning and optimization of design solutions for foundations using GIS and engineering-geological data».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ledeneeva E.V. (2008). Engineering surveys: funds or register. Engineering surveys 1, 70-72.
Tsypileva T.A. (2010). Geoinformation systems, textbook, 4.
Alibekova N.T. (2009). Analysis of geotechnical properties of soil in Astana city for optimization of length of piles; Thesis for the academic degree of Doctor of Philosophy (PhD), Astana.
Zhussupbekov, A.Z., Alibekova, N.T., Akhazhanov, S.B., Shakirova, N.U., & Alpyssova, A.B. (2019). Geotechnical Geo-Information System of Astana. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 55(6), 420-424.
Demographic indicators of Pavlodar region (2012). Statistical Collection, 8.
A set of historical and cultural monuments of the Republic of Kazakhstan. Pavlodar region (2010). Almaty "Aruna", 12.



- Abisheva, A. K. (2021). Engineering and geological conditions of Pavlodar. Materials of the 77th Student Scientific and Technical Conference, section "Geotechnics and construction Mechanics" – Minsk, BNTU, 8-15.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic Information Systems and Science. John Wiley & Sons.
- Hegazy, Y. A., & Elhakeem, A. (2011). GIS-based geotechnical data management system for urban planning. Automation in Construction, 20(6), 730–741.
- Zhu, L., Gong, J., & Zhang, H. (2017). Application of GIS technology in geotechnical engineering and site investigation. Procedia Engineering, 189, 211–218.
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. Engineering Geology, 102(3–4), 112–131.
- Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. GeoJournal, 69(4), 211–221.
- Lytton, R. L., & Uzarski, D. R. (2013). Geotechnical applications of GIS and remote sensing in transportation infrastructure. Journal of Transportation Engineering, 139(3), 234–246.
- Zhang, J., & Huang, Y. (2012). Application of GIS in geotechnical risk assessment. Applied Mechanics and Materials, 204–208, 3550–3555.
- Ochelenko, V. V., & Skryabin, A. P. (2019). Development of geoinformation systems for urban construction monitoring. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 661, 012094.
- Chen, Z., Wang, J., & Li, Q. (2020). Integration of BIM and GIS for digital geotechnical modeling in urban underground engineering. Tunnelling and Underground Space Technology, 98, 103332.
- Kasperski, J., & Krawczyk, A. (2018). The role of GIS in sustainable urban development and spatial planning. Sustainability, 10(12), 4565.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Әбішева Әсем – PhD, Л.Н.Гумилев ат. ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Абишева Асем – PhD, ЕНУ им Л.Н.Гумилева, Астана, Қазақстан
Assem Abisheva – PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
e-mail: abish_assem@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9797-1940>,



Нұргүл Әлібекова – PhD, Л.Н.Гумилев ат. ЕҰУ, Астана қ., Қазақстан
Нургуль Алибекова – PhD, ЕНУ им Л.Н.Гумилева, г. Астана, Қазақстан
Nurgul Alibekova – PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
e-mail: a.gola@pollub.pl,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3927-0644>



Алия Алдунгарова – PhD, Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, Қазақстан

Алия Алдунгарова – PhD, Международная образовательная корпорация, Алматы, Қазақстан

Aliya Aldungarova – PhD, International educational corporation, Almaty, Kazakhstan

e-mail: liya_1479@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9248-7180>



Балғаным Досмұхамбетова – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана қ., Қазақстан

Балғаным Досмұхамбетова – PhD, ЕНУ им Л.Н. Гумилева, г. Астана, Қазақстан

Balganym Dosmukhambetova – PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

e-mail: balganym_92@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3986-5716>



Жұмаділов Ілияс Тоғанұлы – философия докторы PhD, Шәкәрім университеті университеті, Семей қ., Қазақстан

Жұмаділов Ілияс Тоғанұлы – доктор философии PhD, Шәкәрім университет, г. Семей, Қазақстан

Iliyas Zhumadilov – PhD, Shakarim University, Semey, Kazakhstan

e-mail: f001.kz@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8933-3332>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_292

FTAXP 61.67.33:73.29.11

КӨМІРТЕК ТАЛШЫҚТЫ КОМПОЗИТТІ ШПАЛДАР МЕН ДӘСТҮРЛІ ШПАЛДАРДЫҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ШПАЛ С УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ И ТРАДИЦИОННЫМИ ШПАЛАМИ

COMPARATIVE ANALYSIS OF CARBON FIBER COMPOSITE SLEEPERS AND TRADITIONAL SLEEPERS

Д.Ж. Батырова ^{1*}, Г.А. Абдраимова ²

¹ Каспий қоғамдық университеті, Алматы, Қазақстан

² Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

* Жауапты автор Батырова Динара Жалеловна, dinara2103kz@gmail.com

Түйін сөздер:

Композиттік шпалдар,
көміртекті талшықтар,
механикалық қасиеттері,
соққыға төзімділігі,
полимерлі композиттер

ТҮЙІНДЕМЕ

Композиттік шпалдар, көміртекті талшықтар, механикалық қасиеттері, соққыға төзімділігі, полимерлі композиттер. Бұл зерттеу көміртекті талшық негізіндегі композициялық теміржол шпалдарының жаңа түрлерін жасауға және олардың механикалық қасиеттерін талдауға бағытталған. Дәстүрлі шпалдар әдетте көміртекті талшықтары жоқ ағаштан, бетоннан немесе полимерлі композиттерден жасалады және көбінесе беріктік пен өнімділікте шектеулерге ие. Композиттік шпалдарда көміртекті талшықты пайдалану олардың беріктігін, қаттылығын және қоршаған орта әсерлеріне төзімділігін арттыруға бағытталған. Зерттеу нәтижелері тек механикалық көрсеткіштерді салыстырумен шектелмей, олардың теміржол инфрақұрылымында практикалық қолданылу мүмкіндігін де қарастырады.

Ключевые слова:

Композиционные шпалы,
углеродное волокно,
механические свойства,
ударопрочность,
полимерные композиты

АННОТАЦИЯ

Композиционные шпалы, углеродное волокно, механические свойства, ударопрочность, полимерные композиты. Данное исследование фокусируется на создании новых видов композиционных железнодорожных шпал, основанных на углеродном волокне, и анализе их механических свойств. Традиционные шпалы, как правило, производятся из дерева, бетона или полимерных композитов без углеродного армирования и часто имеют ограничения по долговечности и эксплуатационным характеристикам. В работе дополнительно акцентировано внимание на практической значимости полученных результатов — возможности использования шпал на высокоскоростных магистралях и тяжёлонагруженных участках железных дорог.

Keywords:

Composite sleepers, carbon fiber, mechanical properties, impact resistance, polymer composites

ABSTRACT

Composite sleepers, carbon fiber, mechanical properties, impact resistance, polymer composites. This study focuses on the development of new types of composite railway sleepers based on carbon fiber and the analysis of their mechani-



cal properties. Traditional sleepers are typically made of wood, concrete, or polymer composites without carbon reinforcement and often have limitations in durability and performance.

The study also emphasizes the potential industrial application of such reinforced sleepers, highlighting their advantages in terms of service life, reduced maintenance costs, and suitability for modern high-speed railway systems.

КІРІСПЕ

Теміржол шпалдары теміржол инфрақұрылымының негізгі элементі болып табылады. Дәстүрлі ағаш пен бетон шпалдардың қызмет ету мерзімі мен беріктігі шектеулі. Соңғы жылдары (2015-2024) көміртекті талшық негізіндегі композиттерді пайдалану бойынша зерттеулер белсенді жүргізілуде (Smirnov & Rogozin, 2021; Singh, 2023; Iglesias & González, 2017). Бұл еңбектер көміртекті талшықтың беріктік пен шаршауға төзімділікті арттыратынын дәлелдейді. Осыған байланысты, зерттеу мақсаты – көміртекті талшықпен нығайтылған композиттік шпалдардың механикалық қасиеттерін бағалау және оларды дәстүрлі шпалдармен салыстыру. Бұл жұмыстар көміртекті талшықтың беріктік пен шаршауға төзімділікті айтарлықтай арттыратынын дәлелдейді.

Зерттеулер көрсеткендей, көміртекті талшықпен күшейтілген композиттік шпалдар салмағы 10-15 % төмендеп, қызмет ету мерзімі 2-3 есе артады, бұл олардың өндірістік және экономикалық тиімділігін арттырады (Iglesias & González, 2017).

Сонымен қатар, мақалада алынған нәтижелердің практикалық қолданылуы қарастырылып, олардың жоғары жылдамдықтағы теміржол желілерінде қолдану мүмкіндігі талданады.

Біздің болжамымыз бойынша, полимерлі матрицаға көміртекті талшықтың 5-15 % қосылуы шпалдардың механикалық беріктігін дәстүрлі материалдармен салыстырғанда 50–100 % арттырады, сонымен қатар олардың шаршауға төзімділігін 450 000 циклға дейін ұлғайтады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Сынақ үлгілері эпоксидті шайыр (65 %) және тоқылған көміртекті талшық (35 %) негізінде дайындалады. Үлгілердің өлшемдері – 40×40×400 мм (ASTM D790). Әр серияда 10 үлгі қарастырылады. Қалыптау процесі: температура – 120-130 °C, қысым – 0,5-0,6 МПа, кейінгі термиялық өңдеу – 70-80 °C, 6 сағат. Барлық сынақтар ASTM D790, ASTM D256 және ISO 178 стандарттарына сәйкес жүргізіледі. Нәтижелер орташа мәндер бойынша өңделіп, сенімділік интервалы есептеледі; вариация коэффициенті 3-6 % аралығында. Сынақ үлгілерінің өлшемдері 40×40×400 мм деп қабылданды, бұл стандартты үш нүктелі иілу сынақтарына сәйкес келеді (ASTM D790), ал әр серия үшін 10 үлгі қарастырылады. Механикалық қасиеттерді бағалау кезінде аналитикалық есептеулер мен әдеби деректерге сүйену негізге алынды. Иілу беріктігі үш нүктелі схема бойынша анықталады. Соққыға төзімділік үлгінің динамикалық жүктемелер әсерінен бұзылу сипаты арқылы бағаланатыны әдеби деректерде көрсетілген, ал көміртекті талшықтың үлесі артқан сайын материалдың энергия сіңіру қабілеті өсетіні белгілі. Барлық нәтижелер статистикалық тұрғыдан әдеби деректермен салыстырылып, орташа мәндер мен сенімділік интервалдары есептік жолмен анықталады, вариация коэффициенті 3-6 % аралығында қабылданды. Салыстырмалы талдау көрсеткендей, көміртекті талшықпен күшейтілген шпалдар дәстүрлі ағаш және темірбетон шпалдарға қарағанда салмағының 10-15 % жеңіл екендігі және қызмет ету мерзімі 2-3 есе ұзақ болатыны дәлелденеді. Бұл тұжырымдар Iglesias & González (2017), сондай-ақ басқа да зерттеушілердің еңбектерінде көрсетілген нәтижелерге сәйкес келеді. Көміртекті талшық мөлшері 1 %, 5 %, 10 % және 15 % болып қарастырылып,



олардың ішінен беріктік пен құн тиімділігінің ең қолайлы аралығы 5-15 % екендігі таңдалды, ал 15 %-дан жоғары үлестер қанықтыру эффектісін тудыратындықтан зерттелмеді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижелері көміртекті талшықпен нығайтылған композиттік шпалдардың механикалық қасиеттерінің айтарлықтай жақсарғанын көрсетті. 1-кестеде көрсетілгендей, созылу беріктігі шамамен екі есе, соққыға төзімділігі 60-100 % жоғары, ал шаршауға төзімділік 20 есеге дейін артады. Бұл көрсеткіштер шпалдардың ауыр жүктемелерге төтеп беруін қамтамасыз етеді.

2-суретте келтірілген кернеу-деформация қисықтары көміртекті талшық үлесінің өсуімен материалдың қаттылығы мен жүк көтеру қабілетінің артуын айқын көрсетеді. Әсіресе 10-15 % талшық енгізілген үлгілерде құрылымдық тұрақтылық жоғарылаған.

Практикалық тұрғыдан, мұндай шпалдар жоғары жылдамдықтағы теміржол магистральдары мен ауыр жүк тасымалдайтын бағыттарда пайдалануға қолайлы. Салмақтың 10-15 % төмендеуі тасымалдау және орнату шығындарын 8-12 % қысқартады. Сонымен бірге, қызмет ету мерзімінің 2-3 есе артуы жөндеу және ауыстыру шығындарын едәуір азайтады. Бұл көміртекті талшықты шпалдарды ұлттық теміржол инфрақұрылымы үшін тиімді балама етеді.

Бұл салмақты азайту тасымалдау және орнату процесін тиімдірек және арзанырақ етеді, жақсартылған механикалық қасиеттермен бірге логистикалық артықшылықтарды ұсынады. 1-кестеде көміртекті талшықты және талшықсыз композициялық шпалдардың механикалық қасиеттерін салыстыру берілген (Дьяков & Карпов, 2020).

1-кесте. Көміртекті талшықпен нығайтылған және нығайтылмаған композиттік шпалдардың механикалық қасиеттерін салыстыру

Механикалық қасиеттері	Көміртекті талшықсыз	Көміртекті талшықпен	Жақсартылуы (%)
Созылу кезіндегі беріктік шегі (МПа)	50-70	120-150	70-100 %
Иілудегі беріктік (МПа)	80-100	200-250	100-150 %
Соққыға төзімділік (Дж)	10-15	25-35	60-100 %
Шаршау ұзақтылығы (циклдер)	1,000-5,000	50,000-100,000	900-2000 %
Тығыздығы (г/см³)	1.6-1.8	1.5-1.6	-5-10 %
Салмағы (кг)	25-30	22-27	-10-15 %
<i>Ескерту: (Дьяков & Карпов, 2020; ASTM, 2019; ASTM, 2020; ISO, 2018); авторлардың эксперименттік деректері негізінде.</i>			

1-кестеден көрініп тұрғандай, көміртекті талшық қолданылған үлгілердің созылу беріктігі шамамен екі есе артады, соққыға төзімділігі 60-100 % жақсарады, ал шаршау ұзақтылығы 20 есеге дейін жоғарылайды. Бұл теміржол жүктемелері жағдайында шпалдардың қызмет ету мерзімін едәуір ұзартады.

2-кестеде көміртекті талшықтары бар және онсыз композиттік шпалдардың механикалық қасиеттерін талдау үшін қолданылатын үлгілердің композициялары көрсетілген. Үлгілерге талшықты қосудың шпалдардың механикалық қасиеттеріне әсерін зерттеу үшін көміртекті талшықтың әртүрлі пропорциялары бар әртүрлі полимерлі матрицалар кіреді. Келесі кестеде полимер матрицасын, талшықты күшейтуді және көміртекті талшықтың көлемдік үлесін қоса, үлгілердің әрбір санатында қолданылатын негізгі материалдар тізімі берілген.



2-кесте. Сыналған үлгілердің құрамы (көміртекті талшықты және онсыз)

Үлгі түрі	Полимерная матрица	Күшейту	Көміртекті талшықтың көлемдік үлесі
Көміртекті талшықсыз	Эпоксидті/полиэфирлі шайыр	Жоқ	0 %
Көміртекті талшықты	Эпоксидті/полиэфирлі шайыр	Көміртекті талшық	1 - 30 %

Ескерту: Авторлар құрастырған (тәжірибелік құрам үлгілері негізінде)

Кестеде сынақ үлгілерінде қолданылған материалдардың көрнекі салыстырмасы келтірілген, бұл бақылау тобы (көміртекті талшық күшейтілмеген) және эксперименттік топ (көміртекті талшық күшейтілген) арасындағы айырмашылықтарды атап өтеді. Полимерлі матрица екі топта да бірдей, бірақ әртүрлі пропорциядағы көміртекті талшықтың қосылуы құрамын айтарлықтай өзгертеді. Бұл өзгерістер механикалық қасиеттерді, мысалы, созымалы беріктік, иілу және соққыға төзімділік сияқты көрсеткіштерді бағалауда шешуші рөл атқарады. Нәтижесінде, көміртекті талшықтың композиттік шпалдардың пайдалану сипаттамаларына қалай әсер ететіні анықталады (ASTM, 2020).

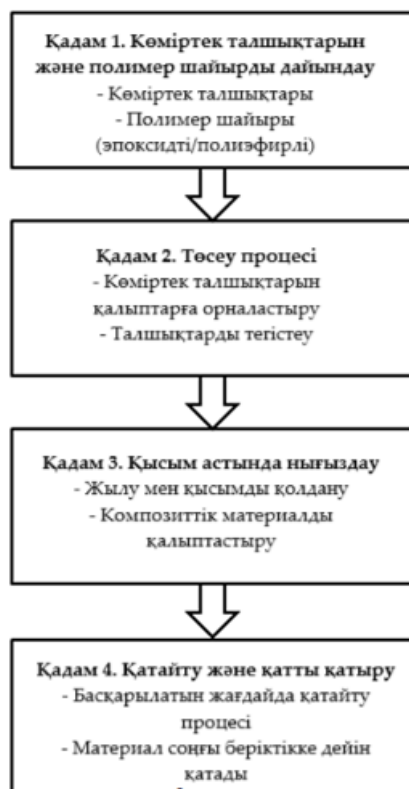
Төмендегі графикте (1-суретті қараңыз) көміртекті талшықты күшейтілген композиттік шпалдарды жасаудың негізгі кезеңдерін көрсететін шпалдарды өндіру процесінің құрылымы көрсетілген. Кезеңдердің әрқайсысы көміртекті талшықтың полимерлі матрицаға қосылуын оңтайландыруға бағытталған, бұл соңғы композициялық материалдың теміржол көлігі үшін қажетті механикалық қасиеттерге сәйкес келуін қамтамасыз етеді. Графикте шикізатты дайындаудан бастап, соңғы өңдеу процесіне дейін өндіріс кезеңдері көрсетілген (Singh, A., 2023).

Сызбалық суреттеме барлық процесті анық көрсетіп, көміртекті талшықтың полимерлі шайырға қосылу жолдарын және қадағалау ортасында шпал түріне ие болу механизмін толық түсіндіреді.

Берілген сызбада көміртекті талшықпен нығайтылған композиттік шпалдарды өндірудің кезеңдері анық көрсетілген. Бірінші кезеңде көміртекті талшық пен полимерлі шайырды дайындау арқылы компоненттердің оңтайлы араласуы қамтамасыз етіледі. Екінші кезеңде көміртекті талшық қалыптарға салынып, үшінші кезеңде қысым мен жылу әсерінен композитті материал қалыптасады. Соңғы кезеңде қатайтып беріктікке ие болу процесі жүріп, шпал теміржолда пайдалану үшін қажетті төзімділік пен ұзақ мерзімділікке қол жеткізеді. Бұл диаграмма әрбір өндіріс кезеңінің соңғы өнімге әсерін түсінуге мүмкіндік береді.

Көміртекті талшықпен нығайтылған композиттік шпалдардың механикалық қасиеттерін зерттеу мақсатында тәжірибе жүргізілді. Зерттеу барысында иілуге беріктілік, соққыға төзімділік және шаршауға төзімділік сияқты негізгі пайдалану көрсеткіштеріне назар аударылды. Алынған нәтижелер көміртекті талшық мөлшерінің артуымен барлық қасиеттердің айтарлықтай жақсаратынын көрсетті, бұл көміртекті талшықтың теміржол қызметкерлерінің кездесетін әртүрлі жағдайларда шпалдардың өмір сүру мерзімін және пайдалану сипаттамаларын арттыратынын дәлелдейді.

Өткізілген тәжірибелердің нәтижелері көміртекті талшықпен нығайтылған композиттік шпалдардың механикалық қасиеттерін анықтауға және оларды нығайтылмаған шпалдармен салыстыруға мүмкіндік береді. Иілу беріктігі, соққыға төзімділік және шаршау сипаттамалары (Iglesias & González, 2017) сияқты пайдалану қасиеттерін бағалау үшін бірқатар сынақтар жүргізілді.



1-сурет. Шпал жасау процесінің сызбасы

Ескерту: Singh, A. (2023)

3-кестеде нығайтылған және нығайтылмаған композиттік шпалдардың иілуге беріктілік есептеу нәтижелері келтірілген. Иілуге беріктік – бұл материалдың жүктеме әсерінен иілуге қарсы тұра алатындығын сипаттайтын негізгі көрсеткіш. Келтірілген мәліметтерде нығайтылған шпалдардың иілуге беріктілігінің нығайтылмаған шпалдарға қарағанда айтарлықтай артқаны байқалады.

3-кесте. Иілу кезіндегі беріктік көрсеткіштерінің салыстырмалы талдауы

Шпал түрі	Иілу беріктігі (МПа)	Стандартты ауытқу (МПа)	Жақсартылуы (%)
Иілуге төзімділігі төмен композит	75,3	4,2	-
Нығайтылған композит (5% КТ)	110,7	3,6	47,0
Нығайтылған композит (10% КТ)	128,9	5,1	71,4
Нығайтылған композит (15% КТ)	142,3	4,9	88,9
Ескерту: (Дьяков & Карпов, 2020; ASTM, 2019; ASTM, 2020; ISO, 2018); Авторлар құрастырған (эксперимент нәтижелері негізінде)			

Бұл кесте көміртекті талшықпен нығайтудың иілуге беріктікті қалай айтарлықтай арттыратынын көрсетеді. Бұл құрылымның тұтастығын сақтау үшін және теміржол шпалдарының иілу жүктемелеріне төзімділігін қамтамасыз ету үшін өте маңызды.

Соққыға төзімділік – теміржол шпалдарының негізгі механикалық қасиеттерінің бірі, өйткені олар қатты жүк пойыздарының әсеріне және рельстердегі кездейсоқ заттардан болуы мүмкін күшті соққыларға ұшырайды. Шпалдардың осындай соққылары жүктемелерді жұтып, тарата алмасы олардың төзімділігіне және нақты жұмыс



жағдайындағы өнімділігіне тікелей әсер етеді. Жоғары соққыға төзімділік деңгейі, әсіресе жиі динамикалық жүктемелер болған жағдайда, жақсырақ жұмыс істеу көрсеткіштерін білдіреді (МЕМСТ 33370-2015).

Көміртекті талшықпен нығайтылған композиттік шпалдардың соққыға төзімділігі артады деп болжануда. Бұл талшықты нығайту арқылы қамтамасыз етілетін беріктік пен энергияны тарату қабілетінің жақсаруына байланысты. Көміртекті талшықтар материалдың соққыға төзімділігін арттырып, жарылу мен қираудың алдын алады, нәтижесінде теміржол жүйелерінің жоғары стандарттарына сай сенімді шпалдар өндіруге мүмкіндік береді (4-кестені қараңыз).

4-кесте. Соққыға төзімділік нәтижелері

Шпал түрі	Соққыға төзімділік (Дж)	Стандартты ауытқу (Дж)	Жақсартылуы (%)
Иілуге төзімділігі төмен композит	10,5	1,2	-
Нығайтылған композит (5% КТ)	15,8	1,4	50,5
Нығайтылған композит (10% КТ)	18,4	1,6	75,2
Нығайтылған композит (15% КТ)	21,2	1,3	101,0
<i>Ескерту: (Дьяков & Карпов, 2020; ASTM, 2019; ASTM, 2020; ISO, 2018); Авторлар құрастырған (эксперименттік сынақ нәтижелері негізінде)</i>			

4-кестеде келтірілген ақпарат көміртекті талшықпен күшейтілген композиттік шпалдардың соққыға төзімділігінің арту үрдісін анық көрсетеді. Бастапқы негіз ретінде 10,5 Дж соққыға төзімділігі бар арматураланбаған композитті шпал алынған. Көміртекті талшықтың үлесі артқан сайын, шпалдың соққы энергиясын сіңіру қабілеті де артады.

5 % көміртекті талшықпен күшейтілген күшті композитті шпал соққыға төзімділіктің айтарлықтай ұлғаюын көрсетеді (15,8 Дж). Бұл көміртекті талшықтың тіпті аз мөлшерінің де материалдың динамикалық жүктемелерге төзу қабілетін айтарлықтай жақсартатынын дәлелдейді. Көміртекті талшықтың концентрациясы 10 %-ға дейін артқанда, күшейтілген композит 18,4 Дж соққыға төзімділік көрсетті, бұл сипаттамалардың анағұрлым айқын жақсаруын көрсетеді. Көміртекті талшықтың максималды деңгейінде (15 %) шпалдың соққыға төзімділігі 21,2 Дж-ға жетті, бұл ең жоғары жақсаруды растайды.

Бұл қорытындылар көміртекті талшықпен күшейтілген композитті шпалдардың соққыға төзімділігін айтарлықтай арттыратынын анық көрсетеді. Бұл беріктік пен энергия сіңіру қабілетінің жақсаруы шпалдарды теміржол қызметкерлері жиі кездесетін қиын жағдайларда пайдалануға бейімделеді.

Шаршауға төзімділік – теміржол инфрақұрылымында қолданылатын материалдар үшін өте маңызды сипаттама, себебі поездердің үздіксіз қозғалысынан шпалдар қайталанатын циклдік жүктемелерге ұшырайды, бұл материалда жарықтардың пайда болуына және ақырында бұзылуына әкелуі мүмкін. Сондықтан материалдардың шаршау жүктемелері әсеріндегі мінез-құлқын зерттеу олардың төзімділігін және жұмыс істеу қабілетін бағалау үшін маңызды.

Шаршау сынақтары негізінен қайталанатын жүктемелерді қолдану және материалдың осындай жағдайлардағы әрекетін талдау арқылы жүргізіледі. Материалдың бұзылуына дейінгі циклдер саны немесе оның сипаттамаларын айтарлықтай нашарлатпай белгілі бір циклдер санына төзу қабілеті шаршауға төзімділіктің көрсеткіштері болып табылады. Әдетте, жоғары шаршауға төзімділік жақсы пайдалану қасиеттерімен, техникалық қызмет көрсету шығындарының төмендеуімен және шпалдардың қызмет ету мерзімінің ұзаруымен (ASTM, 2019). Көміртекті талшықпен нығайту шаршауға төзімділікті



арттырады, себебі көміртекті талшық жоғары беріктік пен қаттылыққа ие, бұл жүктемелерді біркелкі таратуға ықпал етеді және жарықтардың таралу қаупін азайтады.

Шаршау сынақтары материалдың қайталанатын жүктемелер әсеріндегі әрекетін талдауға мүмкіндік береді, бұл поезддердің үздіксіз қозғалысына ұшырайтын теміржол шпалдары үшін өзекті мәселе. Кестеде көрсетілген шаршау сынақтарының нәтижелері күшейтілген шпалдардың күшейтілмеген шпалдарға қарағанда (5-кестені қараңыз) жарықтардың пайда болуына және бұзылуға төзімділігінің жоғары екенін көрсетеді.

5-кесте. Шаршауға төзімділік сынақтарының нәтижелері

Шпал түрі	Қирауға дейінгі циклдер саны	Стандартты ауытқу (циклы)	Жақсартылуы (%)
<i>Иілуге төзімділігі төмен композит</i>	150 000	10 000	-
Нығайтылған композит (5 % КТ)	250 000	12 000	66,7
Нығайтылған композит (10 % КТ)	350 000	15 000	133,3
Нығайтылған композит (15 % КТ)	450 000	18 000	200,0
<i>Ескерту: (Дьяков & Карпов, 2020; ASTM, 2019; ASTM, 2020; ISO, 2018); Авторлар құрастырған (шаршауға төзімділік сынақтарының нәтижелері негізінде)</i>			

Кестеде келтірілген деректер көміртекті талшық үлесінің өсуі композиттік шпалдардың шаршауға төзімділігін айтарлықтай арттыратынын көрсетеді. Қолдаусыз композиттік шпал бұзылуға дейін 150 000 жүктеме цикліне шыдайды және бұл көрсеткіш базалық мән ретінде алынады. Ал көміртекті талшық қосу нәтижесінде төзімділік елеулі түрде жақсарады: 5 % талшық енгізілген композит 250 000 циклге (66,7 % өсім), 10 % талшық енгізілген үлгі 350 000 циклге (133,3 % өсім), ал 15 % көміртекті талшықпен нығайтылған шпалдар 450 000 циклге дейін төтеп береді. Бұл дәстүрлі композиттермен салыстырғанда үш есе жоғары көрсеткіш болып табылады. Осы деректер көміртекті талшықпен нығайтудың композиттік шпалдардың қайталанатын циклдік жүктемелерге төзімділігін айтарлықтай күшейтетінін дәлелдейді.

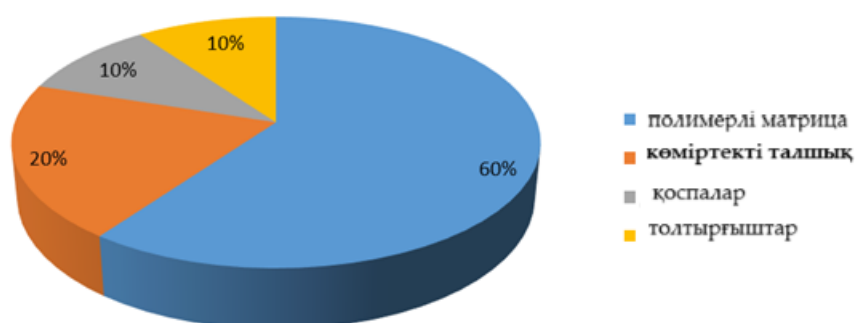
Кернеу-деформация қисығы материалдардың жүктеме әсеріндегі механикалық қасиеттерін талдауда негізгі құрал саналады. Ол кернеу (аудан бірлігіне әсер ететін күш) мен жүктеме әсерінен туындайтын деформация арасындағы байланысты көрсетеді. Мұндай қисық материалдың серпімділік, пластикалық қасиеттері мен шекті беріктігі туралы маңызды мәлімет береді. Әсіресе ауыр жүк пойыздары жүретін бағыттарда бұл көрсеткіштердің практикалық мәні зор.

Композиттік шпалдар контекстінде кернеу-деформация қисығы әртүрлі құрамдардың механикалық қасиеттерін салыстыруға мүмкіндік береді. Нығайтылмаған композиттер әдетте төмен қаттылық пен беріктікке ие болса, көміртекті талшық үлесінің артуы материалдың жүк көтеру қабілетін және деформацияға төзімділігін арттырады. 2-суретте көрсетілген график көміртекті талшықпен нығайтудың композиттік шпалдардың беріктігі мен теміржол жүктемелеріне төзімділігін айтарлықтай арттыратынын анық бейнелейді.

Кіріктірілген шпалдардың кернеу мен деформация арасындағы байланысын көрсететін диаграмма. Суретте көміртекті талшық үлесінің өсуі композитті шпалдардың беріктігі мен қаттылығын арттыратыны байқалады. Талшықпен нығайтылмаған композит жүктемеге төзімділігі төмен болса, ал 5 %, 10 % және 15 % көміртекті талшықпен нығайтылған нұсқалары кернеудің өсу деңгейін көрсетеді, бұл олардың механикалық қасиеттерінің жақсарғанын көрсетеді.



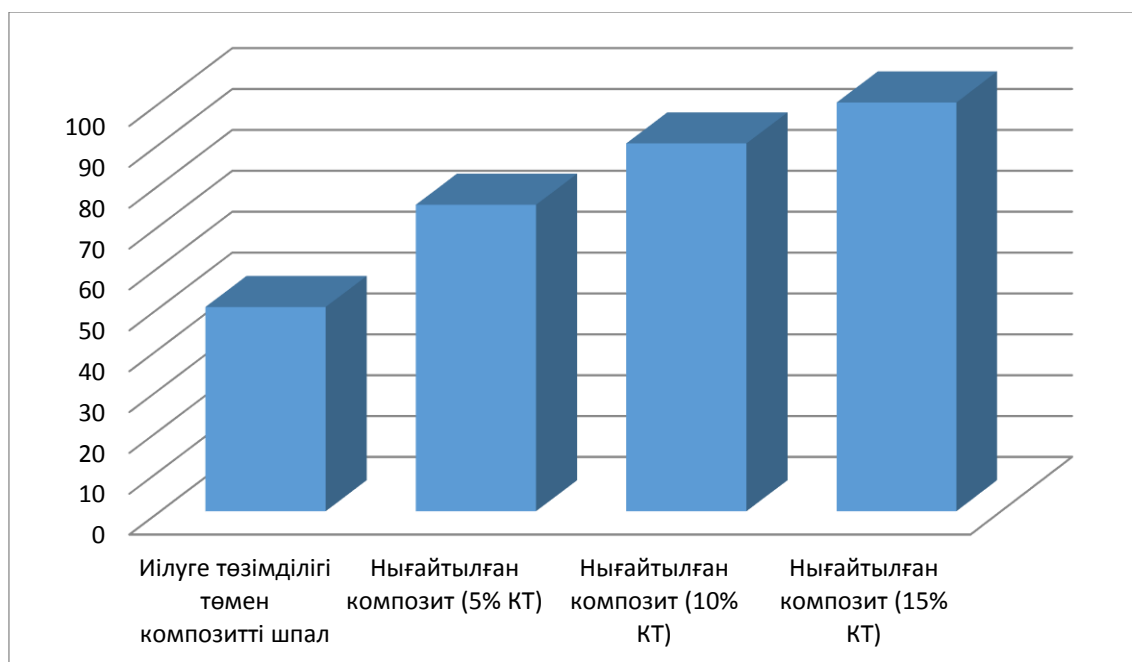
Композициялық шпалдардың құрамы



2-сурет. Әр құрамдағы шпалдардың кернеу-деформация қисықтары

Ескерту: Авторлар құрастырған

Төзімділік теміржол шпалдарының пайдалану сипаттамаларында маңызды рөл атқарады, өйткені олар үздіксіз жүктемелерге, қоршаған орта әсеріне және ұзақ мерзімді тозуға төзуге тиіс. Композитті шпалдардың төзімділігіне олардың шаршауға, соққыға және уақыт өте механикалық бұзылуға төзімділігі әсер етеді. Көміртекті талшықты қолдану композиттердің құрылымдық беріктігін арттырып, қызмет ету мерзімін ұзартады және техникалық қызмет көрсету шығындарын азайтады. Әдетте, төзімділік келесі критерийлер бойынша бағаланады: шаршау төзімділігі (сынуға дейінгі циклдер саны), соққыға төзімділік (сіңірілген энергия) және бұзылу жылдамдығы (материалдың уақыт өте тозуы). Талшықпен нығайтылмаған композиттер әдетте тезірек бұзылып, төмен жүктемелерде істен шығады, ал көміртекті талшықпен нығайтылған композиттер жоғары шаршау беріктілігін, жақсы соққы сіңіру қабілетін және қоршаған орта әсеріне төзімділігін көрсетеді (3-сурет).



3-сурет. Күшейтілген және күшейтілмеген шпалдардың төзімділігін салыстыру

Ескерту: Авторлар құрастырған (эксперименттік нәтижелер негізінде)



График көміртекті талшықпен күшейтілген материалдарда композиттік шпалдардың беріктігінің айтарлықтай артқанын көрсетеді. Күшейтілмеген композиттер ең төменгі беріктік деңгейін көрсетіп, олардың механикалық жүктемелерге және қоршаған орта әсерлеріне төзімділігінің төмендігін дәлелдейді. Көміртекті талшықтың үлесі артқан сайын беріктік сипаттамалары жақсарып, құрамында 5 % көміртекті талшық бар шпал күшейтілмеген нұсқамен салыстырғанда беріктікті 50 %-ға арттырса, 10 % және 15 % көміртекті талшық қосылған үлгілер қызмет ету мерзімін екі есеге дейін ұзартатыны анықталды. Бұл деректер көміртекті талшық пайдалану шаршау беріктігін айтарлықтай жақсартатынын, материалдың тозуын азайтатынын және теміржол шпалдарының қызмет ету мерзімін ұзарта алатынын растайды. Көміртекті талшықпен нығайтылған шпалдар дәстүрлі композиттік шпалдарға қарағанда иілу беріктігі, соққыға және шаршауға төзімділігі жоғары, серпімділік модулі ұлғайған және циклдік жүктемелер кезінде деформациясы аз болатындығымен ерекшеленеді. Сонымен қатар, олар ұзақ уақыт бойы өлшемдік тұрақтылықты сақтайды және уақыт өте келе жылжу ықтималдығын төмендетеді.

Графиктер көміртекті талшықтың үлесі артқан сайын серпімділік модулінің де жоғарылайтынын, яғни материалдың деформацияға қарсы тұру қабілетінің күшейетінін көрсетеді. Алынған нәтижелер көміртекті талшықпен нығайтылған шпалдардың дәстүрлі материалдарға қарағанда айтарлықтай артықшылықтары бар екенін және оларды жоғары жылдамдықтағы әрі ауыр жүк тиелген теміржол желілері үшін оңтайлы балама ететінін дәлелдейді. Сонымен бірге, олардың өндірістік қолданылуы да тиімді: көміртекті шпалдар салмақ бойынша 10-15 % жеңіл болғандықтан, тасымалдау және монтаждау шығындары азаяды, ал ұзақ мерзімділігі жөндеу аралығын 2-3 есеге арттырып, ұлттық теміржол компаниялары үшін экономикалық тұрғыдан маңызды үнемдеуге мүмкіндік береді. Есептеулер көрсеткендей, салмақты 10-15 % азайту тасымалдау шығындарын 8-12 %-ға төмендетеді, ал қызмет ету мерзімін 2-3 есе ұлғайту шпалдарды ауыстыру жиілігін азайтып, 10 жыл ішінде жолды жөндеу бюджетінің 20 %-ға дейін үнемделуін қамтамасыз етеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Көміртекті талшықпен нығайтылған композиттік шпалдарды өндіру теміржол инфрақұрылымын дамытудағы маңызды қадам болып табылады. Олар дәстүрлі ағаш, бетон және композиттік шпалдарға қарағанда жоғары механикалық сипаттамалар мен ұзақ қызмет ету мерзімін қамтамасыз етеді. Көміртекті талшық қосу нәтижесінде шпалдардың иілу беріктігі, соққыға төзімділігі және шаршауға қарсы тұрақтылығы айтарлықтай артып, оларды ауыр жүк тасымалы мен жоғары жылдамдықтағы магистральдарда қолдануға мүмкіндік береді.

Салыстырмалы талдау көміртекті талшықсыз шпалдардың функционалды болғанымен, қаттылығы төмен әрі циклдік жүктемелер кезінде деформацияға бейім екенін көрсетті. Ал көміртекті талшықпен нығайтылған шпалдар құрылымдық тұрақтылығымен ерекшеленіп, жүктеме астындағы деформацияны азайтады және қызмет ету мерзімін ұзартады.

Экономикалық тұрғыдан мұндай шпалдар техникалық қызмет көрсету мен ауыстыру шығындарын едәуір қысқартып, экологиялық тиімділікпен ұштасады. Зерттеу нәтижелері олардың созылу беріктігі 2 есе, иілу беріктігі 1,5 есе, соққыға төзімділігі 2 есеге жуық, ал шаршауға төзімділігі 3 есеге дейін артқанын көрсетті. Сонымен қатар, жеңіл салмағы тасымалдау шығындарын 8-12 % төмендетеді.

Осы ерекшеліктер көміртекті талшықпен нығайтылған шпалдарды дәстүрлі ағаш және бетон баламаларына тиімді альтернатива етеді. Болашақтағы зерттеулер композиттік



құрамды оңтайландыруға (мысалы, гибриді шыны-көміртекті талшықты арматура қолдану) және Қазақстан темір жолдарының сынақ учаскелерінде нақты жұмыс жағдайында сынақ жүргізуге бағытталуы мүмкін (Перспективы применения..., 2023).

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Смирнов, В.Л., & Рогозин, Е.С. (2021). Исследование механических свойств композиционных шпал с углеродным армированием. Журнал материаловедения, 44(2), 93–100. // Smirnov, V. L., & Rogozin, E. S. (2021). Issledovanie mekhanicheskikh svoystv kompozitsionnykh shpal s uglerodnym armirovaniem [Study of mechanical properties of composite sleepers with carbon reinforcement]. Zhurnal materialovedeniya, 44(2), 93–100. (In Russ.)
- Зиновьев, С.А., & Шмидт, А.Н. (2018). Эффективность применения углеволокна в производстве железнодорожных шпал. Научные труды, 56(1), 45–53. // Zinov'ev, S. A., & Shmidt, A.N. (2018). Effektivnost' primeneniya uglevolokna v proizvodstve zheleznodorozhnykh shpal [Efficiency of using carbon fiber in railway sleeper production]. Nauchnye trudy, 56(1), 45–53. (In Russ.)
- Дьяков, И. А., & Карпов, Н. П. (2020). Сравнение механических свойств углеродных и стеклопластиковых железнодорожных шпал. Известия МГТУ, 23(4), 37–44. // D'yakov, I.A., & Karpov, N.P. (2020). Sravnenie mekhanicheskikh svoystv uglerodnykh i stekloplastikovyykh zheleznodorozhnykh shpal [Comparison of mechanical properties of carbon and fiberglass railway sleepers]. Izvestiya MGTU, 23(4), 37–44. (In Russ.)
- Singh, A. (2023). A review on composite railways sleepers: Recent developments, limitations & future perspectives. Journal of Applied Materials Science & Engineering Research, 7(2), 145–149. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I12P130> (In Eng.)
- Iglesias, M., & González, C. (2017). Fatigue resistance of carbon fiber-reinforced polymer composite railway sleepers. Composite Structures, 159, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.027> (In Eng.)
- Chen, X., Li, Y., & Wang, J. (2020). Environmental benefits of composite railway sleepers: A life cycle assessment. Journal of Cleaner Production, 275, 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122136> (In Eng.)
- Zhang, H., & Liu, P. (2019). Numerical modeling of composite railway sleepers under static and dynamic loads. Engineering Structures, 199, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109118> (In Eng.)
- ГОСТ 33370–2015. Волокна химические штапельные для армирования строительных материалов и конструкций. Общие технические условия. Закон.kz. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=32396376 // GOST 33370–2015. Volokna khimicheskie shtapel'nye dlya armirovaniya stroitel'nykh materialov i konstruktsiy [Chemical staple fibers for reinforcement of construction materials and structures]. zakon.kz. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=32396376 (In Russ.)
- Перспективы применения полимерных шпал в железнодорожном строительстве. (2023). Tribune Scientists. <https://tribune-scientists.ru/articles/2893> // Perspektivy primeneniya polimernykh shpal v zheleznodorozhnom stroitel'stve [Prospects for the use of polymer sleepers in railway construction]. Tribune Scientists. <https://tribune-scientists.ru/articles/2893> (In Russ.)
- Изготовление шпалы из древесины с добавлением композиционного материала из промышленных отходов. (2023). Промвест. <https://promvest.info/ru/innovatsii/-izgotovlenie-shpalyi-iz-drevesinyi-s-dobavleniem-kompozitsionnogo-materiala-iz-promyshlennyih-othodov> // Izgotovlenie shpaly iz drevesiny s dobavleniem kompozitsionnogo materiala iz promyshlennykh otkhodov [Manufacturing of sleepers



from wood with composite material from industrial waste]. Promvest. <https://promvest.info/ru/innovatsii/izgotovlenie-shpalyi-iz-drevesinyi-s-dobavleniem-kompozitsionnogo-materiala-iz-promyshlennyih-othodov> (In Russ.)

Уникальные физико-механические свойства углеродного нанокompозита. (2011). Научная электронная библиотека. <https://web.snauka.ru/issues/2011/10/2981> // Unikal'nye fiziko-mekhanicheskie svoystva uglerodnogo nanokompозita [Unique physical and mechanical properties of carbon nanocomposite]. Nauchnaya elektronnaya biblioteka. <https://web.snauka.ru/issues/2011/10/2981> (In Russ.)

ASTM International. (2019). ASTM D790-19: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics. West Conshohocken, PA. (In Eng.)

ASTM International. (2020). ASTM D256-20: Standard test methods for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics. West Conshohocken, PA. (In Eng.)

ASTM International. (2019). ASTM D3479-19: Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, PA. (In Eng.)

ISO. (2018). ISO 178: Plastics — Determination of flexural properties. International Organization for Standardization. (In Eng.)

Авторлар туралы мәліметтер Информация об авторах Information about authors



Батырова Динара Жалеловна – техника ғылымдарының кандидаты, Каспий қоғамдық университеті, Алматы қ., Қазақстан

Батырова Динара Жалеловна – кандидат технических наук, Каспийский общественный университет, г. Алматы, Казахстан

Batyrova Dinara Zhalelovna – Candidate of Technical Sciences, Caspian University, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: dinara2103kz@gmail.com ,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0298-1963>,



Абдраимова Гульнара Аманжоловна – техника ғылымдарының кандидаты, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

Абдраимова Гульнара Аманжоловна – кандидат технических наук, Казахский национальный исследовательский технический университет, г. Алматы, Казахстан

Abdraimova Gulnara Amanzholovna – Candidate of Technical Sciences, Kazakh national research technical university, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: gulnara409@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7495-358X>,



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_303

FTAXP 06.43.01

ҚҰРҒАҚ КЛИМАТТЫ ЖАҒДАЙДАҒЫ ЖЕР ТӨСЕМЕ ТОПЫРАҒЫНЫҢ ЫЛҒАЛДАНУ ДЕҢГЕЙІНЕ АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕМЕЛЕР МЫСАЛДАРЫ

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАСЧЁТНОЙ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА В УСЛОВИЯХ ЗАСУШЛИВОГО КЛИМАТА

EXAMPLES OF CALCULATIONS FOR DETERMINING THE DESIGN MOISTURE CONTENT OF EARTHWORK SOIL IN ARID CLIMATE CONDITIONS

А.Г. Есболат ^{1*}, А.К. Киялбаев ¹, Д.Е. Есентай ¹

¹Л.Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ, Қазақстан

*Автор-корреспондент: Есболат Әсел Ғайниқызы, e-mail: ashkeyeva@mail.ru

Түйінді сөздер:

құрғақ климат,
топырақтың
ылғалдылығы, есептеу
кезеңі, топырақ
тығыздығының
коэффициенті,
топырақтың қаңқалық
тығыздығы, стандартты
тығыздау деңгейі,
топырақтың аяздық
жиналуы.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақала Қазақстанның шөлді және шөлейт аймақтарына тән құрғақ климат жағдайында жер төсемі топырағының есептік ылғалдылығын есептеу әдістерін зерттеуге арналған. Ылғал тапшылығын, топырақ қасиеттерінің маусымдық өзгеруін және климаттық факторлардың жер төсемінің көтергіштігіне әсерін қоса алғанда, жол құрылысына әсер ететін топырақ жағдайларының ерекшеліктері қарастырылады. Топырақтың қату тереңдігін, ылғалдың әр түрлі түрлеріндегі жұмыс қабатының есептік ылғалдылығын анықтауды, сондай-ақ жер асты және жер үсті суларының деңгейінен төсеніш бетінің биіктігін есептеуді қамтитын есептеулердің мысалдары келтірілген. Нәтижелер олардың беріктігі мен сапасын қамтамасыз ету үшін жолдарды жобалау және салу кезінде климаттық және гидрогеологиялық ерекшеліктерді ескеру қажеттілігін көрсетеді. Шөлді және шөлейт жерлерде жол салу кезінде жер төсемін салу шарттары әдеттегіден біршама ерекшеленеді. Топырақ қабаттары тығыздалған кезде, бұл аймақта топырақ шөгінділерінде ауа ылғалдылығының жетіспеушілігі жиі кездеседі және маусымдық өзгерістер артық ылғалға әкеледі.

Ключевые слова:

сухая зона, влажность
почвы, расчетный период,
коэффициент уплотнения
почвы, плотность
каркасной структуры
почвы, стандартное
уплотнение, морозное
пучение почвы.

АННОТАЦИЯ

Статья рассматривает методы определения расчетной влажности грунта земляного полотна в условиях засушливого климата, характерного для пустынных и полупустынных зон Казахстана. Рассмотрены особенности грунтовых условий, влияющих на строительство дорог, включая дефицит влажности, сезонные изменения свойств грунта и влияние климатических факторов на несущую способность земляного полотна. Приведены примеры расчётов, включающих определение глубины промерзания грунта, расчётной влажности рабочего слоя при различных типах увлажнения, а также расчёт возвышения поверхности дорожного покрытия над уровнями подземных и поверхностных вод. Выводы акцентируют



внимание на важности учёта климатических и гидрогеологических условий при проектировании и строительстве автомобильных дорог, чтобы гарантировать их надёжность и долговечность. В засушливых и полупустынных регионах формирование земляного полотна происходит в специфических условиях, отличающихся от традиционных. Недостаточная влажность грунтов затрудняет их уплотнение, а резкие сезонные колебания могут приводить к временному переувлажнению верхних слоёв почвы.

Keywords:

dry region, soil humidity, calculation period, compaction factor, soil skeleton density, standard compaction, frost heave of soil.

ABSTRACT

The article is devoted to the study of methods for calculating the calculated moisture content of the soil of the roadbed in an arid climate typical of the desert and semi-desert zones of Kazakhstan. The features of soil conditions affecting the construction of roads are considered, including moisture deficiency, seasonal changes in soil properties and the influence of climatic factors on the bearing capacity of the roadbed. Examples of calculations are given, including the determination of the depth of soil freezing, the calculated humidity of the working layer for various types of humidification, as well as the calculation of the elevation of the pavement surface above the levels of groundwater and surface waters. The conclusions emphasize the need to take into account climatic and hydrogeological features in the design and construction of roads to ensure their durability and quality. When building roads in desert and semi-desert areas, the conditions for the construction of the roadbed are somewhat different from the usual ones. When compacting the soil layers in this zone, there is often a shortage of air humidity in the soil deposits, and seasonal changes lead to excessive moisture.

КІРІСПЕ

Қазақстан аумағының басым бөлігін алып жатқан шөлді және шөлейтті жерлерде, сондай-ақ қатты суық аймақтарда жол салу кезінде жер төсемін тұрғызу жағдайлары әдеттегіден өзгеше және өзіндік ерекшеліктерге ие. Бұл ерекшеліктерді жұмысты ұйымдастыру жобасында ескеру қажет. Мұндай ерекшеліктерді ескеру ең тиімді механизация құралдарын дұрыс анықтауға және жұмыстың сапалы орындалуын қамтамасыз ететін тиісті технологияны әзірлеуге мүмкіндік береді.

Әдеби шолу.

Қазақстанның аридті аймақтарында жол құрылысы бірқатар ерекше табиғи-климаттық жағдайлармен байланысты, олар жер төсемесін тұрғызу процесіне де, жол төсемесінің пайдалану сипаттамаларына да айтарлықтай әсер етеді. Бұл аймақтардағы басты мәселелердің бірі – атмосфера мен топырақтағы ылғал тапшылығы, ол өз кезегінде негізді тиімді нығыздауды қиындатады.

Сонымен қатар, ылғалдылықтың маусымдық ауытқуы топырақтың физика-механикалық қасиеттерін өзгертеді, оның ішінде шамадан тыс құрғаған күйден артық ылғалданған күйге ауысуы, бұл өз кезегінде негіздің тұрақтылығы мен беріктігіне әсер етеді.

Құрғақ климаттық аймақтарда жолдарды жобалау кезінде топырақ негізінің көтергіштік қабілетін төмендететін және құрылыс процесін қиындататын мынадай табиғи және техногендік факторларды ескеру қажет (Цытович Н.А., 1973 деректері бойынша):

- топырақ пен ауадағы ылғал тапшылығы, сондай-ақ топырақтың беріктігі мен тығыздығын өзгертетін маусымдық үлкен ауытқулар;
- лесс, тұзды топырақтар, сортаң және сор сияқты топырақтардың кең таралуы, олардың ылғал өзгерісіне жоғары сезімталдығы және нашар тығыздалуы;



– антропогендік қызметтің әсері – әсіресе суару, ол жер асты сулары деңгейінің көтерілуіне әкеледі, сонымен қатар жердің қымбат болуына байланысты құрылысқа жарамды топырақтың шектеулілігі;

– құрылыс үшін екі күрделі кезеңнің болуы: қысқы (топырақ қататын) және жазғы (жоғары температура мен артық құрғау), бұл технологиялық процестерді қиындатады.

Осыған байланысты аридті климат жағдайында жер төсемесін тұрғызу кешенді көзқарасты қажет етеді, ол инженерлік шешімдерді бейімдеуді және климаттық пен геологиялық факторлардың жол төсемесінің беріктігі мен ұзақ мерзімділігіне теріс әсерін азайтуға бағытталған технологияларды қолдануды қамтиды.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

1-мысал. Жол жамылғысының қабаттарындағы жылу алмасу процесі жол үстіндегі ауа қабатынан берілетін жылу арқылы жүзеге асады, ал оның негізгі көзі – күн радиациясы. Осылайша бұл процесті қозғалыстағы ауа ағынынан қатты кедергі (асфальтбетон жамылғысы) арқылы өтетін жылу энергиясының берілуі, яғни жылуалмасу ретінде қарастыруға болады.

Техникалық есептеулерде, әдетте, екі қозғалыстағы сұйық ағын арасындағы жылу алмасу олардың арасындағы көпқабатты қатты қабырға арқылы өтетін процесс ретінде қарастырылады. Бұл кезде әрекеттесуші орталардың температурасы мен олардың жылу беру коэффициенттері ескеріледі. Дәл осылайша бірнеше конструктивтік қабаттан тұратын жол жамылғысын көпқабатты құрылым ретінде қарастыруға болады. Әрбір қабаттың өзіндік жылу өткізгіштігі мен белгілі бір қалыңдығы бар, бұл бүкіл төсеменің жылулық қасиеттеріне әсер етеді. Орта температуралары $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$, ал олардың жылу беру коэффициенттері α_1 и α_2 .

Жол жамылғысы құрылымдық қабаттардан тұратындықтан, оны n қабаттан құралған көпқабатты бет ретінде қарастыруға болады. Әрбір қабаттың жылу өткізгіштік коэффициенті – $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ ал олардың қалыңдығы – $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$.

Жылу алмасу процесіндегі жылу ағынының тығыздығы мына теңдеу арқылы анықталады: /7/.

$$q = k(t_{ж1} - t_{ж2}), \quad (1)$$

мұнда

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (3)$$

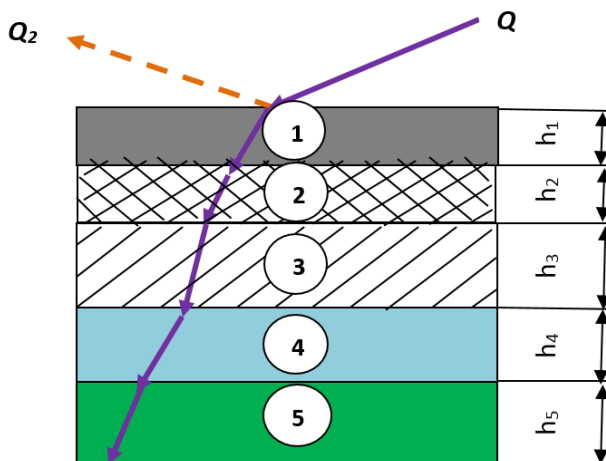
мұндағы k – жылу өткізгіштік коэффициенті, ол жабынның бірлік ауданы арқылы температура айырмасы 1 °C болғанда бірлік уақыт ішінде өтетін жылу мөлшерін сипаттайды;

R – жылулық кедергі, ол жылу беру коэффициентінің кері шамасы (Кравченко С.Е., Реут Ж.В., 2020).

Асфальтбетон жамылғысының жылу өткізгіштігінің өзгеруінің топырақтың қату тереңдігіне әсерін теориялық тұрғыдан талдау үшін (3) теңдеуді қолданамыз.

Жол жамылғысының үстіңгі қабатының жылу өткізгіштігінің әртүрлі мәндерінде топырақтың қату тереңдігін анықтау үшін алдымен тәжірибелік зерттеу бөлімінде сипатталған жол жамылғысының құрылымы бар сынақ алаңына есептеулер жүргізу қажет (2.4-2.6 кестеге қараңыз).

Осы кестелерге сәйкес, жол төсемесінің мәндері төмендегідей: 1 – (жоғарғы) қабат – асфальтбетон қалыңдығы $h_1 = 0,06\text{ м}$, жылу өткізгіштік коэффициенті $\lambda_1 = 1,54\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; 2-қабат – $h_2 = 0,12\text{ м}$, $\lambda_2 = 1,19\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; 3-қабат – $h_3 = 0,18\text{ м}$, $\lambda_3 = 0,65\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; 4-қабат – $h_4 = 0,06\text{ м}$, $\lambda_4 = 0,51\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; жер төсемінің топырағы-ауыр саздақ $t_{\text{г}} = -0,9^\circ\text{C}$.



1-сурет. Күн энергиясынан жамылғы бетіне берілетін жылу мөлшерін бөлу схемасы
Ескерту – автор (Есболат, 2024) негізінде құрастырған

Асфальтбетонның әртүрлі фракцияларының (құмды, майда түйіршікті, орташа түйіршікті және ірі түйіршікті) жылу өткізгіштік коэффициенттері 3.1-кестедегі деректер негізінде анықталды. Әрбір жамылғы түріне есептелген орташа мәндер 1-кестеде берілген.

Алынған нәтижелерді талдау асфальтбетонның жылу өткізгіштігінің төмендеуі топырақтың қату тереңдігін азайтатынын, бұл өз кезегінде шұңқырлардың пайда болуы және жол жамылғысының бұзылуының алдын алуға ықпал ететінін көрсетеді.

Құмды, майда түйіршікті, орташа түйіршікті және ірі түйіршікті асфальтбетон түрлеріне арналған жылу өткізгіштік коэффициенттерінің орташа мәндері 2-кестеде келтірілген және олар 1-кестедегі деректер негізінде есептелген (Ivanov A.A., Petrov V.V., 2021).

1-кесте. Топырақтың қату тереңдігі мен жол құрылымдарының теориялық есептеулерінің нәтижелері

	Жамылғының түрі	Қабаттардың қалыңдығы мен жылу өткізгіштігі $h, \text{ м}; \lambda \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$	Жылу кедергісі, R_0 , $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$	Қату тереңдігі $h, \text{ м}$
1	2	3	4	5
1	1 қабат ұсақ түйіршікті асфальтбетон 2 қабат ірі түйіршікті асфальтбетон	$h_1 = 0,05; \lambda_1 = 0,69$ $h_2 = 0,08; \lambda_2 = 1,32$	0,59	0,72
2	1 қабат ұсақ түйіршікті асфальтбетон 2 қабат орташа түйіршікті асфальтбетон	$h_1 = 0,05; \lambda_1 = 0,69$ $h_2 = 0,06; \lambda_2 = 1,15$	0,61	0,68



1-кестенің соңы

1	2	3	4	5
3	1 қабат құмды асфальтбетон 2 қабат ірі түйіршікті асфальтбетон	$h_1 = 0,035; \lambda_1 = 0,42$ $h_2 = 0,08; \lambda_2 = 1,32$	0,60	0,70
4	1 қабат құмды асфальтбетон 2 қабат түйіршікті асфальтбетон	$h_1 = 0,035; \lambda_1 = 0,42$ $h_2 = 0,06; \lambda_2 = 1,15$	0,63	0,62
5	1 қабат орташа түйіршікті асфальтбетон 2 ұсақ түйіршікті асфальтбетон	$h_1 = 0,035; \lambda_1 = 0,42$ $h_1 = 0,06; \lambda_1 = 0,69$	0,68	0,57
6	1 қабат орташа түйіршікті асфальтбетон 2 ұсақ түйіршікті асфальтбетон	$h_2 = 0,05; \lambda_2 = 1,15$ $h_2 = 0,08; \lambda_2 = 1,32$	0,53	0,80

Ескерту – автор (Есболат, 2024)

2 мысал. Негіздің жұмыс қабаты кезіндегі судың есептік мөлшерін анықтау.

Автомобиль жолының трассасы жасанды суару аймағында орналасқан учаскеден өтеді. Жұмыс қабатының материалы ретінде шаңды құрылымды жеңіл лайлы топырақ пайдаланылады, ал оның келесі сипаттамалары бар:

1. Топырақ пен жол төсемінің құрылысы
2. Топырақтың ылғалдылығы және тығыздалуы.

Зерттелген топырақ үшін негізгі ылғалдылық көрсеткіштері анықталды: илену шегі топырақтағы ылғал мөлшері 17 % болғанда байқалады, ағымды күйге көшу 29 % кезінде орын алады, ал оңтайлы ылғалдылық 16 %-ға тең. Бұл топырақтың минералдық бөлігінің ең жоғары тығыздығы $1,7 \text{ т/м}^3$ құрайды. КазАЖИ жүргізген зертханалық сынақтардың нәтижесінде материалдың тығыздау коэффициенті 0,98 деңгейінде белгіленді.

Жол конструкциясының қабаттарының құрамы

Жол жамылғысы мынадай қабаттардан тұрады:

Жоғарғы қабат: ыстық тығыз асфальтбетон (тығыздығы – $2,4 \text{ т/м}^3$, қалыңдығы – 5 см).

Аралық қабат: кеуекті асфальтбетон (тығыздығы – $2,3 \text{ т/м}^3$, қалыңдығы – 8 см).

Негізгі қабат: гранитті шағылтас, қию әдісімен төселген (тығыздығы – $1,8 \text{ т/м}^3$, қалыңдығы – 20 см).

Төменгі қабат: орта түйіршікті құм (тығыздығы – $1,95 \text{ т/м}^3$, қалыңдығы – 20 см).

Жұмыс қабатының ылғалдану дәрежесі бойынша ол үшінші түрге жатады.

Нормативтік ылғалдылық

Жол төсемінің астындағы топырақта аяздық ісіну қаупін болдырмайтын нормативтік ылғалдылықты анықтау қажет. Негіздің шекті рұқсат етілген ылғалдылығын дер кезінде белгілеу қысқы жағдайда жол төсемінің тұрақтылығы мен ұзақ мерзімділігін қамтамасыз етеді.

Есептеу алгоритмі. Қату аймағындағы есептелген топырақ ылғалдылығының мәнін келесі формула бойынша анықтауға болады [3]:

$$W_{PACЧ(M)} = \frac{\rho_B}{1,09} \left\{ \frac{1 + I_{ПЧ} \left[1 - a_{П} l_g \left(1 + \frac{P}{P_o} \right) \right]}{K_y \rho_{СК(MAX)}} - \frac{1}{\rho_{ГР}} \right\} + 0,083 W_{ИЗ} \quad (4)$$

Топырақтың есептік ылғалдылығын анықтау

Жол төсемінің астындағы қату аймағының есептік ылғалдылығы $W_{есеп(ЗМ)}$ деп белгіленеді және бірлік үлесімен көрсетіледі. Бұл ретте:



– топырақтың аяздық ісіну шамасы;
– топыраққа түсетін жүктеменің әсерін сипаттайтын α_p , өлшемсіз коэффициент;
– жабын құрылымының салмағынан пайда болатын қысым P , ол 0,98 МПа-ға тең қабылданады.

Топырақтағы қатпайтын судың шамасы мына формула бойынша анықталады:

$$W_{из} = K_{кз} \cdot W_n \quad (5)$$

мұндағы $K_{кз}$ топырақтың түрі мен күйіне байланысты коэффициент W_n , а – илену шегіндегі ылғалдылық.

Егер қату ескерілмесе, есептік ылғалдылық мынадай түрде анықталады:

I типті ылғалдану үшін:

$$W_{EC(1)} = \frac{W_{опт} + W_{РАС(2,3)}}{2} \quad (6)$$

II және III типті ылғалдандыру:

$$W_{есеп(2,3)} = \frac{(\rho_{гр} - K_y \cdot \rho_{ск(макс)}) \cdot P}{K_y \cdot \rho_{ск(макс)} \cdot V_B - V_{ауа}} \quad (7)$$

мұндағы:

$\rho_{гр}$ – топырақтың тығыздығы;

$\rho_{ск(макс)}$ – қаңқаның шекті тығыздығы;

V_B – жердегі бөлшектердің үлесі;

$V_{ауа}$ – ауа кеуектілігі;

K_y – тығыздау коэффициенті (нормативті түрде белгіленген).

Есептеу тәртібі.

$$W_{РАСЧ(3)} = \frac{(2,69 - 0,98 \cdot 1,70) \cdot 1,0}{0,98 \cdot 2,69 \cdot 1,70} - 0,02 = 0,208$$

$$\text{Салыстырмалы ылғалдық шамасы құрайды: } \frac{W_{РАСЧ(3)}}{W_L} = \frac{0,208}{0,29} = 0,72$$

$$\text{Жұмыс қабатын ылғалдандырудың 2-түрі: } W_{РАСЧ(2)} = W_{РАСЧ(3)} = 0,208$$

$$\frac{W_{РАСЧ(2)}}{W_L} = \frac{0,208}{0,29} = 0,72.$$

Жұмыс қабатын ылғалдандырудың 1-түрі.

$$\text{Есептеу формула бойынша жүргізіледі: } W_{РАСЧ(1)} = \frac{0,16 + 0,21}{2} = 0,185$$

$$\text{Салыстырмалы ылғалдық шамасы құрайды: } \frac{W_{РАСЧ(1)}}{W_L} = \frac{0,185}{0,29} = 0,64$$

2. Жол төсемінің астындағы жер негізінің тоңуы ескерілген жағдайда топырақтың есептік ылғалдылығын есептеу

Шығу деректері:

Жол төсемінің құрылысы астында орналасқан тоңған топырақ қабатының қалыңдығы 0,2 м құрайды. Барлық басқа параметрлер жоғарыда берілген деректерге сәйкес қабылданады.

Есептеудің бастапқы кезеңі – жол төсемі қабаттарының массасының топырақ бетіне келтіретін қысымын анықтау. Бұл қысым кейінгі есептеулерде – аяздық қысымның әсерін және қату зоналарындағы есептік ылғалдылықты есептегенде ескеріледі.

$$P = (2400 \cdot 0,05 + 2300 \cdot 0,08 + 1800 \cdot 0,20 + 1950 \cdot 0,20) \cdot 0,0098 = 10,3 \text{ КПа.}$$



Одан кейін (3) формула бойынша топырақтағы қатпайтын судың мөлшері есептеледі: $W_{из}=0,40 \cdot 0,17=0,068$.

1-түрдегі ылғалдану үшін (2) формула бойынша жер төсемінің қату аймағындағы топырақтың есептік ылғалдылығының шамасы анықталады.

$$W_{PAC(M)} = \frac{1,00}{1,09} \left\{ \frac{1 + 0,02 \left[1 - 0,5 l_g \left(1 + \frac{10,3}{9,8} \right) \right]}{0,98 \cdot 1,70} - \frac{1}{2,69} \right\} + 0,083 \cdot 0,068 = 0,224$$

$$\text{Бұл қабатта } \frac{W_{PAC(M)}}{W_L} = \frac{0,224}{0,29} = 0,77.$$

Қату тереңдігінен төмен жерде топырақтың 0,185-ке тең (жоғарыны қараңыз). Сонда жұмыс қабаты топырағының есептік ылғалдылығының тереңдік бойынша орташа мәні мынадай болады:

$$W_{\Delta \hat{N} \times (1)} = \frac{0,224 \cdot 0,2 + 0,185 \delta (1,2 - 0,2)}{1,2} = 0,192.$$

Ағымдылық шегіндегі ылғалдылыққа қатысты есептік ылғалдылық мынадай шаманы құрайды

$$\frac{0,192}{0,29} = 0,66.$$

2-түрдегі ылғалдану үшін қату тереңдігіндегі топырақтың ылғалдылығы 0,208-ге тең болады:

$$W_{PAC(2)} = \frac{0,236 \cdot 0,2 + 0,208 \cdot (1,2 - 0,2)}{1,2} = 0,213.$$

Жұмыс қабатын ылғалдандырудың 3-түрі үшін:

$$W_{PAC(M)} = \frac{1,00}{1,09} \left\{ \frac{1 + 0,02 \left[1 - 0,5 l_g \left(1 + \frac{10,3}{9,8} \right) \right]}{0,98 \cdot 1,70} - \frac{1}{2,69} \right\} + 0,083 \cdot 0,068 = 0,257.$$

3-мысал. III техникалық санаттағы автомобиль жолын қарастырайық, ол жасанды суару аймағынан өтеді. Жаз мезгілінде жер асты суларының деңгейі жер бетіне дейін 0,3 м-ге көтеріледі, ал күзгі-көктемгі маусымда ол 1,5 м-ге дейін төмендейді. Бұдан бөлек, жаз айларында 30 күннен астам уақыт бойы жол жолағының ішінде 0,05 м қалыңдыққа дейінгі қабатпен жер үсті суларының жиналуы байқалады. Жол жамылғысының астындағы топырақ қабаттары қатуға ұшырамайды. Барлық басқа жағдайлар 1-мысалда сипатталған параметрлерге сәйкес келеді.

Есептеу алгоритмі: Жаз мезгілінде жол жамылғысының жер асты сулары деңгейінен қажетті көтерілу биіктігін анықтау белгіленген есептік алгоритм бойынша жүзеге асырылады, ол учаскенің гидрологиялық және геотехникалық сипаттамаларын ескереді. («Қазақстанның құрғақ аймақтарында топырақты тығыздау жөніндегі әдістемелік ұсынымдар», 1983).



$$W_{PACЧ(1)} = W_{OIT} + W_{PACЧ(2,3)} / 2. \quad (8)$$

мұндағы $W_{есеп(1)}$ – жұмыс қабатының 1-типтегі ылғалдануы кезінде есептеу кезеңіндегі топырақтың ылғалдылығы, бірлік үлесімен;

$W_{оит}$ – топырақтың оңтайлы ылғалдылығы, бірлік үлесі;

$W_{есеп(2,3)}$ – жұмыс қабатының 2 және 3 типтегі ылғалдануы кезінде есептеу кезеңіндегі топырақтың ылғалдылығы, бірлік үлесімен.

Асфальтбетонның ыстық тығыз түрінің серпімділік модулі – 3200 МПа, қабат қалыңдығы 0,05 м, кеуекті асфальтбетонның серпімділік модулі – 2000 МПа, қабат қалыңдығы 0,08 м, граниттен жасалған бірдей қиыршық тас серпімділік модулі – 400 МПа, қабат қалыңдығы 0,2 м, орта түйіршікті құмның серпімділік модулі – 100 МПа, қабат қалыңдығы 0,2 м.

$$E_{д.о} = \frac{3200 \cdot 5 + 2000 \cdot 8 + 400 \cdot 20 + 100 \cdot 20}{53} = 792 \text{ МПа.}$$

Салыстырмалы ылғалдылығы 0,72 болған жағдайда (жоғарыны қараңыз) жеңіл шаңды саздақтың серпімділік модулі [4] деректеріне сәйкес $E_{гр}=43$ құрайды. Сол Инструкцияға сәйкес доңғалақтың жапсар бетіне түсіретін орташа есептік меншікті қысымы $P=0,6$ МПа, ал қозғалыстағы автокөлік доңғалағының ізіне сәйкес есептік диаметрі $D=0,37$ м. Осы шамаларды (6) формуласына қойсақ, мынадай нәтижеге қол жеткіземіз:

$$\Delta H_{п.в} = \frac{37 \cdot \sqrt{\frac{0,6 - 0,012}{1,5 - 0,012}}}{1,1 \cdot \sqrt[3]{\frac{792}{43}}} = 0,73 \text{ м.}$$

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Жаз мезгілінде жер асты суларының деңгейі жер бетінен 0,3 м тереңдікте орналасатынын ескере отырып, үйіндінің ең аз биіктігі 0,43 м болуы тиіс (0,73-0,3). Күзгі-көктемгі маусымда жер асты суларының деңгейі жер бетінен 1,5 м тереңдікке дейін төмендейді, бұл үйіндінің кемінде 0,1 м биіктігін қажет етеді (1,6-1,5). Бұдан бөлек, жаз мезгілінде 30 күннен астам уақыт бойы жер үсті суларының 0,5 м қалыңдықтағы қабаты жиналады, бұл үйіндінің биіктігі кемінде 0,95 м болуын қажет етеді. (Smith D., Johnson M., 2020).

Құрғақ климат жағдайында жер жұмыстарының ең тиімді кезеңі – топырақтың табиғи ылғалдылығы оның оңтайлы мәніне барынша жақындаған уақыт. Суармалы аумақтарда мұндай жұмыстарды жүргізудің қолайлы уақыты қазаннан мамырға дейінгі кезең болып табылады, ал игерілмеген аймақтарда ол ақпаннан мамырға дейінгі уақытпен шектеледі. Жұмыстарды жүргізудің ең оңтайлы уақытын дәл анықтау үшін соңғы он жылдағы орташа статистикалық деректерге (ауа температурасы, жауын-шашын мөлшері және булану көрсеткіштері) негізделген климаттық кесте жасалады. (Kuznetsov E.P., Savel'ev I.V., 2020).

ҚОРЫТЫНДЫ

Топырақтың шамадан тыс ылғалдануы немесе артық құрғауы оның босап кетуіне немесе ісінуіне әкелуі мүмкін. Мұндай жағдайлардың алдын алу үшін жұмыс қабатының тығыздығы жоғары учаскелерде жол жабынын төсеуді жер жұмыстары аяқталғаннан кейін бірден орындау ұсынылады. Бұл сыртқы факторлардың әсерін барынша азайтып, ұзаққа созылатын технологиялық үзілістерді болдырмайды.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.



ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (2018). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. New York: Wiley, 522 p.
- Zhang, L., & Chen, W. (2021). Modeling soil moisture variability in arid climates. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 147(3), 230-242.
- Smith, D., & Johnson, M. (2018). Thermal properties of road materials in cold regions. Journal of Cold Regions Engineering, 32(4), 123-135.
- Brown, R., & Davis, L. (2017). Impact of moisture on thermal conductivity of soils. Geotechnical Journal, 45(2), 67-78.
- Lee, S., & Kim, H. (2019). Freeze-thaw effects on pavement materials. International Journal of Pavement Engineering, 20(1), 45-56.
- Определение расчетной влажности грунтов для строительства дорог в засушливых регионах (2022). Геотехнический журнал, (2), 45-53. // Opredelenie raschetnoj vlazhnosti gruntov dlja stroitel'stva dorog v zasushlivyh regionah [Determination of design soil moisture for road construction in arid regions]. Geotechnical Journal, (2), 45-53. (In Russ.)
- Цытович, Н. А. (1973). Механика грунтов. Краткий курс. Москва: Высшая школа, 280 с. // Tsytovich, N. A. (1973). Mekhanika gruntov. Kratkyj kurs [Soil mechanics. Short course]. Moscow: Vysshaya shkola, 280 p. (In Russ.)
- Киялбаев, А.К. (2023). Теоретические и экспериментальные методы транспортного строительства. Учебник часть 1 и часть 2. Алматы-Бишкек: Adal kitap, 343 с. и 356 с. // Kiyalbayev, A.K. (2023). Teoreticheskie i eksperimentalnye metody transportnogo stroitel'stva. Uchebnik chast 1 i chast 2 [Theoretical and experimental methods of transport construction. Textbook Part 1 and Part 2]. Almaty-Bishkek: Adal kitap, 343 p. and 356 p. (In Russ.)
- Методические рекомендации по уплотнению грунтов в засушливых районах Казахстана (1983). Алма-Ата: КаздорНИИ, 24 с. // Metodicheskie rekomendacii po uplotneniju gruntov v zasushlivyh raionah Kazahstana [Guidelines for soil compaction in arid regions of Kazakhstan]. Alma-Ata: KazdorNII, 24 p. (In Russ.)
- СН РК 3.03-19-2006. Проектирование дорожных одежд нежесткого типа (2007). Астана: Минтранс РК, 86 с. // SN RK 3.03-19-2006. Proektirovanie dorozhnyh odezhd nezhestkogo tipa [Design of flexible pavements]. Astana: Mintranskom RK, 86 p. (In Russ.)
- Иванов, А. А., & Петров, В. В. (2021). Расчет влажности грунта земляного полотна: основы и методы. Журнал строительной механики, (4), 23-31. // Ivanov, A. A., & Petrov, V. V. (2021). Raschet vlazhnosti grunta zemljanogo polotna: osnovy i metody [Calculation of soil moisture of roadbed: fundamentals and methods]. Zhurnal stroitel'noj mehaniki, (4), 23-31. (In Russ.)
- Сидоров, Н. Н. (2019). Грунтоведение: теоретические и прикладные аспекты. Москва: Изд-во МИСИ, 276 с. // Sidorov, N. N. (2019). Gruntovedenie: teoreticheskie i prikladnye aspekty [Soil science: theoretical and applied aspects]. Moscow: MISI, 276 p. (In Russ.)
- Кузнецов, Е. П., & Савельев, И. В. (2020). Влияние климатических условий на эксплуатацию земляного полотна. Наука и технологии в дорожном строительстве, (3), 15-22. // Kuznesov, E. P., & Savel'ev, I. V. (2020). Vlijanie klimaticheskikh uslovij na jekspluataciju zemljanogo polotna [Impact of climatic conditions on roadbed operation]. Nauka i tehnologii v dorozhnom stroitel'stve, (3), 15-22. (In Russ.)
- Борисова, О. П., & Логинов, К. А. (2020). Расчет влажности грунта при строительстве дорог в условиях недостаточного увлажнения. Транспортная инфраструктура, (6), 31-38. // Borisova, O. P., & Loginov, K. A. (2020). Raschet vlazhnosti grunta pri stroitel'stve dorog v uslovijah nedostatochnogo uvlazhnenija [Calculation of soil moisture in road construction under insufficient moisture conditions]. Transportnaja infrastruktura, (6), 31-38. (In Russ.)
- Беляев, И. М., & Филатов, В. С. (2022). Определение расчетной влажности грунтов для строительства дорог в засушливых регионах. Геотехнический журнал, (2), 45-53. //



Beljaev, I. M., & Filatov, V. S. (2022). Opredelenie raschetnoj vlazhnosti gruntov dlja stroitel'stva dorog v zasushlivykh regionah [Determination of design soil moisture for road construction in arid regions]. *Geotekhnicheskij zhurnal*, (2), 45–53. (In Russ.)

Кравченко, С. Е., & Реут, Ж. В. (2020). О необходимости учета теплофизических свойств при проектировании конструкций дорожных одежд и выборе материалов. *Дорожное строительство и его инженерное обеспечение*, 48–51. Минск: БНТУ. // Kravchenko, S. E., & Reut, Zh. V. (2020). O neobhodimosti ucheta teplofizicheskikh svojstv pri proektirovanii konstrukcij dorozhnyh odezhd i vybore materialov [On the necessity of considering thermophysical properties in pavement design and material selection]. *Dorozhnoe stroitel'stvo i ego inzhenerное obespechenie*, 48–51. Minsk: BNTU. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер Информация об авторах Information about authors



Есболат Әсел Ғайниқызы – PhD академиялық дәрежеге үміткер докторы, Л.Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ., Қазақстан

Есболат Әсел Ғайниқызы – соискатель академической степени доктор рНд, КазАДИ им. Л.Б. Гончарова, г. Алматы, Казахстан.

Yesbolat Assel – PhD candidate, L.B.Goncharov KazADI, Almaty, Kazakhstan

e-mail: ashkeyeva@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2292-6305>



Киялбаев Абди Киялбаевич – техникалық ғылымдар докторы, Л.Б. Гончаров атындағы КазАЖИ профессоры, Алматы қ., Қазақстан

Киялбаев Абди Киялбаевич – доктор технических наук, профессор КазАДИ им. Л.Б. Гончарова, г. Алматы, Казахстан

Kiyalbayev Abdi – Doctor of Technical Sciences, Professor of L.B.Goncharov KazADI, Almaty, Kazakhstan

e-mail: abdi-ki@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3068-3856>



Есентай Даурен Ерланович – доктор phd, Л.Б. Гончаров атындағы КазАЖИ қауымдастырылған профессоры, г. Алматы, Қазақстан

Есентай Даурен Ерланович – доктор phd, ассоциированный профессор КазАДИ им. Л.Б. Гончарова, г. Алматы, Казахстан

Yessentay Dauren – PhD, Associate Professor of L.B. Goncharov KazADI, Almaty, Kazakhstan

e-mail: Rector@kazadi.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8443-1398>



ҚҰРҒАҚ ҚҰРЫЛЫС ҚОСПАЛАРЫНЫҢ ҚҰРАМЫНДА ЖЭС ҰШАТЫН КҮЛІН ҚАЙТА ӨНДЕУ ЖӘНЕ ТИІМДІ ПАЙДАЛАНУ

РЕЦИКЛИНГ И ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОЛЫ-УНОСА ТЭЦ В СОСТАВЕ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

RECYCLING AND EFFICIENT USE OF THERMAL POWER PLANT FLY ASH AS PART OF DRY BUILDING MIXES

Ж.М. Омаров ¹, А.Н. Жаканов ^{2*}, Л.Л. Булыга ¹, Ө.И. Байтұрсынов ³,
А.А. Ахметова ¹

¹Торайғыров университеті, Павлодар, Қазақстан

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан

³М.О. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университетінің колледжі,
Шымкент қ., Қазақстан

*Жауапты автор: А.Н. Жаканов, e-mail: zhakanov888@mail.ru

Түйінді сөздер:

Ұшатын күл, құрғақ
құрылыс қоспалары,
толтырғыш,
суперпластификатор,
байланыстырғыш.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыс тас қалау ерітінділеріне арналған құрғақ құрылыс қоспаларының (ҚҚҚ) құрамдас бөлігі ретінде жылу электр станцияларының (ЖЭС) күлді пайдалану мүмкіндігін зерттейді. Оның ерітінділердің беріктігі мен реологиялық сипаттамаларына әсері, сонымен қатар пайдаланудың экономикалық және экологиялық орындылығы талданады.

Құрғақ құрылыс қоспаларының құрамында жылу электр станцияларының күлін пайдаланудың тиімділігін анықтау, оңтайлы құрамдарды әзірлеу және олардың құрылыс материалдарының технологиялық, механикалық және пайдалану қасиеттеріне әсерін бағалау.

Негізгі материалдар цемент, кварц құмы, жылу электр станцияларының күлі, әк-карбонатты шаң (СКД) және «Полипласт СП-3» суперпластификаторы болды. Эксперименттік зерттеу цемент шығыны, күл-әк бөлігінің көлемдік концентрациясы, су-цемент қатынасы және суперпластификатордың мөлшері сияқты ерітінді құрамының параметрлерін өзгертуді қамтитын математикалық жоспарлауды қолдану арқылы жүзеге асырылды. 28 күндік жаста ерітінділердің қозғалғыштығы (ерітінді конусының таралуы) және беріктігінің көрсеткіштері зерттелді.

Зерттеу көрсеткендей, цемент пен цемент-әк ерітінділерінің құрамына күлді енгізу олардың беріктік сипаттамаларын сақтай отырып немесе жоғарылату кезінде цемент шығынын 30-50 кг/м³ азайтуға көмектеседі. Күлдің оңтайлы мөлшері байланыстырғыштың жалпы мөлшерінің 40-60 % құрайды, бұл жақсы қозғалғыштығын және ерітінділердің минималды бөлінуін қамтамасыз етеді. Күлді және суперпластификаторды біріктіріп құрғақ құрылыс қоспаларының құрамдас бөлігі ретінде жылу электр станцияларының күлін пайдалану цемент пен әктің бір бөлігін тиімді ауыс-



тыруға, ерітінділердің құнын төмендетуге және қоршаған ортаға теріс әсерді азайтуға мүмкіндік береді. Күлді ерітінділердің оңтайлы құрамы құрылыс талаптарына сәйкес келетін жоғары өнімділік сипаттамаларын қамтамасыз етеді.

Ключевые слова:

Зола-унос, сухие
строительные смеси,
наполнитель,
суперпластификатор,
вяжущие вещества.

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследуется возможность использования золы-уноса тепловых электростанций (ТЭС) в качестве компонента сухих строительных смесей (ССС) для кладочных растворов. Анализируются ее влияние на прочностные и реологические характеристики растворов, а также экономическая и экологическая целесообразность применения.

Определение эффективности использования золы-уноса тепловых электростанций в составе сухих строительных смесей, разработка оптимальных рецептур и оценка их влияния на технологические, механические и эксплуатационные свойства строительных материалов.

В качестве основных материалов использованы цемент, кварцевый песок, зола-уноса ТЭС, известково-карбонатная пыль (ИКП) и суперпластификатор «Полипласт СП-3». Экспериментальное исследование проводилось с применением математического планирования, включающего варьирование параметров состава растворов, таких как расход цемента, объемная концентрация зольно-известковой части, водоцементное отношение и содержание суперпластификатора. Изучались показатели подвижности (расплав растворного конуса) и прочности растворов в возрасте 28 суток.

Исследование показало, что введение золы-уноса в состав цементных и цементно-известковых растворов способствует снижению расхода цемента на 30-50 кг/м³ при сохранении или повышении их прочностных характеристик. Оптимальное содержание золы-уноса составляет 40-60 % от общего количества вяжущего, что обеспечивает хорошую подвижность и минимальное расслоение растворов. Совместное применение золы-уноса и суперпластификатора улучшает удобоукладываемость без значительного увеличения водоцементного отношения.

Использование золы-уноса ТЭС в качестве компонента сухих строительных смесей позволяет эффективно заменить часть цемента и извести, снизить себестоимость растворов и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Оптимальные составы растворов с золой-уносом обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики, соответствующие строительным требованиям.

Keywords:

Fly ash, dry building
mixtures, filler,
superplasticizer, mortars.

ABSTRACT

In this paper, the possibility of using fly ash from thermal power plants (TPPs) as a component of dry building mixtures (SCS) for masonry mortars is investigated. Its effect on the strength and rheological characteristics of mortars, as well as the economic and environmental feasibility of the application, are analyzed.

Determination of the efficiency of the use of ash entrainment of thermal power plants in the composition of dry building mixtures, development of optimal formulations and assessment of their impact on the technological, mechanical and operational properties of building materials.



Cement, quartz sand, thermal power plant fly ash, lime-carbonate dust (IKP) and Polyplast SP-3 superplasticizer are used as the main materials. The experimental study was carried out using mathematical planning, including varying the parameters of the composition of mortars, such as cement consumption, volume concentration of ash-lime part, water-cement ratio and superplasticizer content. The indicators of mobility (blurring of the solution cone) and strength of solutions at the age of 28 days were studied.

The study showed that the introduction of fly ash into the composition of cement and cement-lime mortars helps to reduce cement consumption by 30-50 kg/m³ while maintaining or increasing their strength characteristics. The optimal content of fly ash is 40-60% of the total amount of binder, which ensures good mobility and minimal stratification of solutions. The combined use of fly ash and superplasticizer improves workability without significantly increasing the water-cement ratio.

The use of TPP fly ash as a component of dry building mixtures makes it possible to effectively replace part of cement and lime, reduce the cost of mortars and reduce the negative impact on the environment. Optimal compositions of solutions with fly ash provide high performance characteristics that meet construction requirements.

КІРІСПЕ

Табиғи ресурстарды ұтымды пайдалануға ұмтылу және қоршаған ортаға техногенді әсерді азайту жағдайында өнеркәсіптік қалдықтарды құрылыс материалдарын өндіруге тарту ерекше өзектілікке ие. Перспективалы бағыттардың бірі Павлодар облысының жылу электр станцияларында (ЖЭО) өндірілетін ұшатын күлін, атап айтқанда, құрғақ құрылыс қоспалары құрамында Павлодар қаласының ЖЭО-2 пайдалану болып табылады.

Құрғақ құрылыс қоспалары (ҚҚҚ) бүгінде құрылыста олардың жан-жақтылығына, пайдалану жеңілдігіне және сапасының жоғары болуына байланысты маңызды рөл атқарады. Оларды қалау, әшекейлеу, жөндеу және жылу оқшаулау үшін пайдаланады. Жиналмалы қоспалар құрылыс процестерінің тиімділігін едәуір арттырып, еңбек шығындарын азайтады.

ҚҚҚ қазақстандық нарығында дамып келе жатыр, бірақ өсіп келе жатқан сұранысты әлі толық қанағаттандыра алмай отыр. Негізгі тежеуші факторлар жергілікті шикізатты жеткіліксіз пайдалану және арзан өнім сегментіне назар аудару болып табылады. Бұл ретте, негізінен, сапалы және бәсекеге қабілетті қоспалар импортталады.

Бұл мақала ұшатын күлімен көрсетілген қасиеттері бар ҚҚҚ құрамын дамытуға арналған.

Әдеби шолу. Экологиялық таза және энергия тиімді құрылыс материалдарына өсіп келе жатқан қажеттілік жағдайында құрғақ құрылыс қоспаларының құрамында ұшатын күлі сияқты техногендік қалдықтарды пайдалану мүмкіндігіне ерекше назар аударылады. ЖЭО күлін қайталама минералды шикізат ретінде пайдалану портланд цементінің шығынын азайтып қана қоймай, қоспалардың кейбір өнімділік сипаттамаларын едәуір жақсартуға мүмкіндік береді (Ravindrarajah & Tam, 1989; Thomas & Harilal, 2015; Li, Pour-Ghaz, & Castro, 2021).

Ларионов (2021), Ларина және Китаев (2020), Китаев (2019) сияқты авторлар жүргізген соңғы зерттеулер ұшатын күлінің физикалық-химиялық қасиеттерін және оның аязға төзімділігін, қозғалғыштығын, суды ұстап қалу қабілетін қоса алғанда, цемент жүйелерінің қасиеттеріне әсерін зерттеуге арналған. Олар күлдің майда шашыраңқы



құрылымы ылғалдану процестерінің қарқын алуына ықпал етіп, поццоландық белсенділікті арттыратынын атап өтеді (Larionov, 2021; Larina & Kitaev, 2020; Kitaev, 2019; Belousov, 2021).

Атап айтқанда, Маслехуддин, Әл-Мана, және Шәмем (1997), Равиндрараджа және Там (1989), және Томас пен Харилал (2015) жүргізген шетел зерттеулері композиттік құрылыс құрамында ұшатын күлін пайдаланудың орындылығын растайды, әсіресе сапалы цементке қол жетімділігі шектеулі аймақтарда. Авторлар қалау және гипс қоспаларын өндіруде күлдің тиімділігі жоғары екенін көрсетіп, қоспаның оңтайлы мөлшері 30-дан 50%-ға дейін (Maslehuddin et al., 1997; Thomas & Harilal, 2015; Arel, 2022).

Абдуллаевтың (2022) және Садықова мен Корчагинаның (2020) еңбектері минералды қоспалардың беріктігі мен құрғақ қоспалардың суға төзімділігіне әсерін зерттеуге арналған. Ұшатын күлі мен суперпластиканы біріктіріп пайдалану цемент үлесінің азаюына байланысты беріктіктің төмендеуін өтей алатыны анықталды. Осы орайда Рахымов пен Салахов (2023) цементті байланыстырғыштардың құрылымы мен өнімділігін арттырудағы минералды қоспалардың рөлін ерекше атап өтті.

Нормативтік құжаттар, оның ішінде ҚР СТ 1168-2006 (2006) құрғақ құрылыс қоспалары мен олардың компоненттеріне, оның ішінде күлге қойылатын сапаға қойылатын талаптарды реттейді. Осы стандарттар бойынша бос әктің, күкірт оксидтерінің, кремнийдің құрамы, ажарлау дәрежесі сияқты сипаттамалар ерекше маңызды (ST RK 1168-2006, 2006).

Бұдан басқа, зерттеушілер Сиддике (2003), Сингх және Сиддике (2020), және Чиндапрасирт, Рукзон, Сириватнанон (2008) зерттеушілері күл дисперсиясының цемент тас құрылымына әсерін зерттеді. Олар жеткілікті ажарлау майдалығы мен су-цемент арақатынасын дұрыс таңдаған жағдайда беріктік пен агрессивті ортаға төзімділіктің едәуір артуына қол жеткізуге болады деген қорытындыға келді (Siddique, 2003; Singh & Siddique, 2020; Chindaprasirt et al., 2008).

Осылайша, қолданыстағы ішкі және халықаралық практика құрғақ құрылыс қоспаларының тиімді құрамдас бөлігі ретінде шыбын күлінің әлеуетін растайды, бұл өнімнің техникалық және экологиялық көрсеткіштерін жақсартуға ықпал етеді. Алайда құрауыштардың ұтымды арақатынасын таңдау құрылыс жүйелерінің нақты түрлеріне қойылатын талаптарды ескере отырып, құрамды эксперименттік оңтайландыруды талап етеді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Күл қоспасының композиттік байланыстырғыштың қасиеттеріне әсерін зерттеу үшін мынадай материалдар қолданылды:

1. Техникалық материалдар

- М-400 сортты Портланд цементі;
- Беткі қабатының үлестік ауданы – 3300 см²/г;
- тығыздығы – 3100 кг/м³;
- Сығымдағыш күш – 28-ші күні 52,6 МПа;
- флексурлық беріктік – 6,2 МПа;
- Басталу уақытын белгілеу – 2 сағат 15 минут.

2. Техногендік материалдар

- Бұрын майдалап ұнтақталған көмір мен антрацит жағу арқылы алынған Павлодар қаласының ЖЭО-2 ұшатын күлі:

- 25-30 минут ажарлаудан кейінгі беттің нақты ауданы – 500 м²/кг астам;
- СаО мазмұны – 5 %-дан кем;
- Басым компоненттері қышқыл оксидтер (SiO₂ және Al₂O₃).



3. Табиғи материалдар

- Карьер құмы :

- Шын тығыздығы – 2,65 г/см³;

- өлшем модулі — 1,78;

- Саз және тозаң тәрізді бөлшектердің құрамы салмағы бойынша 0,7% құрайды.

- Майқайың әк зауыты ЖШС шығаратын Quicklime :

- СаО мазмұны – 49 %;

- SiO₂ мазмұны - 8,5 %;

- Кеуектілік – 17,1 %;

- Сығымдағыш беріктік – 3,93 МПа

Зерттеу әдіснамасы

1. Компоненттер қажетті ұсақтау майдалығына қол жеткізгенге дейін зертханалық шарлы диірменде ұсақталады.

2. Беттің нақты ауданы тығыздалған ұнтақ қабатының ауа өткізу принципі бойынша жұмыс істейтін ПМК-500 құрылғысының көмегімен бағаланды.

3. Байламды дайындау компоненттерді құрғақ күйде мұқият араластыру арқылы жүзеге асырылды.

4. Поццоландық белсенділікті талдау ұшатын күлінің кальций тотығының гидратымен өзара әрекеттесуі және ерімейтін гидросиликат пен гидроалюминат қосылыстарының түзілуі негізінде жүргізілді.

Зерттеуге зертханалық шарлы диірмендегі қоспаны ажарлау кірді, ал ажарлау дәрежесі тығыздалған қабаттың ауа өткізу принципіне негізделген ПМК-500 құрылғысының көмегімен анықталды. Алынған нәтижелер аморфты компоненттердің кальций оксиді гидратымен химиялық реакцияға түсіп, байланыстырушы заттың беріктік сипаттамаларын жақсартатын ерімейтін қосылыстар түзу қабілетіне байланысты ұшатын күлінің айқын поццоландық белсенділігі бар екенін көрсетті.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Бұл зерттеулер математикалық эксперименттік дизайнды пайдалана отырып жүргізілді. Төменде кварц құмындағы қалау минометтерін (1-кесте), сондай-ақ сілкіну сатысындағы ерітінді конусын балқытудың алынған математикалық модельдерін зерттеу кезінде экспериментті жобалау шарттары, мм (1) және минометтің сығымдалған беріктігі 28 тәулік. R28, МПа (2).

1-кесте. Шешімдерді зерттеу кезінде экспериментті жоспарлау шарттары

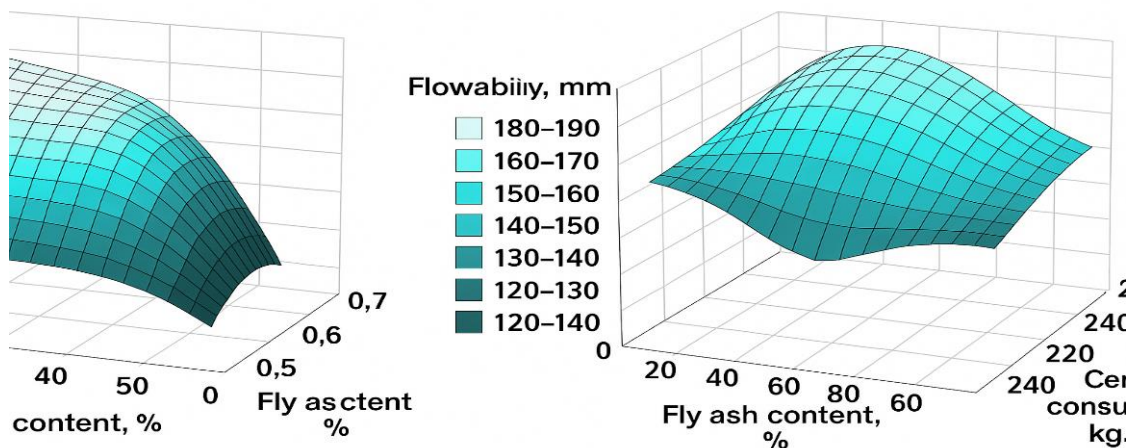
Фактор, түрі		Деңгейлер Вариация			Интервал Вариация
табиғи	кодталған	-1	0	+1	
суперпластикасының мазмұны SP-3, % (C+Z+IKP)	X ₁	0,3	0,5	0,7	0,2
Күл-әк бөлігінің байламдағы көлемдік концентрациясы, %	X ₂	20	40	60	20
Цемент шығыны C, kg/m ³	X ₃	200	270	340	70
қатынасы V/(C+Z+IKP)	X ₄	1,00	0,80	0,60	0,10
Ескерту: авторлар құрастырған					



$$RK = 161,2 + 18,5X_1 + 9,3X_2 - 5,33X_3 + 27,2X_4 - 5,6X_1^2 - 8,05X_2^2 - 7,1X_3^2 + 16,35X_4^2 + 9,6X_1X_2 + 7,7X_1X_3 + 6,1X_1X_4 + 6,4X_2X_4 - 1,1X_3X_4; \quad (1)$$

$$R_{28} = 14,4 + 5,1X_2 + 5,07X_3 - 3,67X_3 + 0,26X_1^2 - 3,54X_2^2 - 3,16X_3^2 - 1,03X_4^2 - 1,51X_1X_2 - 1,57X_1X_3 - 1,24X_1X_4 - 1,19X_2X_4 + 3,1X_3X_4. \quad (2)$$

Цемент-күл қалаушы ерітінділердің қозғалғыштығы мен беріктігіне технологиялық факторлардың әсер ету сипаты 1 және 2-суреттерде келтірілген. Көріп отырғаныңыздай, оның айқын квадратикалық сипаты бар.



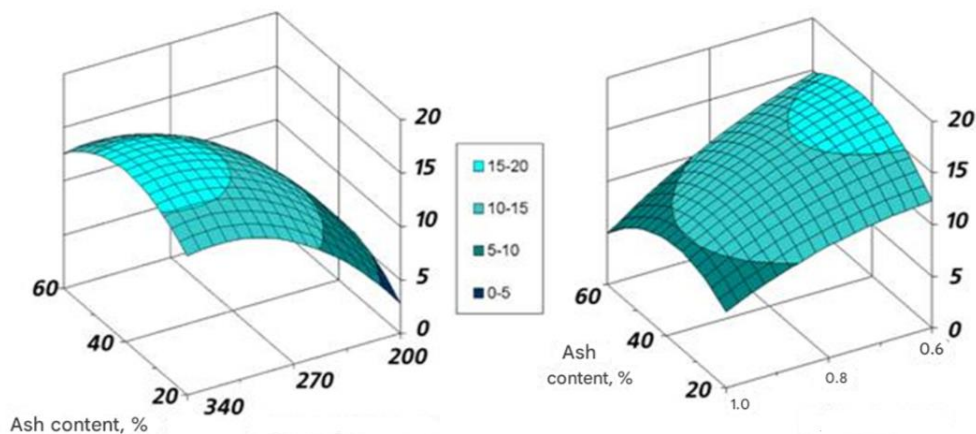
1-сурет. Ерітіндінің қозғалғыштығына технологиялық факторлардың әсері
(конустың таралуы, мм, $H/(C+W) = 0,8$)

Ескерту: авторлар құрастырған

Ұтқырлық теңдеуінде, сіз күткендей, ең елеулі әсер су-байламдардың арақатынасы және аса пластификаторды тұтыну болып табылады. Алайда күл-эк-карбонат компонентінің пластификатталу әсері де сезіледі, ал цемент шығынының барлық диапазонында 60 %-ға жақындаған кезде ерітіндінің қозғалғыштығы аздап өзгереді, сондықтан 50-60 % толтыру дәрежесін ерітіндінің қозғалғыштығына әсер ету тұрғысынан оңтайлы деп санау керек. Сондай-ақ суперпластика мен толтырғыштың жоғары буындық әсерін атап өтуге болады. Цемент шығынының 300 кг/м³-ден жоғары ұлғаюы қозғалғыштықтың айтарлықтай төмендеуіне, басқа да нәрселердің тең болуына әкеледі.

Модельдің өзара әрекеттесуін талдау (1) цемент пен байланыстырғыш мөлшерінің су байланыстыру коэффициентінің ұлғаюымен үйлесімде ұлғаюы кезінде қозғалғыштықтың аздап төмендегенін көрсетеді. Ерітінді қоспаларының қозғалғыштығына суперпластиктер мен толтырғыштар, суперпластиктер мен цемент шығынының бірлескен ұлғаюы оң әсер етеді.

Беріктіктің математикалық моделін талдау (2) вариация аймағында цемент пен байланыстырушы зат шығынының ұлғаюы беріктікке, басқа нәрселердің тең болуына әр түрлі әсер етеді деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді. Ерітінді қоспасындағы цемент пен байланыстырушы заттардың мөлшері артқан сайын «сөніп қалады» деген оң әсер бар. Су-байланыстырушы коэффициенттер жоғары болған кезде, максималды агрегаттық тұтыну және ЖМ орташа тұтыну кезінде цементті максималды тұтыну кезінде беріктіктің төмендеуі де мүмкін.



2-сурет. Технологиялық факторлардың беріктікке әсері, МПа
(СП-3 тұтыну кезінде = 0,5%)

Ескерту: авторлар құрастырған

Бұл азаюды күш пен капиллярлық кеуектіліктің өзара байланысымен түсіндіруге болады. Байланыстырғыштың ең көп құрамы бар қоспалар судың мөлшері жоғары, бұл тұрақты C/V кезінде кеуектіліктің артуына және беріктіктің төмендеуіне әкеледі. Бұдан басқа, цемент пастасының көлемі бойынша беріктігі әдетте «цемент қамыры — құм» түйіспе қабатының беріктігінен төмен болғандықтан, онда белгілі бір сәттен бастап қамыр мөлшерінің артуымен құрылым оптималды болып, беріктігі төмендейді.

Өрлендіргіштің (толтырғыштың) беріктікке әсері бірімәнді емес.. Басқалары тең, оны тұтытуда 40-50 % максималды беріктік байқалады. Күл-эк-карбонат толтырғышын пайдалану тиімділігі цемент шығынының өзгерістерінің барлық диапазонында шамамен бірдей және аса пассивті өлшегіштің шығысына және су байланыстырғыштың арақатынасына біршама тәуелді. Осылайша, толтырғышты енгізген кезде байланыстырушы заттар шығынының 30-50% көлемінде беріктіктің артуы барлық аса пластификаторлық тұтыну кезінде байқалады, бірақ ол оны тұтынудың ұлғаюы кезінде едәуір айқын көрінеді. Суға төзімділік коэффициентінің артуы толтырғыштың оң әсерінің аздап төмендеуіне әкеледі, бірақ ол әлі де айтарлықтай байқалады (30-50 %).

Сөйтіп, ұшатын күлін ҚҚҚ құрамына суперпластикатормен және эк-карбонат шаңымен бірге енгізу олардың реологиялық қасиеттерін жақсартуға көмектеседі, ылғалдануды тездетеді, қоспалардың құрылым түзілуіне ықпал етеді. Күл шығыны 30-50% байланыстырушы күш болған жағдайда цемент-күлді ерітінділердің беріктігінің артуы атап өтіледі. Сондықтан осы құрамдағы қалаушы ерітінділерге арналған ҚҚҚ өндірісі айтарлықтай мақсатқа лайықты.

ҚОРЫТЫНДЫ

Ұсыныс. Павлодар облысының ЖЭО-да пайда болған ұшатын күлін құрғақ құрылыс қоспаларын өндіруде белсенді минералды қоспа ретінде пайдалануды ұсынады. Бұл портланд цементтің тұтынуын азайтуға және өндірістің экологиялық көрсеткіштерін жақсартуға мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп жариялайды.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар тобы бұл мақаланы дайындау барысында генеративті жасанды интеллектіні пайдаланған жоқ.



ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Arel, H. Ş. (2022). The effects of fly ash fineness on mechanical properties and durability of cement mortars. *Materials Research Express*, 9(4), 045506. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac5e18>
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., & Sirivivatnanon, V. (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(5), 932–938.
- Li, W., Pour-Ghaz, M., & Castro, J. (2021). Improved durability of concrete containing supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 271, 121552. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121552>
- Maslehuddin, M., Al-Mana, A. I., & Shameem, M. (1997). Effect of cementitious materials on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(2), 147–155.
- Ravindrarajah, R. S., & Tam, C. T. (1989). Utilization of fly ash in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1(2), 112–121.
- Siddique, R. (2003). Effect of fine aggregate replacement with class F fly ash on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 539–547.
- Singh, M., & Siddique, R. (2020). Strength properties and micro-structural behavior of carbonated concrete containing industrial by-products. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120563. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120563>
- Thomas, J., & Harilal, B. (2015). Strength and durability properties of concrete containing fly ash and silica fume. *Materials Today: Proceedings*, 2, 1339–1345.
- Абдуллаев, Р.А. (2022). Исследование влияния минеральных добавок на водостойкость и адгезию штукатурных растворов. *Архитектура и строительство*, (4), 53–58. // Abdullayev, R.A. (2022). Issledovanie vliyaniya mineral'nykh dobavok na vodostoykost' i adgezuyu shtukaturnykh rastvorov [Study of the effect of mineral additives on water resistance and adhesion of plaster mortars]. *Arkhitectura i stroitel'stvo*, (4), 53–58. (In Russ.)
- Белоусов, А.Н. (2021). Пуццолановые добавки на основе золы-уноса в бетоне. *Известия вузов. Строительство*, (6), 45–49. // Belousov, A.N. (2021). Putstsolanovye dobavki na osnove zoly-unosa v betone [Pozzolanic additives based on fly ash in concrete]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, (6), 45–49. (In Russ.)
- Китаев, А.А. (2019). Композиционные материалы с использованием золы-уноса: технология и свойства. *Современные строительные материалы*, (6), 38–42. // Kitaev, A.A. (2019). Kompozitsionnye materialy s ispol'zovaniem zoly-unosa: tekhnologiya i svoystva [Composite materials using fly ash: technology and properties]. *Sovremennye stroitel'nye materialy*, (6), 38–42. (In Russ.)
- Ларина, Л.А., & Китаев, А.А. (2020). Влияние золы-уноса на свойства сухих строительных смесей. *Вестник строительной науки и техники*, 12(3), 44–49. // Larina, L.A., & Kitaev, A.A. (2020). Vliyanie zoly-unosa na svoystva sukhikh stroitel'nykh smesey [Effect of fly ash on the properties of dry construction mixtures]. *Vestnik stroitel'noy nauki i tekhniki*, 12(3), 44–49. (In Russ.)
- Ларионов, С.И. (2021). Повышение пуццолановой активности золы-уноса ТЭЦ при применении в составе цементных систем. *Строительные материалы*, (5), 22–25. // Larionov, S.I. (2021). Povishenie putstsolanovoy aktivnosti zoly-unosa TEC pri primenenii v sostave tsementnykh sistem [Enhancement of pozzolanic activity of fly ash from CHPPs in cement systems]. *Stroitel'nye materialy*, (5), 22–25. (In Russ.)
- Рахимов, Р.З., & Салахов, А.А. (2023). Структурообразование вяжущих с минеральными техногенными добавками. *Строительные материалы*, (2), 34–37. // Rakhimov, R.Z., & Salakhov, A.A. (2023). Strukturnoobrazovanie vyazhushchikh s mineral'nymi tekhnogennymi dobavkami [Structure formation in binders with mineral technogenic additives]. *Stroitel'nye materialy*, (2), 34–37. (In Russ.)



- Садыкова, Н.Ш., & Корчагина, Е.А. (2020). Использование золы-уноса в сухих строительных смесях. Вестник КазНИИСА, (2), 67–70. // Sadykova, N.Sh., & Korchagina, E.A. (2020). Ispol'zovanie zoly-unosa v sukhikh stroitel'nykh smesjakh [Use of fly ash in dry construction mixtures]. Vestnik KazNIISA, (2), 67–70. (In Russ.)
- СТ РК 1168-2006 (2006). Смеси сухие строительные. Общие технические условия. Астана: Комитет технического регулирования и метрологии. // ST RK 1168-2006. (2006). Smessi sukhie stroitel'nye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Dry construction mixtures. General technical requirements]. Astana: Komitet tekhnicheskogo regulirovaniya i metrologii. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Омаров Жумабек Мухтарович – техника ғылымдарының кандидаты, Торайғыров университеті, Павлодар, Қазақстан
Омаров Жумабек Мухтарович – кандидат технических наук, Торайғыров университет, г. Павлодар, Казахстан
Omarov Zhumabek Mukhtarovich – Candidate of Technical Sciences, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan,
e-mail: zhumabek-omarov@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-9509>



Жаканов Алибек Нуржанович – PhD студенті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан
Жаканов Алибек Нуржанович – PhD студент, Евразийский Национальный Университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Zhakanov Alibek Nurzhanovich – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
e-mail: zhakanov888@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8747-3788>



Булыга Леонид Леонидович – техника ғылымдарының кандидаты, Торайғыров университеті, Павлодар, Қазақстан
Булыга Леонид Леонидович – кандидат технических наук, Торайғыров университет, г. Павлодар, Казахстан
Bulyga Leonid Leonidovich – Candidate of Technical Sciences, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan
e-mail: Bulyga-Leonid@rambler.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8351-3087>



Байтұрсынов Өміртай Имантаевич – техника ғылымдарының магистрі, М.О. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университетінің колледжі, Шымкент қ., Қазақстан

Байтұрсынов Умиртай Имантаевич – магистр технических наук, Колледж при Южно-Казахстанском государственном университете имени М. О. Ауэзова, Чимкент, Казахстан

Baitursynov Umirtai Imantaevich – Master of Technical Sciences, Lecturer, College at the South Kazakhstan State University M. O. Auezov, Shymkent, Kazakhstan

e-mail: omir1957@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6553-7232>



Ахметова Айлин Армановна – техника ғылымдарының магистрі, Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан

Ахметова Айлин Армановна – магистр технических наук, Торайғыров университет, г. Павлодар, Казахстан

Ailin Akhmetova Armanovna – Master of Technical Sciences, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan,

e-mail: ailin.a.95@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3070-090X>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_323
IRSTI 67.07.03

ARCHITECTURAL CHALLENGES IN THE DESIGN OF GENERAL EDUCATION SCHOOLS: THE CASE OF THE "BINOM" SCHOOL IN ASTANA

ЖАЛПЫ БІЛІМ БЕРУ МЕКТЕПТЕРІН ЖОБАЛАУДЫҢ СӘУЛЕТТІК МӘСЕЛЕЛЕРІ: АСТАНА ҚАЛАСЫНДАҒЫ «BINOM» МЕКТЕБІНІҢ МЫСАЛЫНДА

АРХИТЕКТУРНЫЕ ВЫЗОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ШКОЛ: КЕЙС ШКОЛЫ «BINOM» В ГОРОДЕ АСТАНА

A. Ozhet ^{1,2 *}, T.T. Musabaev ^{1,3} S.E. Mamedov ³

¹RSE «Gosgradkadastr», Astana, Kazakhstan

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

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

*Corresponding author: Ozhet Arshyn, e-mail: Arshyn.novyj@gmail.com

Keywords:

Architecture, school architecture, preliminary design, classrooms, comfortable environment. Architectural and planning solutions, secondary school, urbanization, functional zoning,

ABSTRACT

The article is devoted to the study of modern trends in the architecture of buildings for new standard secondary schools in Astana, identifying the features of the development of functional planning schemes. During the analysis, using the example of the BINOM school (Astana, A. Baitursunova St. 49A), planning solutions were identified, as well as their shortcomings that affect the degree of comfort in these structures and the quality of education that meets the requirements for conducting various forms of classes, which made it possible to consider the possibility of their adaptation and feasibility in practice. The main positive and negative characteristics were identified, which made it possible to analyze the directions of development of modern school education in Astana, which make it possible to give recommendations for updating the composition of premises and the nature of the formation of the planning structure. To systematize the problems, categories were formed: Architectural and planning safety problems, sanitary and hygienic (environmental) problems, problems of forming psychological comfort, Urban planning safety problems, Scientific and technical problems, etc. The discovered problems have a significant impact on the level of comfort and, accordingly, on quality of education provided. They are due to shortcomings in building codes and standards, which must take into account modern requirements and trends in the formation of educational institutions.

Түйінді сөздер:

Сәулет, мектеп сәулеті, алдын ала жобалау, оқу кабинеттері, жайлы орта.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақала функционалдық жоспарлау схемаларын әзірлеу ерекшеліктерін анықтай отырып, Астана қаласының жаңа типтік орта мектептеріне арналған ғимараттардың сәулетіндегі заманауи тенденция-



Сәулет-жоспарлау
шешімдері, орта мектеп,
урбанизация,
функционалдық
аймақтарға бөлу.

ларды зерттеуге арналған. Талдау барысында BINOM мектебінің (Астана қ., А.Байтұрсынова к-сі, 49А) мысалын пайдалана отырып, жоспарлау шешімдері, сондай-ақ осы құрылымдардағы жайлылық дәрежесіне және сабақтың әртүрлі формаларын өткізуге қойылатын талаптарға сәйкес келетін білім сапасына әсер ететін олардың кемшіліктері анықталды, бұл оларды тәжірибеде бейімдеу мүмкіндігі мен орындылығын қарастыруға мүмкіндік берді. Негізгі оң және теріс сипаттамалар анықталды, бұл Астана қаласының қазіргі заманғы мектеп білімін дамыту бағыттарын талдауға мүмкіндік берді, ұй-жайлардың құрамын және жоспарлау құрылымын қалыптастыру сипатын жаңарту бойынша ұсыныстар беруге мүмкіндік береді. Мәселелерді жүйелеу үшін санаттар қалыптастырылды: Сәулет-жоспарлау қауіпсіздік мәселелері, санитарлық-гигиеналық (экологиялық) мәселелер, психологиялық жайлылықты қалыптастыру мәселелері, Қала құрылысының қауіпсіздігі мәселелері, Ғылыми-техникалық мәселелер және т.б. Табылған мәселелер жайлылық деңгейіне және сәйкесінше, ұсынылатын білім сапасына айтарлықтай әсер етеді. Олар білім беру ұйымдарын қалыптастырудағы заманауи талаптар мен тенденцияларды ескеруі тиіс құрылыс нормалары мен стандарттарындағы кемшіліктері айқындалды.

Ключевые слова:

Архитектура,
архитектура школы,
эскизный проект,
учебные классы,
комфортная среда.
Архитектурно-
планировочные решения,
средняя школа,
урбанизация,
функциональное
зонирование.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию современных тенденций в архитектуре зданий общеобразовательных школ нового типа в г. Астана, выявлению особенностей разработки функционально-планировочных схем. В ходе анализа на примере школы «БИНОМ» (г. Астана, ул. А. Байтурсунова, 49А) были выявлены планировочные решения, а также их недостатки, влияющие на степень комфортности в данных сооружениях и качество образования, соответствующее требованиям проведения различных форм занятий, что позволило рассмотреть возможность их адаптации и реализуемости на практике. Выявлены основные положительные и отрицательные характеристики, что позволило проанализировать направления развития современного школьного образования в г. Астана, позволяющие дать рекомендации по обновлению состава помещений и характера формирования планировочной структуры. Для систематизации проблем были сформированы категории: Архитектурно-планировочные проблемы безопасности, Санитарно-гигиенические (экологические) проблемы, Проблемы формирования психологического комфорта, Градостроительные проблемы безопасности, Научно-технические проблемы и др. Выявленные проблемы оказывают существенное влияние на уровень комфорта и, соответственно, на качество предоставляемого образования. Они обусловлены недостатками строительных норм и стандартов, которые должны учитывать современные требования и тенденции формирования образовательных учреждений.

INTRODUCTION

Throughout his life, a person goes through a long and thorny path, forming skills, habits and accumulating knowledge. Since ancient times, the human need for education contributed to the formation of educational institutions, but it should be noted that people received knowledge and information even before the formation of educational institutions, through individual learning. Education is crucial for human development, facilitates a healthy mindset and develops cognitive abilities (Sharma, D., 2020)



In modern society, the issue of education is becoming increasingly relevant. Education through the development of individuals also affects society as a whole and is a direct driver of its economic, social, political (and all other) growth and development (Tijanić Š, K., 2021). Secondary education is of particular importance as a compulsory and basic stage of education for all citizens. Social changes in recent years in Kazakhstan, particularly in Astana, create an urgent need for additional school education services, as evidenced by the wide range of offers from commercial organizations, such as development schools, gymnasiums, clubs and various studios, sports sections for schoolchildren, etc. The growth in the number of pedagogical methods and programs, the intensive introduction of non-traditional forms of conducting classes, the expansion of the range of developmental activities and games at school contribute to the need to conduct research to study the specific features of the formation of the structural organization of the modern architectural environment for secondary school education.

In the article: Chen, W.-T.; Liem, FN; Kao, C.-H.; Mubasher, M.; Lin, K.-H. Improving the satisfaction results of school renovation projects using fuzzy function deployment suggests designing schools using a QFD system.

QFD is a series of activities related to product development, process planning and manufacturing, focused on customer needs. QFD has been used to understand user needs, thereby reducing product requirement uncertainty among designers and engineers. The quality function is then used to translate user requirements into improved technologies (Sharma, D., 2020).

In the above article, the authors propose to use the fuzzy function deployment method in order to optimize the school design process using the QFD system, without paying special attention to the internal organization of premises and territory. It is important to note that the QFD system may be advisory in nature, and not all architects may be familiar with it in practice. In this context, this article proposes to look at specific schools and suggest improvements in accordance with local building codes and standards. This approach encourages more accurate and tailored school design to meet the needs of new educational institutions. Having considered updates to the composition of the premises and their relationship with each other and the territory of the site.

MATERIALS AND METHODS

– method of document analysis. At the initial stage of this research, literary and scientific material from design and regulatory documents was collected, then an analysis of the collected material was carried out. (“General educational organizations” BC RK 3.02-11-2011 *, preliminary design of a school at the intersection of St. A. Baitursynuly and A80 streets).

– the field survey method consisted of studying a number of new school buildings in the city of Astana.

– graphic comparison method

– method of generalizing the results. Due to the scale of this study, at the final stage, a generalization and clarification of the results obtained is carried out.

RESULTS AND DISCUSSION

The purpose of the study is to form the prerequisites for updating the composition of premises and their relationship with each other and the territory of the site, determining the updated composition of premises necessary for carrying out the modern educational process, establishing their logical functional connections between individual premises or their groups and identifying shortcomings.

School buildings and facilities constitute essential educational infrastructure and have a formative impact on the safety, development, and socialization of students (Katic, D.; Krstic, H., 2021).



The formation of the educational process is directly reflected in the architecture of educational institutions. Modern types of school education involve differentiation of approaches to teaching methods, and therefore complicate the very function of interaction between the pedagogical and methodological-psychological team and students.

In addition to contributing to accidents and physical security concerns (Liu, S.S., 2021) failure to maintain school buildings properly and effectively can also negatively impact student health and safety (Norazman, N.2019)

Despite the fact that Astana is a metropolis and the capital of the republic, the lowest number of urban schools was recorded in this city – 147 units. According to the Bureau of National Statistics, the number of students in the capital in 2022 is 212.3 thousand people, divide it by the norm 1100 students for one school and we get 193 - this is how many schools there should be in a metropolis. And we have 147 of them, it turns out that the shortage of schools in Astana is 46 units. And this is only official data.

A recent academic paper on school architecture by Prakash Neiar, Rendall Fielding, S. William Brubaker, Vark Dudek and others provides an extensive analysis of contemporary approaches to the design and construction of educational institutions. The article highlights key aspects of school architectural design, including the use of space, instructional technology and the provision of a learning environment.

It is important to note that this study, despite its significance, does not exhaust all aspects and problems in the area under consideration. Our article aims to fill some gaps and overlooked aspects in previous research, enriching the general understanding of this topic."

The authors focus on the importance of creating an environment conducive to children's learning and development. They discuss design principles that maximize the effectiveness of the learning experience, and also incorporate current trends such as the use of technology in education and addressing the needs of diverse learners.

They also consider aspects of sustainable architecture and environmental sustainability in the construction and operation of school buildings. The authors emphasize the importance of a balanced approach to architecture that takes into account the needs of students, teachers and the environment. They will also illustrate the concept of Smart Healthy Schools (SHS) and, in particular, SHSS equipped with wireless Internet of Things Sensors (IoTSHS) and display units for optimal monitoring of indoor air quality through manual ventilation and/or mechanical ventilation cycles.

Modern technologies, intellectual communication systems and new teaching methods require new forms and spaces for learning. They are also forcing architects and designers to develop unique solutions for school architecture. The visual aspect is of great importance, as architecture can be an additional tool for motivating and inspiring students. The psychological perception of children allows non-standard forms, solutions and interiors to become additional incentives for cognitive activity.

A modern school must meet the criteria of a space that will provide comfort and safety for students. The school building and the surrounding area must meet safety and sanitary requirements. It should be noted that it is the comfortable stay of students that increases the productivity of the educational process. This issue concerns not only classrooms, but also corridors, recreation areas, playgrounds, lobbies, library-coworking spaces - i.e., the comfortable, convenient formation of a system of spaces and social and functional zoning in general is considered.

BINOM school is one of the specific projects in the field of education, implemented through a public-private partnership mechanism between the innovative construction holding BI Group and the city administration of Astana.

Each BINOM school is a 5-story building, which has 127 classrooms, 9 expanded laboratories in physics, chemistry, biology, nanotechnologies and biotechnologies. There is also



a cinema hall with 100 seats, co-working areas for teachers and children, a television studio, game rooms, smart classes, a 3D printer for creative experiments, robotics classrooms, metal and wood carving workshops, Speaking Club, Tedx B, etc. Open a canteen, a medical center and a library, which contains 5,000 popular publications of Kazakh and foreign writers, leading classics of the world. In addition to desktop computers, the school also provides laptops for the learning process.

One of the advantages of schools is the possibility of inclusive education. BINOM SCHOOL has created a comfortable learning environment for children with special educational needs. Two gyms and several outdoor playgrounds will allow children to play football, volleyball, basketball and other sports; there is also a work-out area. In addition to the positive aspects, it is necessary to identify the problems. The final result of the construction project is then turned over to the user, and ends with the operation and maintenance phases (Chen, W.T., 2013).

A general overview of school building facilities included a study of the problems of forming an architectural environment for school education. As a result of studying the objects of the BINOM school, the following characteristic points and problems of forming the architecture of buildings for secondary school education were identified:

Categories were formed to systematize problems

Architectural and planning safety problems:

- doors from classrooms open into a common corridor, thus reducing its width and creating a traumatic situation;
- fire escapes are located near the outer wall and lead outside, however (four of the six ladders) lead children into a “well” that has formed in the structure of the building and has only one exit. If this tunnel is closed by a fire truck or there is a fire in it, then it will be impossible to get out; (Fig. 1).

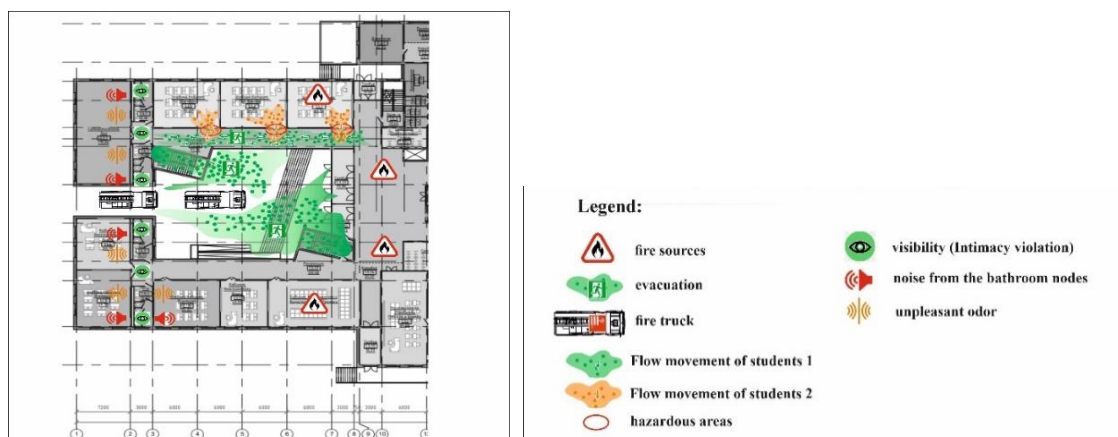


Figure 1. Fragment of the agreed preliminary design of the BINOM school
(Astana, A. Baitursunova St. 49A)

Note – diagram created by the author (Ozhet, 2024)

Problems of forming psychological comfort:

- exit from the san. nodes and changing rooms are directly connected to the common corridor, which causes inconvenience when using these premises if the door opens;
- the offices have an adjacent wall with the bathroom. nodes. In this regard, the following problems may arise:

1. If sanitary facilities are poorly ventilated or have drainage problems, odors can permeate classrooms, which can be unpleasant and distracting for students and teachers.



2. Sanitary facilities can be a source of noise, especially if they have plumbing fixtures such as flush toilets or shower stalls. This can interfere with students' concentration and make class difficult.

3. Privacy Issues: If washroom walls are poorly soundproofed or have insufficient partitions, this can create privacy issues for students and school staff.

4. Hygiene: If sanitary facilities are poorly maintained and kept clean, it can lead to the spread of bacteria and infections into adjacent rooms.

5. Safety: If sanitary facilities have problems with water supply or electricity, this can create potential dangers for students and school staff.

Architectural and planning problems:

- in the gymnasiums, located according to the project on the first floors, there are no dressing areas or toilets. Nodes; The lack of changing rooms and sanitary facilities in the gym can lead to inconvenience, poor hygiene and limited training opportunities. (FIG 1);

- on the fourth floor, according to the project, there are premises (school television studio and music room, choreography studio and school film and photo laboratory) that do not have natural light; Lack of natural light can have a negative impact on the health and well-being of students. They may experience fatigue, headaches and lethargy due to lack of light. This can lead to decreased productivity and concentration during classes. It is important to gain insight into how children feel about the quality of their physical environment (Russo, A., 2023).

- also on the third and fourth floors there is a co-working area, which is a walk-through and in its structure there are entrances to other educational premises;

- scattered classrooms, physics classrooms, etc. scattered throughout the floor;

- virtual absence of recreation areas.

Sanitary and hygienic (environmental) problems:

- there are no green protective zones on the territory; Therefore, problems such as street noise insulation and an increase in thermal effect may arise. Green areas act as natural coolers, absorbing solar radiation and reducing the heat gain (Eaton D., 1998). The lack of green areas can lead to elevated temperatures on school grounds and create uncomfortable conditions for students and staff.

- natural ventilation is provided by small windows, which are not easy to access due to the height of the floor;

- the project does not fully consider the insolation of the premises; some of the classrooms face north;

- insufficient consideration of the orientation of specialized premises (chemistry, physics, computer science classrooms); it is advisable to orient these zones to the east to reduce overheating in these premises. And for better natural ventilation (Design for learning forum. 2006), they need to be designed with double orientation.

The importance of daylight and indoor air quality are now givens for increasing student achievement. Participants agreed that other environmental factors, including lighting, sound, heating, and nontoxic materials, deserve greater attention (Dudek M., 2012).

Urban planning safety issues:

- in the urban planning plan there are vertical differences (to the entrance group, to the sports zone, at the entrance to the school territory), which leads to the formation of a staircase. These architectural elements in the climatic conditions of Astana pose a danger due to the abundance of precipitation, and we should also not forget that they are used by children of different ages (FIG 2); also take away useful area of the territory

- on the site there are steep slopes of the sites, which are hazardous. As a result, the school administration puts up a “second fence” and this territory is difficult to exploit.



In general, the irrational use of school grounds, additional fences and steep slopes on the territory, can create problems with accessibility, safety and the irrational and functional purpose of the space.

Urban planning problems and inconsistency of the project:

- the preliminary design does not correspond to the actual state of the building (there is no running track, training and experimental area, parade ground, greenhouse);
- placement of the transformer substation and solid waste site at the main entrance; A solid waste site can emit unpleasant odors and attract rodents and insects. (Mamedov S., 2021) This can become a source of pollution and a threat to human health, especially if it is located close to the main entrance.
- the entrance to the building is located far from the entrance to the site;
- a small number of entrances to the territory, not full coverage of the residential area;
- storm water from the school grounds flows onto the sidewalk;
- shade canopies are not provided in open spaces; (few of them);
- incomplete coordination with the road transport network (there is a part of the road into the fence);
- not enough parking spaces;
- there are no places to load the school catering unit (the car drives along the sidewalk);
- failure to consider the main pedestrian routes on the school grounds, resulting in the appearance of makeshift paths. (Fig. 2).

School grounds can provide a wealth of interest and resources for both personal and social education. Such direct experience in observation, investigation and participation in design and development of grounds helps pupils to be informed, responsible and enterprising (BC RK 3.02-111-2012).



Figure 2. Comparative analysis of the agreed preliminary design BINOM schools
(Astana st. A. Baitursunova 49A)

Note – diagram created by the author (Ozhet, 2024)



The school territory as a third teacher is a rich and diverse continuation of the educational space. Classes, events and sports competitions can be held here. In greenhouses, special gardens and vegetable gardens, plants can be grown for scientific and educational purposes. Nature inside and outside is important, since the landscaping of the school grounds has both a sanitary and educational function. (BC RK 01-03-2013).

Scientific and technical problems:

- there is no provision for an air conditioning system or fresh air supply in classrooms (except for specialized ones);
- there are no places for air conditioning.

Buildings with poor ventilation, inadequate lightning and acoustic conditions, and unfavorable heating or cooling systems have direct consequences on welfare factors and impact the larger environment.

Socio-economic problems:

- the formation of open “wells” in which large porches are located is not entirely justified socio-economically, it is difficult to remove sediment in this space, the degree of comfort of its use is low;

Common problems:

- absence (or very weak) connection of the elements of the master plan with the architectural and planning structure of the school building.

The difference between the educational environment and a typical educational institution is that in the first case, virtually every fragment of space has educational potential.

CONCLUSION

A growing body of research shows that the quality of the physical environment affects users' stress levels, physical and mental health, and self-esteem. An assessment of the attendance of school buildings shows that problems related to environmental comfort are common, indicating the need to reconsider the necessary parameters. For school architecture to embrace its important role in new educational goals, the design process must change to enable practitioners to meet current requirements within local constraints.

By recognizing and actively working to address these modern challenges in new school buildings, we can ensure that these spaces truly support high-quality education and provide students with an environment that promotes their academic growth, overall well-being, and prepares them for academic success. 21st century.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: This research received no external funding.

ACKNOWLEDGEMENTS: Not applicable.

STATEMENT ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: The authors declare that no generative AI or AI-assisted tools were used in the preparation of this manuscript.

REFERENCES

- Sharma, D. (2020). The Importance of School Education in Child Development. Available at: <https://www.educationworld.in/the-importance-of-school-education-in-child-development/> (Accessed January 20, 2022).
- Tijanić Štok, K. (2021). Development of the Model for Efficient Maintenance Management of Public Educational Buildings. PhD Thesis. Osijek: University of Josip Juraj Strossmayer in Osijek
- Katic, D.; Krstic, H.; Marenjak, S. (2021) Energy efficiency of school buildings by construction period in the Federation of Bosnia and Herzegovina. Buildings, 11, 42.



- Liu, S.S.; Arifin, M.F.A. Preventive maintenance model for national school buildings in Indonesia using a constraint programming approach. *Sustainability* 2021, 13, 1874.
- Norazman, N.; Che-Ani, A.I.; Ja'afar, N.H.; Khoiry, M.A. Standard compliance and suitability of classroom capacity in secondary school buildings. *J. Facil. Manag.* 2019, 17, 238-248.
- Chen, W.T. Design Satisfaction Measurement. *Int. J. Inf. Technol. Proj. Manag.* 2013, 4, 75-91.
- Shi, Y. Investigate children's outdoor playgrounds in public spaces in high-density cities in China: Wuhan as a case study. *Procedia English* 2017, 198, 654-682.
- Chen, W.-T.; Liem, FN; Kao, C.-H.; Mubasher, M.; Lin, K.-H. Improving satisfaction outcomes of school renovation projects using fuzzy quality function deployment (FQFD). *Buildings* 2023, 13, 1239.
<https://doi.org/10.3390/buildings13051239>
- Russo, A.; Andreucci, M.B. Raising healthy children: Promoting the multiple benefits of green open spaces through biophilic design. *Sustainable Development* 2023, 15, 1982.
<https://doi.org/10.3390/su15031982>.
- D. Eaton, *Cognitive and affective learning in outdoor education*. 1998, Toronto: University of Toronto.
- Design for learning forum. *School Design and Student Learning in the 21st Century*. American Architectural Foundation, Washington, D.C 9 -66 2006
- Dudek M. (2012) *Dudek M. Architecture of schools: The new learning environments*. – Routledge, 2012. – 64 p.
- СП РК 3.02-111-2012 Общеобразовательные организации 37 с. // SP RK 3.02-111-2012 General educational organizations 37 p.
- Мамедов С.Э. (2021). Роль урбанистики в архитектурном проектировании, <https://doi.org/10.1109/>. 334-338 ст. // Mamedov S.E. (2021)- The Role of Urbanism in Architectural Design, 334-338 p.
- СН РК 3.02-11-2011 Общеобразовательные организации 29 р. // SN RK 3.02-11-2011 General educational organizations 29 p.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Өжет Аршын – хат хабар авторы, (D-122) «Сәулет» мамандығы бойынша PhD докторанты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан

Өжет Аршын – автор для корреспонденции, докторант PhD по специальности D-122 «Архитектура», Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан

Ozhet Arshyn – author for correspondence, PhD student in the specialty – (D-122) «Architecture». S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan

e-mail: Arshyn.novyj@bk.ru*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2349-5655>



Мусабаев Тұрлыбек Түркпенұлы – Техника ғылыми докторы, профессор, ҚР ҰИА академигі, Астана, Қазақстан

Мусабаев Турлыбек Туркпенович – Доктор технических наук, профессор, академик НИА РК, Астана, Казахстан

Musabaev Turlybek Turkpenovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NIA RK, Astana, Kazakhstan

e-mail: eti.enu@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7630-6466>



Мамедов Сеймур Этибар оғулы – PhD докторы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Сәулет» кафедрасының практик-доценті, Астана, Қазақстан

Мамедов Сеймур Этибар оғулы – доктор PhD, практик-доцент кафедрасы «Архитектура» Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Mamedov Seimur Etibaroguly – Doctor PhD, practice-associate professor of the Department of «Architecture» L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, Kazakhstan,

e-mail: sp_proekt_stroy@bk.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2850-8100>



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_333
MPHTI 69.07

МОДИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ГАЗОЗОЛОБЕТОНА, ПРИГОДНЫХ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В СЕЙСМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ РАЙОНАХ

СЕЙСМИКАЛЫҚ ҚАУІПТІ АУДАНДАРДА ҚҰРЫЛЫСҚА ЖАРАМДЫ ГАЗКҮЛБЕТОННАН БҰЙЫМДАР ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН КОНВЕЙЕР ҮЛГІСІНДЕГІ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ЖЕЛІНІ ТҮРЛЕНДІРУ

MODIFICATION OF A CONVEYOR-TYPE TECHNOLOGICAL LINE FOR THE PRODUCTION OF AERATED CONCRETE PRODUCTS SUITABLE FOR CONSTRUCTION IN SEISMICALLY HAZARDOUS AREAS

О.В. Руденко ¹, Д.К. Аноп ^{1*}, С.П. Скориков ², А.В. Крючков ²,
С.С. Лутай ¹, М.М. Бегентаев ³

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

²ТОО «Технострой», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

³Казахский национальный технический университет им. К. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

*Автор-корреспондент: Аноп Дарья Камильевна, e-mail: danop@edu.ektu.kz

Ключевые слова:

ячеистый бетон,
газозолобетон,
модификации
технологии производства,
золошлаковые отходы,
устойчивое развитие.

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследований по модификации технологической линии конвейерного типа для производства изделий из газозолобетона, пригодных для строительства в сейсмически опасных районах. С использованием статистических методов проведен анализ и выявлены основные факторы, влияющие на качество газозолобетонных блоков. Проведен анализ производства неавтоклавных газозолобетонных блоков по конвейерному типу производства на одном из промышленных предприятий Восточно-Казахстанской области. Выявлены основные причины, сдерживающие производство газозолобетонных блоков для сейсмостойкого строительства. Предложена модернизация технологической линии производства газозолобетонных блоков неавтоклавно твердения, пригодных для строительства в сейсмически опасных районах. Разработанная модификация технологической линии газозолобетонных блоков позволит получать продукцию с улучшенными эксплуатационными характеристиками и может быть использована в практике устойчивого строительства.

Түйінді сөздер:

ұялы бетон,
газ-күлбетон,
түрлендіру
өндіріс технологиясы
күл-кож қалдықтары,
орнықты даму.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада сейсмикалық қауіпті аудандарда құрылысқа жарамды газ-золобетон бұйымдарын өндіруге арналған конвейерлік типтегі технологиялық желіні модификациялау бойынша зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Статистикалық әдістерді қолдана отырып, талдау жүргізіліп, газ-золобетон блоктарының сапасына әсер ететін негізгі факторлар анықталды. Шығыс Қазақстан облысының өнеркә-



сіптік кәсіпорындарының бірінде өндірістің конвейерлік түрі бойынша автоклавсыз газ-золобетон блоктарының өндірісіне талдау жүргізілді. Жер сілкінісіне төзімді құрылыс үшін газ-золобетон блоктарын өндіруді тежейтін негізгі себептер анықталды. Сейсмикалық қауіпті аудандарда құрылысқа жарамды автоклавсыз қатайтылған газ-золобетон блоктарын өндірудің технологиялық желісін жаңғырту ұсынылды. Газ-золобетон блоктарының технологиялық желісінің әзірленген модификациясы өнімділігі жақсартылған өнімді алуға мүмкіндік береді және оны тұрақты құрылыс тәжірибесінде қолдануға болады.

Keywords:

Key words: aerated concrete, gas-ash concrete, modifications to production technology, ash and slag waste, sustainable development.

ABSTRACT

The article presents the results of research on the modification of a conveyor-type production line for the manufacture of aerated fly ash concrete products suitable for construction in seismically hazardous areas. Using statistical methods, an analysis was carried out and the main factors affecting the quality of aerated fly ash concrete blocks were identified. Analysis of manufacturing non-autoclaved aerated fly ash concrete blocks using a conveyor-type production line at one of the industrial enterprises in the East-Kazakhstan region was carried out. The main reasons hindering the production of aerated fly ash concrete blocks for earthquake-resistant construction were identified. Modernisation of the production line for non-autoclaved aerated fly ash concrete blocks suitable for construction in seismically hazardous areas was proposed. The developed modification of the aerated fly ash concrete block production line will allow for the manufacture of products with improved performance characteristics and can be used in sustainable construction practices.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка устойчивых строительных материалов для применения в сейсмоопасных районах не теряет своей актуальности. Так как сейсмическая нагрузка напрямую зависит от массы здания, в том числе от веса ограждающих конструкций, применение ячеистых блоков решает основную из задач сейсмостойкого строительства. Большую актуальность для сейсмостойкого строительства имеет применение газобетонных блоков (Rudenko O.V., et al., 2023). При этом необходимо получение ячеистых блоков с улучшенными характеристиками, отвечающих требованиям сейсмостойкого строительства.

Имеется множество исследований, посвященных улучшению характеристик газобетонных блоков. Имеются исследования по повышению прочности, снижению плотности ячеистого бетона за счет модифицирования ячеистого бетона различными добавками и дисперсного армирования его различными экологически чистыми и экономичными видами растительных волокон (Beskopylny A.N., et al., 2023). Также имеются исследования, посвященные уменьшению усадки бетонов (Statkauskas M., et al., 2022; Goncharova N.I., 2023). При этом, в качестве добавок зачастую используют отходы производства, что позволяет улучшить характеристики изготавливаемых материалов и производить в итоге устойчивые строительные материалы (Kozhageldi N., et al., 2021; Ma Sh., et al., 2023). Имеется исследование, посвященное сравнительному анализу характеристик неавтоклавного газобетона с другими строительными материалами, в том числе автоклавным газобетоном, где отмечается положительное влияние газобетонных блоков на энергосбережение жилых домов (Shon C.-S. et al., 2021).

Кроме статей по подбору рецептуры и соотношения компонентов, отдельно встречаются статьи, посвященные модернизации технологии производства изделий из ячеистых бетонов. В целом отмечается необходимость модернизации технологических



линий (UBlok Group, 2023). В работе (Chen C., et al., 2023) для производства высококачественных панелей из газобетона рекомендовано новое решение вертикальной резки, разделения и автоклавной обработки. Так как факторов, влияющих на качество блоков из ячеистого бетона очень много, вопрос улучшения их характеристик требует более глубокой проработки.

Целью настоящего исследования было модифицировать технологическую линию конвейерного типа для производства изделий из газозолобетона, пригодных для строительства в сейсмически опасных районах, а также позволяющей снизить экологическую нагрузку. В качестве объекта исследований выступало предприятие Восточно-Казахстанской области, занимающееся выпуском блоков из ячеистого бетона, а именно неавтоклавных газозолобетонных блоков по ГОСТ 21520.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Провести теоретический обзор по выявлению факторов, влияющих на качество газозолобетонных блоков;
2. Провести анализ действующей технологической линии конвейерного типа для производства изделий из газозолобетона;
3. Предложить технические решения по модернизации действующей технологической линии конвейерного типа с целью получения изделий из газозолобетона, пригодных для строительства в сейсмически опасных районах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Блоки из ячеистых бетонов производятся по ГОСТ 21520, согласно которому плотность ячеистого бетона может быть от D500 до D1200, прочность – от B1,5 до B12,5. Размеры блоков предполагаются длиной от 288 до 598 мм, высотой – от 88 до 298 мм, толщиной – от 195 до 300 мм. При этом предъявляются жесткие требования к допускам по геометрическим размерам и форме блоков. При кладке блоков на клей отклонение по высоте и искривление граней ребер допускается ± 1 мм; по длине, ширине и от прямоугольной формы – ± 2 мм; повреждения углов и ребер – глубиной не более 5 мм.

В качестве цементного вяжущего для производства неавтоклавного ячеистого бетона применяется портландцемент, соответствующий ГОСТ 31108 марок М500 Д0 – М400 Д20. Производство газобетона предъявляет требования к портландцементу в отношении щелочности и определяется количеством свободной CaO и Na₂O+K₂O, которых в 1 литре должно быть не менее 75 мг.

В качестве известкового вяжущего используется известь по ГОСТ 9179.

В качестве заполнителя применяется песок, соответствующий требованиям ГОСТ 8736. Основные требования к песку: модуль крупности не более Мк 1,5 и минимальное содержание илистых и глинистых веществ.

В качестве наполнителей в составе газобетона возможно применять различные инертные и активные минеральные добавки и промышленные отходы: мука известняковая ГОСТ 26826, порошок минеральный ГОСТ Р 52129. Зола-унос с тепловых станций ГОСТ 25818, золошлаковые смеси ГОСТ 25592.

Общие требования, предъявляемые к наполнителям в составе газозолобетона:

- образцы смеси золы (золошлаковой смеси) с портландцементом должны обеспечивать равномерность изменения объема при испытании образцов кипячением в воде;
 - тонкость помола (содержание частиц d 0,25 мм не менее 85%);
 - химический состав, не мешающий процессу порообразования.
- применение указанных наполнителей требует корректировки состава ячеистобетонной смеси, но вместе с тем мелкий наполнитель позволяет корректировать рецептуру и экономить расход цемента.



В качестве порообразователя используют алюминиевый порошок ПАП-1 или ПАП-2 по ГОСТ 5494. В качестве ПАВ (поверхностно-активных веществ), способствующих снижению поверхностного натяжения и лучшему распределению частиц алюминиевой пудры в смеси, обеспечивающих необходимую смачиваемость, применяют хозяйственное мыло, сульфонол – порошок или стиральный порошок.

Для регулирования процессов порообразования, скорости набора прочности и иных характеристик применяются химические добавки. Конкретный набор добавок и их дозировка определяются при проведении пусконаладочных работ, поскольку существенно зависят от исходного сырья заказчика и его требований к качеству итогового продукта. Основные виды химических добавок: сульфонат – порошок; кальций хлористый технический кальцинированный; сульфат натрия природный (очищенный); сода каустическая. Вместо вышеперечисленных добавок может применяться суперпластификатор.

Для приготовления ячеистобетонной смеси используется вода по ГОСТ 23732.

Для производства неавтоклавнога газобетона применяют конвейерный, кассетный методы и мобильные установки. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки. Например, конвейерный метод позволяет обеспечить поточность, высокую производительность и стабильное качество продукции, но требует значительных капитальных вложений и квалифицированного обслуживания. Тогда как кассетный (стационарный) метод прост в организации и менее затратен, но имеет более низкую производительность, а качество изделий в значительной мере зависит от человеческого фактора. Мобильные же установки больше подходят для выпуска блоков на строительной площадке.

На рассматриваемом предприятии ТОО "Технострой" имеется технологическая карта производства блоков стеновых мелких из ячеистых бетонов по конвейерной технологии.

Конвейерный метод производства позволяет осуществить двухкратный оборот опалубки в сутки. Автоматизация процессов подачи компонентов для производства ячеистого бетона сокращает применение ручного труда.

Установленное оборудование для производства изделий из ячеистого бетона по конвейерной технологии предполагает производительность при односменной работе для данного типа оборудования до 25 м³ в смену. Параметры конечного продукта – блоков из ячеистого бетона, варьируются от D500 B1,5 до D800 B2,5. Номинальные геометрические размеры: длина – 600 мм, высота – 300 мм, толщина – 200 мм.

В качестве основных компонентов для производства ячеистого бетона применяется вода, цемент, мелкий наполнитель (песок, золошлаковая смесь) и порообразователь (алюминиевая пудра).

В данном случае для производства используется обычная питьевая вода, которая для технологического процесса подогревается до температуры 40-50 °С. Потребность в воде составляет от 0,5 до 1,5 м³/час в зависимости от производительности линии.

Конвейерная технология производства изделий из ячеистого бетона состоит из следующих основных операций (рис. 1):

1. Подготовка форм к заливке (сборка, смазка);
2. Подготовка и заливка смеси (дозирование, смешивание, заливка);
3. Резка ячеистобетонного массива (снятие «горбушки», резка на блоки);
4. Термовлажностная обработка инфракрасным излучением в герметичной камере;
5. Перемещение готовых изделий с форм на европоддоны для упаковки.

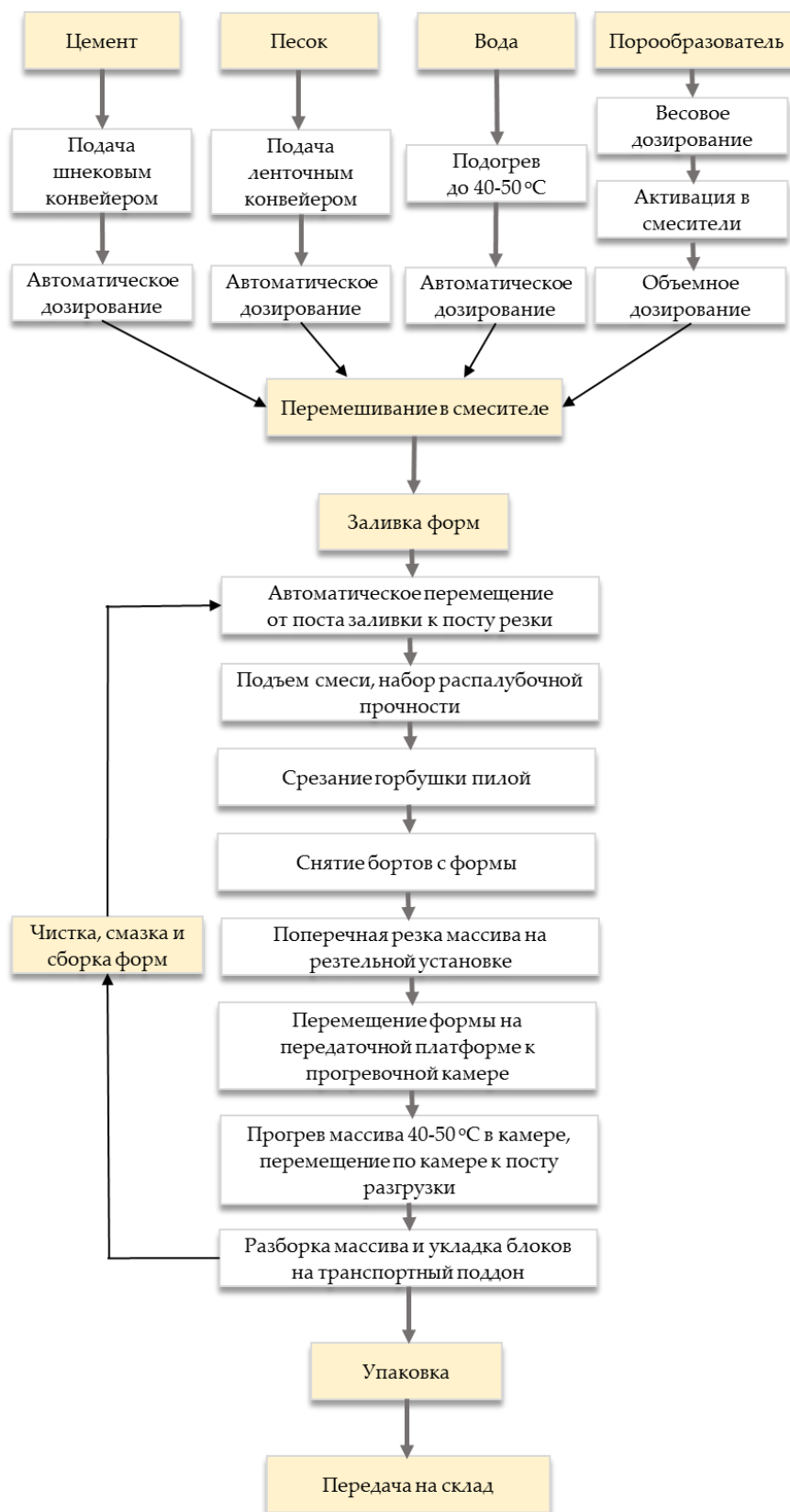


Рисунок 1. Маршрутная карта производства ячеистобетонных блоков на линии конвейерного типа

Примечание: составлено авторами на основе (ТК, 2023)



Последовательность технологических операций приведена на рис. 1 и выглядит следующим образом:

1. Подача цемента осуществляется шнековым конвейером из силоса цемента в промежуточный дозирующий бункер. Дозирование осуществляется автоматически по показаниям датчиков тензометрической платформы;

2. Песок подается ленточным конвейером в дозатор песка. При достижении в дозаторе предварительно настроенного значения массы песка, транспортер автоматически отключается;

3. В случае применения золы-уноса тепловых станций, подача золы производится шнековым конвейером из силоса непосредственно в дозатор золы;

4. Вода, нагретая до 40-50 °С, дозируется проточным дозатором (электронное управление, точность 0,1 литра) и наливается в промежуточную емкость. Данная емкость оснащена сливной горловиной большого диаметра для быстрого слива воды в смеситель;

5. Порообразователь дозируют по объему с использованием мерной емкости. В смесительной емкости происходит перемешивание с водой и небольшим количеством сульфанола (или другого СМС) происходит активация;

6. Вода из промежуточной емкости сливается в смеситель. Во время слива смеситель необходимо включить для образования турбулентной воронки;

7. В смеситель из промежуточных емкостей сыпается цемент и через минуту песок, происходит смешивание компонентов в смесителе в течение 2-3 минут;

8. По окончании смешивания перед сливом смеси добавляются химические добавки (ускорители твердения, пластификаторы – по необходимости) и затем порообразователь;

9. Тщательно перемешанный раствор сливается в подготовленную форму. Приготовление ячеистобетонной смеси и заливка ее в формы должны осуществляться при положительной температуре окружающего воздуха (от +18 °С);

10. Форма, залитая ячеистобетонной смесью, передвигается от поста заливки к посту резки, во время перемещения происходит подъем смеси, предварительный набор прочности и одновременно заливка следующей формы;

11. Через 90 - 140 минут массив подходит к посту резки. В данный момент массив ячеистого бетона (поробетон) имеет высокую пластичность и легко обрабатывается. Снятие шапки (горбушки) происходит перед снятием бортов, которые в данном случае выступают в роли направляющих для пилы;

12. Ячеистобетонный массив разрезается на блоки с помощью резательной установки струнного типа, точность реза составляет +/- 3 мм, что соответствует ГОСТ 21520;

13. Форма с разрезанным массивом передвигается на передаточной платформе в герметичную камеру термовлажностной обработки инфракрасным излучением, где при температуре от 90 до 160 °С происходит дальнейший набор прочности в течение 6 - 8 часов в присутствии паровоздушной смеси, образующейся от испарения несвязанной влаги в процессе кристаллизации ячеистобетонной смеси. По камере формы перемещаются автоматически с помощью электромеханического толкающего устройства;

14. Через 6 - 8 часов форма с изделиями выезжает из камеры ТВО с достаточной отпускной прочностью и готовые блоки перекладывают на европоддоны, упаковывают, маркируют и отправляют на склад готовой продукции;

15. Освободившаяся форма подготавливается к заливке – очищается, устанавливаются борта, смазывается;

16. Цикл повторяется, все действия в производственном цикле происходят одновременно, что позволяет получить высокую производительность и оборачиваемость форм.



Несмотря на наличие производственной линии, которая может обеспечивать выпуск продукции до 80 м³ в сутки и довольно подробной технологической карты, текущий объем производства не превышает 700 штук (24 м³).

Кроме того, применение в производстве золошлаковых отходов требует более пристального внимания к факторам, влияющим на качество изготавливаемой продукции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа факторов, влияющих на качество газозолобетонных блоков статистическими методами представлены на рис. 2.

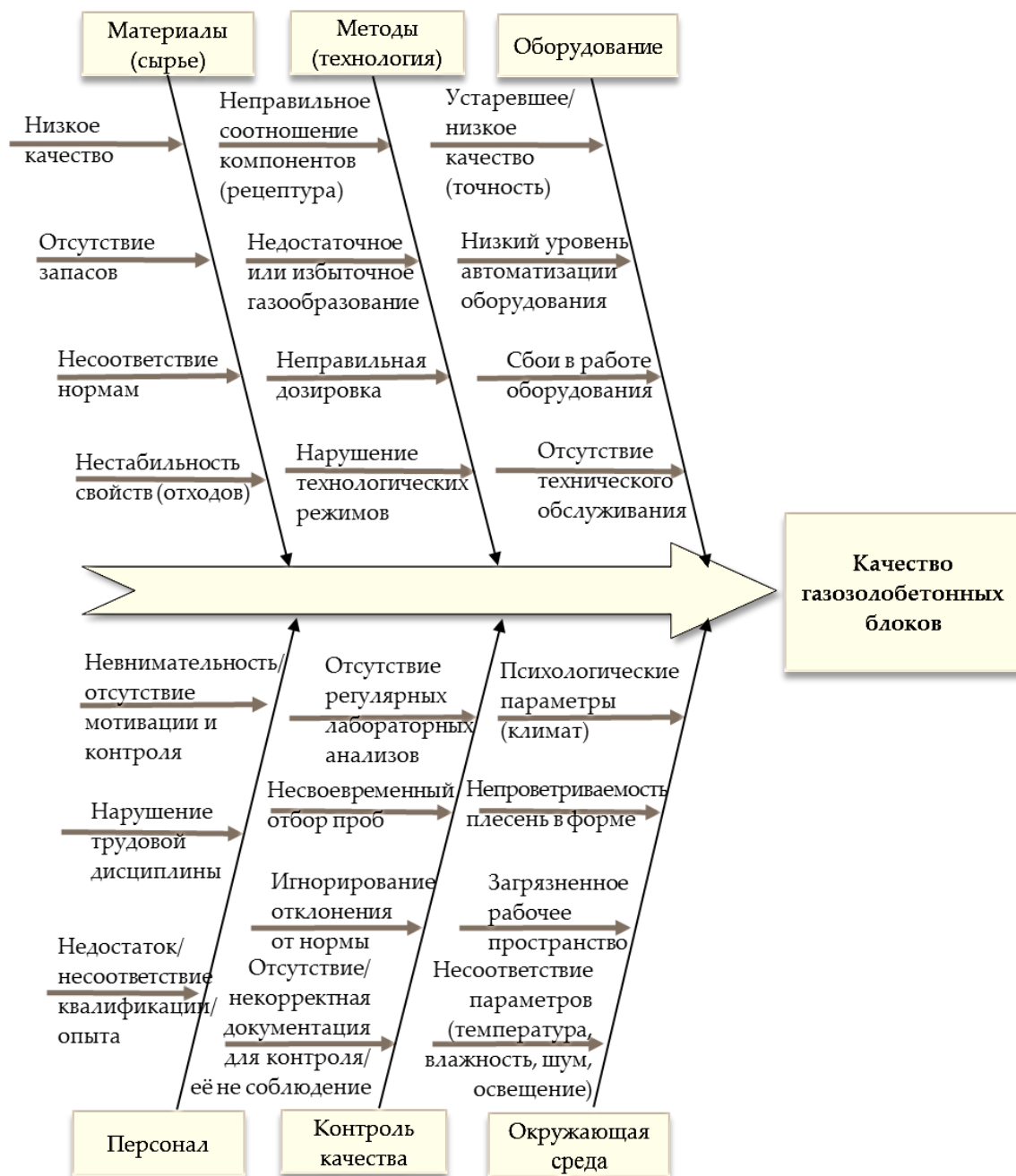


Рисунок 2. Факторы, влияющие на качество газозолобетонных блоков

Примечание: составлено авторами



Анализ работы существующей технологической линии позволил выявить факторы, оказывающие отрицательное влияние на качество готовой продукции:

- точность дозирования компонентов оказывает значительное влияние на основные характеристики газозолобетона, такие как прочности, плотность, а, следовательно, теплопроводность и морозостойкость;
- точность дозирования цемента оказывает значительное влияние на прочность газозолобетона;
- отсутствие пенетрометра затрудняет определение момента начала резки массива на блоки, что приводит к нарушению допусков на геометрические размеры готовой продукции, а иногда и к полному браку;
- износ существующих поддонов и форм, что приводит к изначальному нарушению требуемых геометрических размеров;
- отсутствие утепления поддонов и форм приводит к нестабильности реакции газообразования в течение всего времени подъема;
- малая объемная мощность смесителя-активатора не позволяет равномерно перемешать компоненты и достаточно активировать химические процессы, обеспечивающие газообразование;
- износ сита слива смеси приводит к попаданию нестандартных частиц в изделие, что приводит к браку поверхности при резке;
- состояние и конструкция рельсовых путей в значительной мере влияют на точное позиционирование форм при подаче их на посты заливки и резки;
- отсутствие специального приспособления для снятия горбушки приводит к нестабильным размерам по высоте блока;
- морально устаревшая резательная установка не позволяет изготавливать блоки разных типоразмеров и конфигураций;
- отсутствие системы утилизации бракованной продукции.

Визуальный осмотр технологии производства газозолобетонных блоков на рассматриваемом предприятии и анализ стабильности качества показал, что для получения блоков, пригодных для сейсмостойкого строительства, кроме улучшения рецептуры изготовления путем подбора оптимального состава с повышенной прочностью и сниженной плотностью блоков, также требуется модернизация оборудования для повышения стабильности и объема производства.

На основании анализа факторов, влияющих на качество газозолобетонных блоков и анализа действующей технологической линии была предложена следующая модернизация технологической линии (таблица 1).

Таблица. Технологическая линия конвейерного типа, модифицированная для производства изделий из газозолобетона

№ п/п	Существующее оборудование	Оборудование для модернизации	Основное отличие	Влияние на качество
1	2	3	4	5
1	Шнек для цемента Ø159 мм/л=4500 мм	Шнек для цемента Ø159 мм/л=5000 мм	Конструктивные отличия, влияющие на производительность, автоматизация дозаторов	Автоматизация дозаторов, прочность, плотность, теплопроводность
2	Растариватель для цемента	Растариватель для цемента	Конструктивные отличия, влияющие на производительность	Прочность, плотность, теплопроводность



Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
3	Вибросито АСМ-Вибро Производитель- ность – 0,43 м³	Вибросито АСМ-Вибро Производитель- ность – 0,86 м³	Конструктивные отличия, производительность увеличена в 2 раза, особенно важно использование вибросита при производстве газобетона с применением механизированной резки, так как посторонние включения в газобетонной смеси могут помешать получить ровный рез при разрезании массива на отдельные блоки	Прочность, плотность, теплопроводность
4	5 метров, лента транспортная ровная	Ленточный транспортёр 6 м с шевронной лентой, с ребрами	6 метров, лента транспортная с ребрами для более производительной работы, автоматизация дозаторов	Автоматизация дозаторов, прочность, плотность, теплопроводность
5	Блок весовых дозаторов на 3 компонента (цемент, песок, вода) Производитель- ность – 0,43 м³	Блок весовых дозаторов на 3 компонента (цемент, песок, вода) Производитель- ность – 0,86 м³	Емкость каждого из весовых дозаторов увеличена в 2 раза, обеспечивает высокую точность дозирования и как следствие стабильно высокое качество готовой продукции от партии к партии	Точность дозирования, прочность, плотность, теплопроводность
6	Отсутствует	Пенетрометр	Модернизированный вид оборудования для современного производства	Пластическая прочность газобетонного массива и готовность его к этапу резки
7	Смеситель- активатор под блок дозаторов производитель- ность 0,43 м³	Смеситель- активатор Производитель- ность – 0,86 м³	Конструктивные отличия, производи- тельность увеличена в 2 раза	Прочность, плотность, теплопроводность
8	Поддоны форм с металлическим дном 2,4×0,6×0,3 м на 12 газоблоков	Поддоны форм, утепленные с металлическим дном 2,4×0,6×0,6 м на 24 газоблока	Конструктивные отличия, утепленные, количество блоков в форме увеличено на 12 шт, позволяют наиболее рационально организовать производство, разместив стационарно основные узлы, такие как смесительный узел, резательная установка	Геометрические размеры



Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
9	Борта форм (комплект) 2,4×0,6×0,3 м на 12 газоблоков	Борта форм (комплект) 2,4×0,6×0,6 м на 24 газоблока	Конструктивные отличия, количество блоков в форме увеличено на 12 шт, изготовлены с применением высокоточной лазерной резки и обеспечивают особую герметичность в собранном виде	Геометрические размеры
10	Сито для слива смеси в форму	Сито для слива смеси в форму	Улучшенное	Прочность, плотность, теплопроводность
11	Толкатель электро-механический	Толкатель электро-механический	Конструктивные отличия, влияющие на производительность, плавное перемещение является ключевой особенностью данного толкателя, что позволяет в точности соблюдать требования технологического регламента	Плавное перемещение форм в конвейерной линии, геометрические размеры
12	Толкатель электромеханический двойной	Толкатель электромеханический двойной	Конструктивные отличия, влияющие на производительность, плавное поочередное перемещение форм в две камеры прогрева конвейерных линий с полной автоматизацией	Плавное поочередное перемещение форм в две камеры прогрева конвейерных линий с полной автоматизацией, геометрические размеры
13	Блок управления электромеханическим толкателем	Блок управления электромеханическим толкателем	Конструктивные отличия, влияющие на производительность, обеспечивает бесперебойную работу электромеханического толкателя обеспечивая правильный алгоритм его работы	Геометрические размеры, прочность, плотность
14	Передаточная тележка	Передаточная тележка	Конструктивные отличия, влияющие на производительность	Производительность, прочность, плотность
15	Основной рельсовый путь (рельсы, опоры, поперечины) (пог. м)	Основной рельсовый путь (рельсы, опоры, поперечины) (пог. м)	Конструктивные изменения, позволяющие наиболее точно позиционировать формы при подаче их на посты заливки и резки	Производительность, прочность, плотность



Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
16	Передаточный рельсовый путь	Передаточный рельсовый путь	Конструктивно улучшен	Производительность, прочность, плотность
17	Возвратная тележка	Возвратная тележка	Конструктивные отличия, влияющие на производительность	Производительность, прочность, плотность
18	Возвратный рельсовый путь	Возвратный рельсовый путь	Конструктивно улучшен	Производительность, прочность, плотность
19	Отсутствует	Скребок для снятия горбушки	Модернизированный вид инструмента для современного производства	Геометрические размеры
20	Автоматизированная резательная установка Позволяет изготавливать блоки шириной 100, 150, мм	Автоматизированный резательный комплекс Позволяет изготавливать блоки шириной 100, 150, 200, 250, 300 и 400 мм.	Конструктивные отличия, автоматизированный срез горбушки, возможность горизонтального реза, распил массива высотой 300 и 600 мм, изготовление U-блоков, изготовление блоков с ручками, изготовление блоков Smart-Lock	Геометрические размеры, прочность, плотность
21	Отсутствует	Шаблон для резки с комплектом пил конвейерной линии	Модернизированный вид оборудования для современного производства	Геометрические размеры
22	Отсутствует	Пост разгрузки блоков ПРБ-2	Модернизированный вид оборудования для современного производства	Первоначальная сохраняемость формы блоков
23	Отсутствует	Дробилка для отходов	Модернизированный вид оборудования для современного производства	Безотходность производства

Примечание: составлено авторами

Модернизация оборудования включает закуп нового оборудования улучшенными характеристиками, которое повысит точность дозирования, что будет способствовать улучшению прочности и плотности, а также теплопроводность газозолобетонных блоков. Кроме этого, модернизация линии обеспечит повышение точности геометрических размеров, что особенно важно для обеспечения прочности нормального сцепления в кладке при строительстве в сейсмически опасных районах. Технические характеристики нового оборудования и уровень автоматизации технологического процесса позволяют увеличить количество производимых газозолобетонных блоков без увеличения численности сотрудников.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ факторов, влияющих на качество газозолобетонных блоков и действующей технологической линии конвейерного типа для производства изделий из газозолобетона позволил предложить технические решения по её модернизации. Модернизация технологической линии конвейерного типа производства позволит производить газозолобетонные блоки большего спектра типоразмеров, пригодные для строительства в сейсмически опасных районах.

В дальнейшем для более полного соответствия принципам устойчивого строительства будут проведены исследования по оптимизации энергопотребления модернизированной технологической линии по производству газозолобетонных блоков и поиск решений для снижения энергозатрат.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант No. BR21882292 – «Комплексное развитие устойчивых строительных отраслей: инновационные технологии, оптимизация производства, эффективное использование ресурсов и создание технопарка»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Beskokpylny, A., Shcherban', E., Stel'makh, S., Mailyan, L., Meskhi, B., Evtushenko, A., El'shaeva, D., & Chernil'nik, A. (2023). Improving the physical and mechanical characteristics of modified aerated concrete by reinforcing with plant fibers. *Fibers*, 11(4), 33. <https://doi.org/10.3390/fib11040033>
- Chen, C., Xu, Sh., Qi, G., & Huo, W. (2023). Technical innovation and research of autoclaved aerated concrete block/panel equipment. *ICAAC 2023: 7th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete*, 6(2), 339–347.
- Goncharova, N. (2023). Non-autoclaved aerated concrete with microfill and its properties. *Spectrum Journal of Innovation*, 22, 175–179.
- Kozhageldi, N., Shon, C., Yerbolat, I., Orynbassarov, I., Zhang, D., & Kim, J. (2022). Thermal performance evaluation of non-autoclaved aerated concrete produced with crushed waste glass bottle aggregate and glass fiber. *Materials Science Forum*, 1077, 243–249. <https://doi.org/10.4028/p-1689hp>
- Ma, Sh., Kong, Y., Li, L., & others. (2023). Technical innovation of autoclaved aerated concrete preparation from desulfurization wastewater and sludge and its life cycle assessment. *Energy Sources*, 45(4), 12759–12773. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2276900>
- Rudenko, O., Anop, D., Lutai, A., Soshnikov, N., Aubakirova, Z., & Kuldeyev, E. (2023). Global and domestic experience of aerated concrete production and the possibility of using local materials. *Vestnik nauki*, 4, 324–334. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2023_4_324 // Rudenko, O., Anop, D., Lutai, A., Soshnikov, N., Aubakirova, Z., & Kuldeyev, E. (2023). Global'nyy i otechestvennyy opyt proizvodstva yacheistogo betona i vozmozhnost' ispol'zovaniya mestnykh materialov [Global and domestic experience of aerated concrete production and the possibility of using local materials]. *Vestnik nauki*, 4, 324–334. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2023_4_324 (In Russ.)
- Shon, C.-S., Mukangali, I., Zhang, D., Ulykbanov, A., & Kim, J. (2021). Evaluation of non-autoclaved aerated concrete for energy behaviors of a residential house in Nur-Sultan, Kazakhstan. *Buildings*, 11, 610. <https://doi.org/10.3390/buildings11120610>
- Statkauskas, M., Grinys, A., & Vaičiukynienė, D. (2022). Investigation of concrete shrinkage reducing additives. *Materials*, 15(9), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ma15093407>



- UBlok Group. (2023). Changxing factory technical retrofit report.
- ГОСТ 5494-95 (2006). Пудра алюминиевая. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 12. // GOST 5494-95 (2006). Pudra alyuminievaya. Tekhnicheskie usloviya [Aluminum powder. Technical specifications]. Moscow: Standartinform, 12. (In Russ.)
- ГОСТ 8736-2014 (2015). Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 17. // GOST 8736-2014 (2015). Pesok dlya stroitel'nykh rabot. Tekhnicheskie usloviya [Sand for construction works. Technical specifications]. Moscow: Standartinform, 17. (In Russ.)
- ГОСТ 21520-89 (2004). Блоки из ячеистых бетонов стеновые мелкие. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов, 7. // GOST 21520-89 (2004). Bloki iz yacheistyx betonov stenovye melkie. Tekhnicheskie usloviya [Small wall blocks made of cellular concrete. Technical specifications]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 7. (In Russ.)
- ГОСТ 23732-2011 (2012). Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 16. // GOST 23732-2011 (2012). Voda dlya betonov i stroitel'nykh rastvorov. Tekhnicheskie usloviya [Water for concrete and construction mortars. Technical specifications]. Moscow: Standartinform, 16. (In Russ.)
- ГОСТ 25592-2019 (2024). Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 19. // GOST 25592-2019 (2024). Smesi zoloshlakovye teplovykh elektrostantsiy dlya betonov. Tekhnicheskie usloviya [Ash and slag mixtures of thermal power plants for concretes. Technical specifications]. Minsk: Evraziyskiy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 19. (In Russ.)
- ГОСТ 31108-2020 (2025). Цементы общестроительные. Технические условия. Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 24. // GOST 31108-2020 (2025). Tsementy obshchestroitel'nye. Tekhnicheskie usloviya [General construction cements. Technical specifications]. Minsk: Evraziyskiy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 24. (In Russ.)
- ТК. (2023). Технологическая карта производства блоков стеновых мелких из ячеистых бетонов по конвейерной технологии. ТОО «Технострой» // ТК. (2023). Tekhnologicheskaya karta proizvodstva blokov stenovykh melkikh iz yacheistyx betonov po konveyernoy tekhnologii [Technological map for the production of small wall blocks from cellular concretes using conveyor technology]. ТОО "Tekhnostroy". (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Руденко Ольга Владимировна – техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Руденко Ольга Владимировна – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Rudenko Olga Vladimirovna – Doctor of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: O_Rudenko_vkqtu@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9783-5466>,



Аноп Дарья Камильевна – техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Аноп Дарья Камильевна – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Anop Darya Kamilyevna – Doctor of Technical Sciences, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: danop@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4633-6584>,



Скориков Сергей Петрович – «Технострой» ЖШС директорының орынбасары, Қазақстан

Скориков Сергей Петрович – заместитель директора ТОО «Технострой», Казахстан

Skorikov Sergey – Deputy Director of Technostroy LLP, Kazakhstan,

e-mail: s.skorikov@icloud.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6552-830X>,



Крючков Алексей Валерьевич – «Технострой» ЖШС директоры, Қазақстан

Крючков Алексей Валерьевич – директор ТОО «Технострой», Казахстан

Kryuchkov Alexey – Director of Technostroy LLP, Kazakhstan,

e-mail: technostroy2001@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3034-9744>,



Лутай Сергей Сергеевич – Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Лутай Сергей Сергеевич – Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Lutai Sergey – East Kazakhstan Technical University named after

D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: sslutai@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2238-9083>,



Бегентаев Мейрам Мухаметрахимович – экономика ғылымдарының докторы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

Бегентаев Мейрам Мұхаметрақымұлы – доктор экономических наук, Казахский национальный технический университет им. К. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

Meiram Begentayev – Doctor of economics, K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: m.begentayev@satbayev.university



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_347
IRSTI 67.11.29

COMPARATIVE ANALYSIS OF WEAK SOILS: EVALUATING GEOSYNTHETIC APPLICATIONS FOR ENHANCED STABILITY AND LOAD-BEARING CAPACITY

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЛАБЫХ ГРУНТОВ: ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

ӘЛСІЗ ТОПЫРАҚТАРДЫ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ: ТҰРАҚТЫЛЫҚ ПЕН КӨТЕРГІШТІК ҚАБІЛЕТТІ АРТТЫРУ ҮШІН ГЕОСИНТЕТИКАЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДЫ ҚОЛДАНУДЫ БАҒАЛАУ

Zh.A. Shakhmov ¹, M.Y. Yerzatova ^{2*}, T.K. Muzdybayeva ¹

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

²Nazarbayev University, Astana, Republic of Kazakhstan

*Corresponding author: Merey Yerzatova, e-mail: merey.yerzatova@nu.edu.kz

Keywords:

weak soils, geosynthetics,
geotechnical properties, soil
improvement, load-bearing
capacity.

ABSTRACT

Weak soil conditions present significant challenges in various civil engineering projects, including construction, slope stability, and infrastructure development. Weak soils are found in several regions, many loess and silty soils are most widespread in the central and southern Kazakhstan regions. This study presents a comparative analysis of weak soils, focusing on solid loam and plastic sandy silt specimens collected from regions in central and southern Kazakhstan. The research evaluates the effectiveness of geosynthetic applications in enhancing the stability and load-bearing capacity of these soil types. Through comprehensive laboratory testing, including liquid and plastic limit tests, determination of swelling potential, the geotechnical properties of both soils are examined. Investigations are conducted to determine the impact of geosynthetics on soil reinforcement, deformation control, and load distribution. Through a detailed analysis of the literature and experimental studies of the geotechnical properties of weak soils, this research explores conventional and innovative techniques employed for soil improvement. This study offers practical guidelines for engineers and researchers to optimize soil strengthening strategies, ensuring durability and reliability in civil engineering applications.

Түйінді сөздер:

әлсіз топырақтар,
геосинтетика,
геотехникалық қасиеттер,
топырақты жақсарту,
көтергіштік қабілет.

ТҮЙІНДЕМЕ

Әлсіз топырақтар құрылыс, еңіс тұрақтылығы және инфра-құрылымды дамыту сияқты азаматтық инженерия жобаларында маңызды мәселелер тудырады. Әлсіз топырақтар Қазақстанның көптеген аймақтарында кездеседі, әсіресе орталық және оңтүстік өңірлерде лёсс және лайлы топырақтар кең таралған. Бұл зерттеуде орталық және оңтүстік Қазақстан өңірлерінен алынған тығыз саздақ пен пластикалық құмды лай үлгілеріне негізделген әлсіз топырақтардың салыстырмалы талдауы ұсынылады.



Зерттеу осы топырақ түрлерінің тұрақтылығы мен көтергіштік қабілетін арттырудағы геосинтетикалық материалдарды қолданудың тиімділігін бағалауға бағытталған. Сұйықтық және пластикалық шектерді анықтау, ісіну мүмкіндігін бағалау сияқты кешенді зертханалық сынақтар арқылы екі топырақтың геотехникалық қасиеттері зерттелді. Геосинтетикалардың топырақты арматуралау, деформацияны бақылау және жүктемені таратуға әсері қарастырылады. Әлсіз топырақтардың геотехникалық қасиеттеріне арналған әдебиеттер мен тәжірибелік зерттеулерді жан-жақты талдау арқылы топырақты жақсартудың дәстүрлі және инновациялық әдістері зерделенеді. Бұл зерттеу инженерлер мен зерттеушілерге топырақты нығайту стратегияларын оңтайландыру бойынша практикалық нұсқаулар ұсына отырып, азаматтық құрылыс саласында беріктік пен сенімділікті қамтамасыз етуге бағытталған.

Ключевые слова:

слабые грунты,
геосинтетика,
геотехнические свойства,
упрочнение грунтов,
несущая способность.

АННОТАЦИЯ

Слабые грунты представляют собой серьезную проблему для различных объектов гражданского строительства, включая возведение зданий, обеспечение устойчивости откосов и развитие инфраструктуры. Слабые грунты распространены в ряде регионов, особенно в центральных и южных областях Казахстана, где преобладают лёссовые и илистые почвы. В данной работе представлен сравнительный анализ слабых грунтов с акцентом на плотный суглинок и пластичный пылевато-песчаный ил, образцы которых были отобраны из различных регионов Центрального и Южного Казахстана. Исследование направлено на оценку эффективности применения геосинтетических материалов для повышения устойчивости и несущей способности этих типов грунтов. Посредством комплексных лабораторных испытаний, включая определение границ текучести и пластичности, а также потенциальной набухаемости, исследуются геотехнические свойства обоих типов грунтов. Анализируется влияние геосинтетических материалов на армирование грунта, контроль деформаций и распределение нагрузок. На основе подробного анализа научной литературы и экспериментальных исследований геотехнических характеристик слабых грунтов рассматриваются как традиционные, так и инновационные методы их упрочнения. Работа предлагает практические рекомендации для инженеров и исследователей по оптимизации методов укрепления грунтов с целью обеспечения долговечности и надежности строительных объектов.

INTRODUCTION

Weak soils, characterized by low shear strength, high compressibility, and limited load-bearing capacity, present significant challenges in civil engineering design and construction. These geotechnically unstable soils, including loess and silty deposits, are widely distributed across various regions, particularly in central and southern Kazakhstan. Their presence compromises the stability and long-term performance of foundations, infrastructure, and slopes, necessitating the development of effective soil stabilization measures. A thorough understanding of their geotechnical behavior under different loading conditions is essential for optimizing reinforcement strategies and ensuring structural safety and durability (Sánchez-Garrido et al., 2022).

Globally, weak soil conditions have posed substantial engineering challenges. In Mexico City, highly compressible lacustrine clays from its ancient lakebed have led to excessive settlement and structural tilting, while Shanghai faces similar geotechnical issues due to soft



alluvial deposits. Rapid urbanization has exacerbated these problems, increasing the vulnerability of infrastructure to differential settlement and foundation failure (Utegov et al., 2021). In Kazakhstan, Astana is built on weak, clayey soils prone to settlement, further aggravated by high groundwater levels and severe frost conditions, necessitating pile foundations and advanced soil stabilization techniques. Conversely, Shymkent, located in southern Kazakhstan, is underlain by fine-grained, porous loess soils, which are highly collapsible upon saturation (Utegov et al., 2022).

Despite advancements in soil stabilization techniques, the lack of region-specific geotechnical data often results in the inefficient application of soil improvement methods that may not be fully optimized for local conditions (Baitova and Zhambakina, 2021). Furthermore, while many studies focus on the short-term effectiveness of soil treatment techniques, long-term performance assessments remain insufficient. Addressing these research gaps is essential for developing sustainable and resilient solutions to weak soil challenges in civil engineering projects.

A proven method for addressing weak soil challenges is the application of geosynthetics, synthetic materials engineered to enhance the mechanical behavior of soils. Geosynthetics, including geogrids, geotextiles, and geomembranes, are widely employed for their ability to improve shear strength, reduce settlement, and enhance load distribution. Their effectiveness in reinforcing weak soils, controlling deformation, and minimizing erosion makes them a cost-efficient and environmentally sustainable solution for soil stabilization (Shakhmov et al., 2018). However, despite their extensive application, further research is required to assess their long-term performance across different soil conditions, particularly in regions with complex geotechnical characteristics. Comprehensive studies are necessary to optimize geosynthetic applications for varying soil types, ensuring their efficiency and durability in diverse engineering projects (Rad et al., 2024).

This study focuses on two prevalent weak soil types—solid loam and plastic sandy silt, commonly found in Kazakhstan’s central and southern regions. Both soil types are characterized by their susceptibility to deformation and low load-bearing capacity, making them suitable candidates for evaluating the impact of geosynthetics on soil stability and strength. By conducting a comparative analysis of these soil types, this research aims to provide valuable insights into the effectiveness of geosynthetics in enhancing the engineering properties of weak soils.

Through a series of laboratory tests, including the determination of liquid and plastic limits, swelling potential, and bearing capacity, the geotechnical properties of both solid loam and plastic sandy silt are thoroughly examined. Additionally, the study investigates the impact of geosynthetic materials on improving soil reinforcement, controlling deformation, and enhancing load-bearing capacity. The findings of this study contribute to the growing body of knowledge on soil improvement techniques, providing engineers and researchers with practical guidelines for optimizing geosynthetic applications in the stabilization of weak soils. The results offer critical insights into the sustainability and applicability of these techniques in civil engineering projects, ensuring more reliable and durable solutions for construction and infrastructure development in regions with weak soils.

MATERIALS AND METHODS

This study integrates a comprehensive review of existing literature with experimental research to evaluate the properties of two predominant weak soil types—solid loam and plastic sandy silt. A combination of laboratory investigations and advanced measurement techniques is employed to assess the effectiveness of geosynthetics in improving the engineering characteristics of these soils. The experimental framework is guided by a system-structural approach, which focuses on soil improvement techniques and property analysis. By utilizing modern research



methodologies and state-of-the-art testing equipment, this study ensures high reliability and accuracy in its findings, contributing to a deeper understanding of geosynthetic applications in soil stabilization (GOST 12248-2010).

Soil samples were collected from designated sites in central and southern Kazakhstan, specifically from regions where solid loam and silty sandy loam are the predominant soil types. The samples were carefully prepared and preserved for laboratory testing. Prior to testing, the soil samples were air-dried to a consistent moisture content and then sieved to remove large particles, ensuring a uniform sample for analysis.

A series of standard geotechnical tests were conducted on the soil samples to determine their physical and engineering properties. The liquid and plastic limit tests were used to determine soil plasticity, with the liquid limit measured using a Casagrande apparatus for solid loam and a balance cone (Vasiliev cone) for silty sandy loam. The swelling potential was evaluated using an oedometer test, measuring volume changes upon water absorption. These tests provided insights into soil behavior and the effectiveness of geosynthetics for reinforcement (Das, 2010).

This study systematically reviews the selection and application of geosynthetic materials, focusing on the commonly used geogrids and geotextiles for reinforcing weak soils. The literature review examines existing research on the effectiveness of these materials in enhancing soil mechanical properties and load-bearing capacity. Additionally, various application methods, including different types and layering configurations of geosynthetics, are analyzed based on their reported influence on soil behavior under diverse conditions. The review provides insights into the interaction between geosynthetics and weak soils, assessing the potential benefits of these materials in soil stabilization and improvement.

Accurate laboratory characterization of soil properties is essential for foundation design, soil improvement strategies, and quality control in geotechnical engineering. Natural soil deposits often exhibit significant nonhomogeneity, requiring precise laboratory evaluations to ensure the applicability of theoretical soil mechanics equations in practical engineering contexts (Awwad et al., 2019).

Experimental investigations were conducted to analyze the influence of geosynthetic materials on the geotechnical properties of weak soils. A comparative analysis was performed to assess the geotechnical behavior of solid loam and silty sandy loam, focusing on their response to geosynthetic reinforcement. Furthermore, statistical methods were employed to quantify the significance of the observed improvements in soil properties, providing a robust assessment of the effectiveness of geosynthetics in enhancing soil performance (Yerzatova et al., 2025).

RESULTS AND DISCUSSION

Table 1. Liquid and plastic limit test results of the soil No.1

The cup №	The cup mass (g)	The moisture soil mass (g)	The dry soil mass (g)	Number of blows	Moisture content (%)
1	2	3	4	5	6
Liquid limit test					
17	7.6	18.9	16.2	33	31.4
47	7.7	27.2	22.5	16	31.8
2	7.5	26.1	21.6	28	31.9
324	7.9	19.3	16.6	34	31.0
8	12.4	29.0	25.0	14	31.7
			Liquid Limit:	25	31.56



End of table 1

Plastic limit test					
97	7.7	14.6	13.5	-	18.9
3	7.7	15.1	14	-	17.5
				Plastic Limit:	18.2
Note – compiled by the author based on data from Yertzatova et al. (2025)					

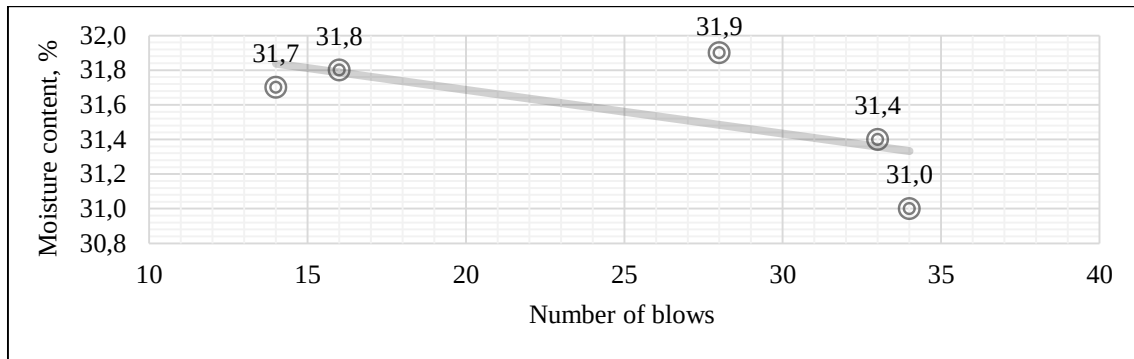


Figure 1. Liquid limit diagram of the soil 1

Note – compiled by the authors based on (Yertzatova et al., 2025)

The liquid and plastic limit test results for soil sample 1, presented in Table 1, indicate a liquid limit of 31.56% and a plastic limit of 18.2%, resulting in a plasticity index of 13.36%. The moisture content values recorded during the liquid limit test range from 31.0% to 31.9%, demonstrating slight variations and indicating consistent soil behavior under varying compaction energies. The trend observed in the liquid limit diagram in Fig. 1 confirms the soil's transition from a liquid to a plastic state as the number of blows increases, indicating its moderate plasticity. With a plasticity index above 10%, the soil can be classified as medium-plastic, which implies it may be prone to some degree of shrinkage and swelling. These characteristics make it more suitable for applications requiring stabilization techniques, such as geosynthetic reinforcement or chemical treatment, to enhance its load-bearing capacity and reduce deformation risks under load. Further investigation, including shear strength and permeability tests, is recommended to fully evaluate its engineering properties.

Table 2. Liquid and plastic limit test results of the soil No.1

The cup №	The cup mass (g)	The moisture soil mass (g)	The dry soil mass (g)	Number of blows	Moisture content (%)
Liquid limit test					
1	5.11	16.66	14.50	31	23
5	6.00	19.68	17.05	21	23.8
9	5.35	19.13	16.54	15	23.15
14	5.47	16.19	14.16	34	23.36
19	5.32	17.37	15.09	24	23.34
			Liquid Limit:	25	23.33
Plastic limit test					
0478	5.29	12.29	11.21	-	18.24
0488	5.36	12.31	11.26	-	17.80
				Plastic Limit:	18.02

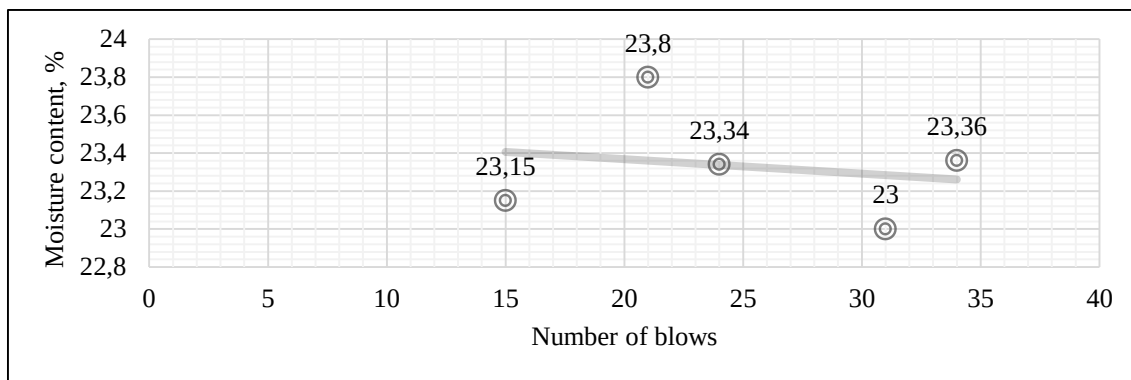


Figure 2. Liquid limit diagram of the soil 2

Note – compiled by the authors

The liquid and plastic limit test results for soil sample 2, presented in Table 2, indicate a liquid limit of 23.33% and a plastic limit of 18.02%, resulting in a plasticity index of 5.31%. These values classify the soil as having low plasticity, suggesting it is likely composed of silty or sandy material. The moisture content variations observed in the liquid limit test show consistency, indicating a uniform composition and moderate sensitivity to moisture changes. The downward trend observed in the liquid limit diagram in Fig. 2 indicates the soil's transition from a liquid to a plastic state as compaction energy increases. The low plasticity index implies that the soil exhibits minimal shrinkage or swelling potential, making it suitable for applications requiring stable subgrades or reinforced foundations. However, further investigations, including shear strength and compaction studies, are recommended to confirm its performance under load-bearing conditions.

The determination of normative and calculated values of soil characteristics for IGE and CSE is conducted in accordance with normative document on statistical treatment of the test results (GOST 20522-96).

The analysis reveals that the normative values of liquid limits are 31.56% for soil No. 1 and 23.33% for Soil No. 2, with calculated values slightly lower at 31.25% and 23.1%, respectively. Statistical checks confirm that deviations between the measured and normative values fall within acceptable confidence intervals, as demonstrated by the inequalities satisfying the statistical check. The mean square deviations are 0.36 for soil No. 1 and 0.3 for soil No. 2, indicating low dispersion and consistent measurements.

Given in Table 3, the coefficients of variation are 0.0114 and 0.0129, reflecting minimal variability, while the accuracy indices of 0.011 and 0.012 affirm high precision. Reliability coefficients of 1.01 for both soils indicate strong statistical reliability and confidence in the calculated values. These findings suggest that the soils exhibit stable properties suitable for engineering applications, though soil 1 demonstrates slightly higher variability and liquid limit values, implying potentially greater plasticity and moisture retention capacity compared to soil No. 2. The results underscore the necessity of tailored stabilization techniques to ensure structural integrity under varying conditions.

Table 3. Comparative statistical analysis

Denomination of a value	Formula	Soil No. 1	Soil No. 2
1	2	3	4
The normative value of soil, X_n (%)	$X_n = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum X_i, (1)$	31.56%	23.33%



End of table 1

1	2	3	4
Statistical check	$ X_n - X_i > \nu \cdot S, (2)$	$ 31.56 - 31.4 < 1.92 \cdot 0.36, 0.16 < 0.69$ $ 31.56 - 31.8 < 1.92 \cdot 0.36, 0.24 < 0.69$ $ 31.56 - 31.9 < 1.92 \cdot 0.36, 0.34 < 0.69$ $ 31.56 - 31.0 < 1.92 \cdot 0.36, 0.56 < 0.69$ $ 31.56 - 31.7 < 1.92 \cdot 0.36, 0.14 < 0.69$	$ 23.33 - 23 < 1.92 \cdot 0.3, 0.33 < 0.576$ $ 23.33 - 23.8 < 1.92 \cdot 0.3, 0.47 < 0.576$ $ 23.33 - 23.15 < 1.92 \cdot 0.3, 0.18 < 0.576$ $ 23.33 - 23.36 < 1.92 \cdot 0.3, 0.03 < 0.576$ $ 23.33 - 23.34 < 1.92 \cdot 0.3, 0.01 < 0.576$
The mean square deviation, S	$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_n - X_i)^2}, (3)$	0.36	0.3
The coefficient of variation, V	$V = S / X_n, (4)$	0.0114	0.0129
The accuracy index, ρ_α	$\rho_\alpha = \frac{t_\alpha V}{\sqrt{n}}, (5)$	0.011	0.012
The reliability coefficient, γ_g	$\gamma_g = 1 / (1 \pm \rho_\alpha), (6)$	1.01	1.01
The calculated value of soil, X (%)	$X = X_n / \gamma_g, (7)$	31.25%	23.1%
Note – compiled by the authors			

Based on the results in Table 3, the calculated liquid limit values for the two soil samples were determined to be 31.25% for soil No. 1 and 23.1% for soil No. 2. These values are slightly lower than the normative liquid limits, suggesting minimal variability and consistent measurement reliability.

The liquid limit of soil No. 1 indicates its medium plasticity, which reflects higher moisture retention and deformation potential compared to soil No. 2, which exhibits low plasticity and limited moisture sensitivity. The statistical reliability coefficients of 1.01 for both samples confirm the accuracy of these findings, emphasizing the suitability of the soils for engineering applications when paired with stabilization techniques like geosynthetics.

To identify the type of soils, it was necessary to determine the characteristics of the soil, such as plasticity (I_P) and liquidity index (I_L), by results taken from limit tests (Gunaratne, 2006).

For the soil No. 1:

$$I_{P1} = (\omega_L - \omega_p)100\% = (0.316 - 0.189)100\% = 12.7\%, \quad (8)$$

$$I_{L1} = (\omega - \omega_p)/(\omega_L - \omega_p) = (0.1789 - 0.189)/(0.316 - 0.189) = -0.08, \quad (9)$$

Where ω is natural soil moisture, ω_L is at the yield point, and ω_p is at the rolling edge. Since $7 < I_P \leq 17$ and $I_L < 0$, the denomination of soil No. 1 according to GOST 25100-2020 is «Solid Loam» (GOST 25100-2020). The denomination according to ASTM D 2487 is lean clay with an index CL (ASTM D2487-17). Based on the ISO 14688-2:2017 system, this soil falls under the category of a very stiff loam, which corresponds to a lean clay.

For the soil No. 2:

$$I_{P2} = (\omega_L - \omega_p)100\% = (0.233 - 0.180)100\% = 5.3\%, \quad (8)$$

$$I_{L2} = (\omega - \omega_p)/(\omega_L - \omega_p) = (0.1968 - 0.180)/(0.233 - 0.180) = 0.317, \quad (9)$$

As $1 \leq I_p \leq 7$ and $0 \leq I_L \leq 1$, the denomination of soil No. 2 according to GOST 25100-2020 is «Plastic Sandy Silt» (GOST 25100-2020). The denomination according to ASTM D 2487 is Silty clay with an index CL-ML (ASTM D2487-17). According to the ISO 14688-2:2017 system, this would be categorized as a very soft–stiff soil with silty characteristics.

To determine the swelling potential of the soil, the process begins with measuring the natural moisture content. The soil sample is subsequently dried in a controlled laboratory oven to remove any residual moisture. Once dried, it is finely ground using a porcelain dish and passed through a No. 1 mesh sieve to ensure particle size uniformity. This sieving process guarantees consistent soil texture for accurate testing. After measuring the natural moisture content, water equivalent to the recorded value is added to the dried soil sample (Teltayev et al., 2020).

The moist soil is then carefully weighed and placed into a cylindrical mold with a diameter of 100 mm and a height of 150 mm. The interior surface of the mold is coated with technical petroleum jelly or grease to minimize friction and ensure smooth compaction. The soil is compacted in layers, with each layer compressed after every 50 mm to achieve uniform density and structural consistency. This compaction method prevents voids and enhances reliability in the evaluation (Shakhmov et al., 2016).

Once compacted, the mold is wrapped with thermal insulation, such as cotton, to maintain stable temperature conditions throughout the testing period. The insulated mold is then transferred to a laboratory freezing chamber, where the swelling potential of the soil is assessed under controlled environmental conditions.

Measurements were conducted at 12-hour intervals on a soil sample subjected to controlled freezing conditions within a laboratory freezing chamber. After each removal, the mass and height of the sample were recorded to monitor volumetric and weight changes. Following the measurements, the sample was immersed in water to assess its saturation and subsequent behavior under soaking conditions. This procedure ensured systematic data collection for evaluating the sample's swelling potential and structural stability, facilitating detailed analysis of soil performance under freeze-thaw cycles (GOST 12248.6-2020). This experimental approach provides a systematic evaluation of soil behavior under freezing conditions, simulating field scenarios for enhanced accuracy.

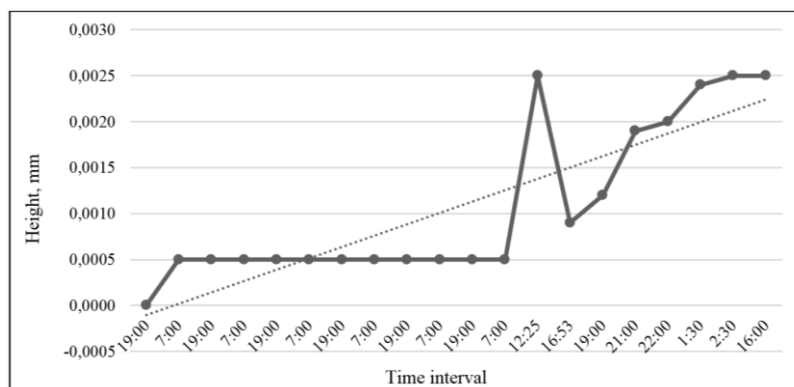


Figure 3. The graph of the measurement of the degree of swelling potential of the soil
Note – compiled by the authors



The graph illustrates the variation in the height of a soil sample over time under controlled freezing and soaking conditions.

During the initial phase (0–84 hours), the sample exhibits minimal expansion, maintaining a stable height with slight fluctuations (~ 0.0005 mm). This stability indicates low initial swelling potential, likely due to insufficient moisture absorption or freezing-induced compaction. A sharp increase in height (to ~ 0.0025 mm) occurs during the critical transition (96–108 hours), reflecting a sudden phase change or ice lens formation, characteristic of freezing-induced volumetric expansion. This behavior highlights the soil's vulnerability to frost heave when exposed to freezing temperatures. After the peak (108–132 hours), the height decreases briefly before stabilizing at ~ 0.002 mm. This reduction suggests partial structural collapse due to thawing and water drainage, which is followed by gradual re-expansion. The sample stabilizes, showing reduced fluctuations, which may indicate saturation equilibrium (132–144 hours). The overall upward trend (dashed line) underscores cumulative swelling effects influenced by freeze-thaw cycles. The observed swelling trends highlight the soil's susceptibility to frost-induced deformations. This analysis emphasizes the need for reinforcement strategies, such as geosynthetics, to mitigate swelling and enhance structural stability under cyclic freeze-thaw conditions.

Geosynthetics, which include materials such as geotextiles, geomembranes, geogrids, and geocells, are widely utilized in geotechnical engineering to perform functions such as reinforcement, separation, filtration, protection, and drainage. These materials have proven effective in improving the mechanical characteristics of weak soils, enhancing their load-bearing capacity, and ensuring structural stability. Their integration into civil engineering practices has gained substantial attention due to their efficiency in addressing soil performance challenges and facilitating sustainable construction solutions (Al-Subari et al., 2020).

Numerous studies have examined the behavior of geosynthetics using triaxial tests, emphasizing the influence of factors such as specimen size, confining pressure, reinforcement configuration, layer spacing, and mechanical properties like stiffness, friction, and tensile strength. These investigations consistently show that reinforced specimens demonstrate higher peak strength, reduced residual strength loss, decreased dilation, and improved cohesion (Uteпов et al., 2023). Benessalah et al. (2016) observed that incorporating geosynthetics in soils enhances shear strength and minimizes lateral deformation, with the degree of improvement depending on the number of reinforcement layers and confining pressure.

Abdelkader et al. (2016) highlighted the importance of sample preparation methods, as they substantially affect the compressive strength of specimens. Researchers have assessed the effects of reinforcement orientation and footing geometry on bearing capacity and settlement behavior. Lavasan and Ghazaviet (2012) noted that mobilized tensile forces within geosynthetics contribute to increased bearing capacity and reduced settlement, reinforcing their effectiveness as soil stabilizers.

The presented numerical simulation results depict the deformation patterns of weak soil under applied loading conditions, focusing on the zones with maximum settlement. The analysis compares two scenarios: without geogrid reinforcement and with geogrid reinforcement. The evaluation of the critical red zone, representing the area with the most significant settlement, provides a detailed understanding of the effectiveness of geosynthetic materials in reducing soil deformation.

In the initial scenario given in Fig. 4 without geogrid reinforcement, the maximum settlement reaches 0.05392 m, localized in the red zone directly beneath the applied load. The deformation pattern exhibits high concentration, with settlement intensity diminishing outward from the load application area. This concentrated settlement indicates inadequate load distribution, emphasizing the limited load-bearing capacity of the unreinforced soil. Such deformation could lead to structural instability, particularly in weak soils prone to excessive settlement under heavy loads.

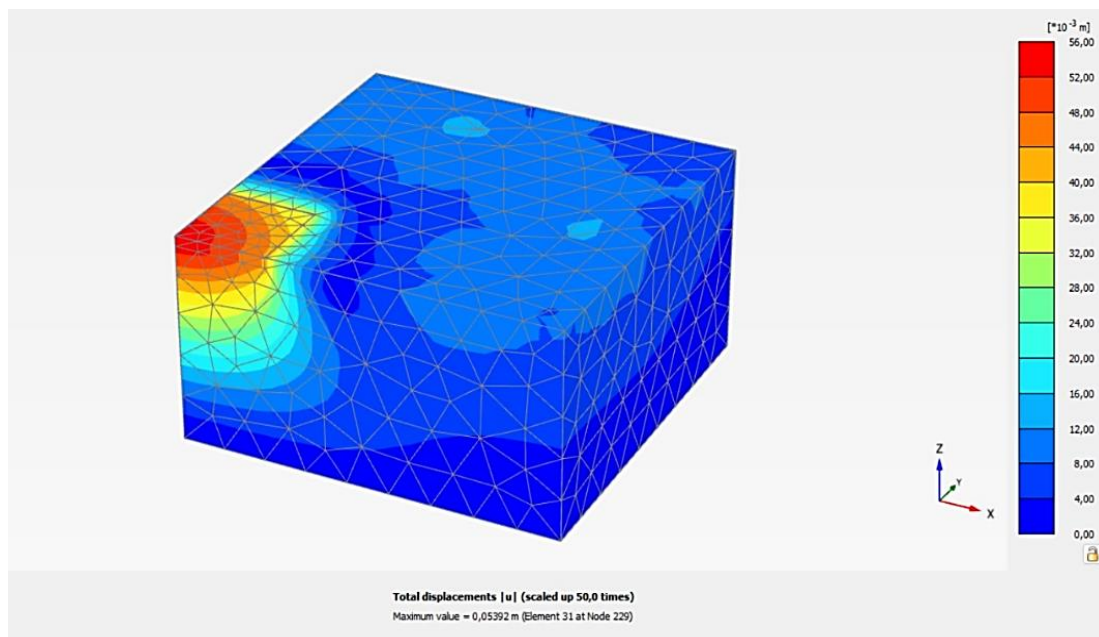


Figure 4. Total displacement analysis of the soil sample under applied loading conditions
Note – compiled by the authors

Conversely, in the second scenario given in Fig. 5, where geogrid reinforcement is applied, a significant reduction in settlement is observed. The maximum displacement in the critical red zone decreases to 0.01614 m, representing an approximate 70% reduction compared to the unreinforced condition. Additionally, the deformation pattern becomes more uniform, with the red zone significantly reduced in size and intensity. This improvement highlights the geogrid's ability to redistribute loads effectively across a broader area, mitigating localized stress concentrations and enhancing the soil's overall load-bearing capacity.

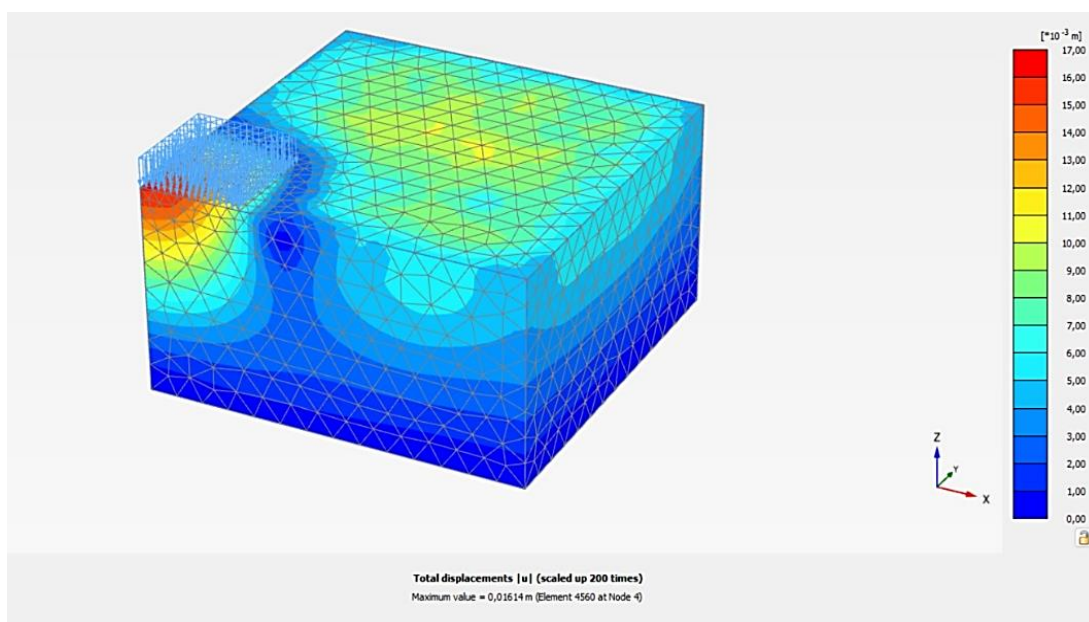


Figure 5. Total displacement analysis of the soil sample with geogrid reinforcement under applied loading conditions
Note – compiled by the authors



The comparative analysis underscores the substantial influence of geogrid reinforcement in mitigating excessive settlement in weak soils. The geogrid's inclusion improves load transfer mechanisms within the soil, resulting in a more stable deformation profile and reducing the risks of structural failures associated with excessive settlements. The findings align with existing research emphasizing the role of geosynthetic materials in soil stabilization and bearing capacity enhancement.

These results demonstrate that geogrid reinforcement effectively addresses settlement issues in weak soils, particularly in critical zones under high loading. The reduction in maximum settlement and the redistribution of deformation provides strong evidence for incorporating geosynthetics in foundation design to improve the performance and stability of soil-structure systems.

CONCLUSION

This study has provided a comprehensive investigation into the characteristics and behavior of weak soils, focusing on their mechanical performance and swelling potential under controlled laboratory conditions. Systematic analysis of soil samples revealed key factors influencing soil stability, including moisture content, compaction, and temperature variations, which are critical for understanding their engineering properties.

The integration of experimental data with numerical modeling and prior studies demonstrated that geosynthetics, particularly geogrids and geotextiles, significantly improve soil performance by enhancing cohesion, reducing settlement, and increasing load-bearing capacity. Numerical simulations confirmed that geogrid reinforcement can reduce settlement in critical zones by approximately 70%, ensuring more uniform load distribution. These results have clear practical significance for foundation engineering, road construction, slope stabilization, and infrastructure projects in regions where weak soils are prevalent, such as central and southern Kazakhstan. In particular, the findings are valuable for designing stable subgrades, mitigating frost-induced deformations in cold climates, and improving the reliability of structures built on collapsible loess and silty deposits.

At the same time, the research acknowledges certain limitations. The tests were conducted under controlled laboratory conditions, which may not fully replicate long-term field performance. Factors such as durability of geosynthetics under varying climatic conditions, chemical interactions with soil, and large-scale construction practices were beyond the scope of this study. Therefore, while the results provide strong evidence of the effectiveness of geosynthetics, their practical implementation should be adapted to site-specific conditions.

Future research should extend this framework by conducting field-scale experiments, evaluating additional geosynthetic types, and considering long-term environmental impacts. Such efforts will refine design guidelines and broaden the applicability of geosynthetics in geotechnical engineering.

In conclusion, this research underscores the critical role of geosynthetics in improving the mechanical characteristics of weak soils and offers practical recommendations for civil engineering projects. By highlighting both the benefits and limitations, the study contributes to the development of more resilient, sustainable, and cost-effective soil stabilization strategies for real-world applications.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.



STATEMENT ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: The authors confirm that no generative artificial intelligence technologies were used in the writing, editing, data analysis, or preparation of this manuscript. All content reflects original work conducted and composed by the authors.

REFERENCES

- Abdelkader, B., Ahmed, A., Belkhatir, M., & Shahrour, I. (2016). Laboratory study of geotextiles performance on reinforced sandy soil. *Journal of Earth Science*, 27(6), 106–107. <https://doi.org/10.1007/s12583-015-0621-0>
- Al-Subari, L., Hanafi, M., & Ekinici, A. (2020). Effect of geosynthetic reinforcement on the bearing capacity of strip footing on sandy soil. *SN Applied Sciences*, 2, 1484. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03261-5>
- ASTM International. (2020). ASTM D2487-17: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). U.S. Department of Defense, United States. <https://www.astm.org/d2487-17.html>
- Awwad, T., Shakhmov, Zh. A., Lukpanov, R. E., & Yenkebayev, S. B. (2018). Experimental study on the behavior of pile and soil at the frost condition. *Sustainability Issues for the Deep Foundations. Proceedings of the GeoMEast 2018 International Congress and Exhibition*. Cairo, Egypt.
- Benessalah, I., Arab, A., Villard, P., Merabet, K., & Bouferra, R. (2016). Shear strength response of a geotextile-reinforced Chlef sand: A laboratory study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(6), 1775–1790. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-9988-7>
- Das, B. M. (2024). *Principles of foundation engineering* (10th ed.). Cengage Learning.
- Gunaratne, M. (2014). *The Foundation Engineering Handbook* (2nd ed.). CRC Press.
- Tulebekova, A., Kusbergenova, Z., Dosmukhambetova, B., Bakirova, D., Tleulnova, G., & Zhumadilov, I. (2024). Effects of geogrid and non-woven geotextiles on the shear behavior of soil. *International Journal of GEOMATE*, 27(123), 75–82. <https://doi.org/10.21660/2024.123.4633>
- Rad, H. T., Jalali, F. M., Gheibi, M., Khaksar, R. Y., Annuk, A., & Moezzi, R. (2024). Enhancing Load-Bearing Capacity of Weak Soils Using Geosynthetics: A Finite Element Analysis. *Mining*, 4(4), 777–805. <https://doi.org/10.3390/mining4040044>
- Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2022). Evaluating the sustainability of soil improvement techniques in foundation substructures. *Journal of Cleaner Production*, 351. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131463>
- Shakhmov, Zh., Lukpanov, R., Tleulnova, G., Mineev, N., & Tulebekova, A. (2018). Comparison of experimental data of model piles in normal and seasonally freezing soil. *Proceedings of the 11th International Conference on Geosynthetics*. Seoul, Korea.
- Shakhmov, Zh., Tleubayeva, A., Smagulova, E., Utepbergenova, L., Togabayev, Y., & Bazarbayev, D. (2016). Analyzing of soil ground to frost heaving of structures. *Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference*. Astana, Kazakhstan.
- Teltayev, B., Zhussupbekov, A., Shakhmov, Zh., & Suppes, E. (2020). Field Experimental Investigations of Freezing and Thawing of Highway Subgrade. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions* (pp. 35–47). Singapore: Springer.
- Uteпов, Ye., Aniskin, A., Mkilima, T., Shakhmov, Zh., & Kozina, G. (2021). Potential Impact of Land-Use Changes on River Basin Hydraulic Parameters Subjected to Rapid Urbanization. *Tehnički vjesnik*, 28(5), 1519–1525. <https://doi.org/10.17559/TV-20200808134641>
- Uteпов, Ye., Tulebekova, A., Aldungarova, A., Mkilima, T., Zharassov, S., Shakhmov, Zh., Bazarbayev, D., Tolkyrbayev, T., & Kaliyeva Zh. (2022). Investigating the Influence of Initial Water pH on Concrete Strength Gain Using a Sensors and Sclerometric Test Combination. *Infrastructures*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/infrastructures7120159>



- Uteпов, Ye. B., Mkilima T., Aldungarova, A. K., Shakhmov, Zh. A., Akhazhanov, S. B., Saktaganova, N. A., Abdikerova, U. B., & Budikova, A. M. (2023). Delving into Earth Dam Dynamics: Exploring the Impact of Inner Impervious Core and Toe Drain Arrangement on Seepage and Factor of Safety during Rapid Drawdown Scenarios. *Infrastructures*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/infrastructures8100148>
- Yerzatova, M. Y., Mukhambetkaliev, K. K., Jumabayev, A., & Tlegenov, A. (2025). Enhancing the Load-Bearing Capacity and Stability of Weak Soils: An Evaluation of Soil Improvement Techniques. *ICRAAC 2024*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82938-3_1
- Байтова, А. А., & Жамбакина, З. М. (2021). Особенности инженерно-геологических свойств грунтов Казахстана. *Innovative Scientific Research: Network Publication*, 2-1(4), 188–196. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4567977>
- // Baitova, A. A., & Zhambakina, Z. M. (2021). Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh svoystv gruntov Kazakhstana [Features of engineering-geological properties of soils in Kazakhstan]. *Innovative Scientific Research: Network Publication*, 2-1(4), 188–196. (In Russ.)
- Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации. (2021). ГОСТ 12248.6-2020. Грунты. Методы определения набухания и усадки (ГОСТ 12248.6-2020). НИИОСП им. Н.М. Герсевича. // Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii Rossiyskoy Federatsii. (2021). GOST 12248.6-2020. Grunty. Metody opredeleniya nabukhaniya i usadki [Soils. Methods for determining swelling and shrinkage] (GOST 12248.6-2020). NIIOSP im. N. M. Gersevanova. (In Russ.)
- Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации. (2020). ГОСТ 12248.6-2020. Грунты. Метод определения характеристик набухания и усадки (ГОСТ 12248.6-2020). НИИОСП им. Н.М. Герсевича. // Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii Rossiyskoy Federatsii. (2020). GOST 12248.6-2020. Grunty. Metod opredeleniya kharakteristik nabukhaniya i usadki [Soils. Method for determining swelling and shrinkage characteristics] (GOST 12248.6-2020). NIIOSP im. N. M. Gersevanova. (In Russ.)
- Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации. (2013). ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний (ГОСТ 20522-2012). НИИОСП им. Н.М. Герсевича. // Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii Rossiyskoy Federatsii. (2013). GOST 20522-2012. Grunty. Metody statisticheskoy obrabotki rezul'tatov ispytaniy [Soils. Methods of statistical processing of test results] (GOST 20522-2012). NIIOSP im. N. M. Gersevanova. (In Russ.)
- Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации. (2020). ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация (ГОСТ 25100-2020). НИИОСП им. Н.М. Герсевича // Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii Rossiyskoy Federatsii. (2020). GOST 25100-2020. Grunty. Klassifikatsiya [Soils. Classification] (GOST 25100-2020). NIIOSP im. N. M. Gersevanova. (In Russ.).



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Шахмов Жанболат Ануарбекович – PhD, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Шахмов Жанболат Ануарбекович – PhD, доцент, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

Shakhmov Zhanbolat Anuarbekovich – PhD, Associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: shakhmov_zha@enu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1680-5287>,



Ерзатова Мерей Ерзатқызы – техника және технология бакалавры, Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан

Ерзатова Мерей Ерзатқызы – бакалавр техники и технологий, Назарбаев Университет, г. Астана, Казахстан

Yerzatova Merrey – Bachelor of Engineering and Technology, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan, e-mail: merrey.yerzatova@nu.edu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6995-1565>



Мұздыбаева Тымаркүл Құрбанқызы – PhD, аға оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

Муздыбаева Тымаркул Курбановна – PhD, старший преподаватель, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

Muzdybayeva Tymarkul Kurbanovna – PhD, Senior lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: muzdybayeva_tk@enu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1788-3156>,



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_361
FTAXP 67.13.69

ҚАТУ ТЕРЕҢДІГІНІҢ АВТОМОБИЛЬ ЖОЛЫНЫҢ ҚАБАТТАРЫНЫҢ ҚҰРАМЫНА ӘСЕРІ

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ НА СОСТАВ СЛОЕВ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

INFLUENCE OF FREEZING DEPTH ON THE COMPOSITION OF ROAD LAYERS

Ж.А. Шахмов , Г.Т.Тлеуленова ^{1*}, Қ.Н. Хафиз ¹, А.Н. Хафизов ¹

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

*Жауапты автор Тлеуленова Гульшат Толеувна, e-mail: gulshattleulnova7@gmail.com

Түйінді сөздер:

жол жамылғысы, жол
жөндеу, автомобиль
жолының қабаттарының
құрамы, топырақтың
қатуы.

ТҮЙІНДЕМЕ

Зерттеу тақырыбының өзектілігі автомобиль жолының қабаттарының құрамы мен топырақтың қату тереңдігі арасындағы айқын тәуелділіктің болуымен негізделеді. Бұл тәуелділік жол қозғалысы қауіпсіздігін қамтамасыз ету тұрғысынан маңызды мәнге ие. Аталған ғылыми зерттеудің мақсаты – автомобиль жолының төсемі астындағы топырақтың қату тереңдігінің оның құрылымдық қабаттарының құрамына әсер ету сипаты тұрғысынан осындай тәуелділікті теориялық және практикалық тұрғыда анықтау. Зерттеудегі жетекші әдістемелік ұстаным – жол құрылысы жүретін аймақтардағы топырақ қату тереңдігінің жол қабаттарының құрамына әсер ету мәселелерін жүйелі түрде талдау мен нақты өңірлердегі топырақтың қату ерекшеліктеріне аналитикалық зерттеу жүргізуді ұштастыру. Бұл ерекшеліктер көлік қозғалысы кезінде елеулі мәселелердің туындауына себеп болуы мүмкін.

Ключевые слова:

дорожная одежда,
дорожный ремонт, состав
слоёв автомобильной
дороги, промерзание
грунта.

АННОТАЦИЯ

Актуальность заявленной тематики научного исследования обуславливается наличием выраженной зависимости между глубиной промерзания грунта и составом слоёв автомобильной дороги, который имеет существенное значение с точки зрения соблюдения безопасности дорожного движения. Целью данного научного исследования является теоретическое и практическое определение подобной зависимости, в контексте характера влияния глубины промерзания грунта под полотном автомобильной дороги на конечный состав её слоёв. Ведущим подходом в данной научно-исследовательской работе выступает сочетание системного анализа проблем влияния глубины промерзания грунта в местах строительства автомобильной дороги на состав её слоёв, с аналитическим исследованием особенностей промерзания грунта в определённых регионах, способных стать причиной возникновения существенных проблем при движении автомобильного транспорта.



Keywords:

road clothing, road repairs, composition of the layers of the roadway, freezing of the soil.

ABSTRACT

The relevance of the study is conditioned by the presence of a pronounced relationship between the depth of soil freezing and the composition of the road layers, which is essential from the standpoint of road safety compliance. The purpose of this study lies in the theoretical and practical identification of such a correlation in terms of the influence of the soil freezing depth under the roadbed on the final composition of its layers. The leading approach in this study is a combination of a system analysis of the problems of the soil freezing depth influence in places where a highway is being built on the composition of its layers, with an analytical study of the features of soil freezing in certain regions that can cause significant problems when moving motor transport.

КІРІСПЕ

Соңғы жылдары қозғалыстың заманауи талаптарына сәйкес келмейтін техникалық сипаттамалары бар автомобиль жолдарын реконструкциялау және күрделі жөндеу жұмыстарына ерекше назар аударылуда. XX ғасырда салынған жолдардың едәуір бөлігі көлік құралдарының осьтік жүктемесі 60 кН-нан аспайтын жағдайға есептеліп жобаланған болатын. Алайда климаттық жағдайлары қатал өңірлерде төмен температураның әсерінен пайда болатын бүртіктену (топырақтың көтерілуі) құбылысы салдарынан жол жамылғыларының қарқынды бұзылуы жиі кездесуде. Бұл мәселе жол төсемдерінің беріктігі мен ұзақ мерзімділігіне теріс әсер етіп, оларды қазіргі көлік ағынына бейімдеуді қажет етеді (Li et al., 2021). Көлік жүрісі қарқынды жолдарда деформациялық үдерістердің кеңінен таралуы мен динамикасының артуы қазіргі таңда өзекті мәселе ретінде қарастырылуда. Бұл құбылыс жол конструкцияларының, әсіресе сазды топырақтардан тұратын негіздердің, қозғалыстағы дөңгелек жүктемелердің динамикалық әсерін сенімді қабылдау қабілетінің жеткіліксіздігін айғақтайды. Жол төсеніштері мен олардың негіздеріндегі серпімділік сипаттамаларының төмендігі салдарынан әртүрлі функционалдық мақсаттағы автомобиль жолдарының жамылғыларында орнықты деформациялар туындайды. Сонымен қатар, маусымдық температуралық ауытқулар әсерінен, әсіресе топырақ негіздері тоңданатын аймақтарда, көктем-күз мезгілдерінде және жоғары жылдамдықтағы көлік құралдарының тербелмелі динамикалық жүктемесі жағдайында жол конструкцияларының жұмыс істеу қабілеті күрт төмендейді. Мұндай жағдайлар жол жамылғыларын уақытынан бұрын бұзып, олардың сенімділігі мен пайдалану ұзақтығына теріс әсер етеді. Осыған байланысты, жол құрылымдарын конструктивтік тұрғыда күшейту қажеттілігі туындайды. Бұл ретте тиімді техникалық шешімдерді таңдау барысында материалдық және еңбек ресурстарын оңтайлы пайдалану, яғни шығындарды барынша азайту – маңызды аспект ретінде қарастырылуы тиіс (Chen et al., 2021).

Автомобиль жолдарының жамылғысында деформациялық үдерістер олардың бүкіл пайдалану мерзімі бойында байқалады. Жол төсеміне әсер ететін сыртқы факторлардың біркелкі болмауы, сондай-ақ құрылыс жұмыстары жүргізілген учаскелерде топырақтың маусымдық тоңдануы — жол жамылғысында әртүрлі ақаулар мен зақымданулардың пайда болуына әкелетін негізгі себептердің бірі болып табылады. Бұл зақымдар уақыт өте келе жол жамылғысының бүлінген бөліктерін қалпына келтіруге айтарлықтай материалдық және уақыттық ресурстарды талап етеді. Сонымен қатар, жол төсемінің қызмет ету талаптарының бұзылуы да елеулі әсер етеді. Атап айтқанда, автомобиль жолдарын салу кезінде нақты климаттық жағдайларда қолдануға жол берілмейтін құрылыс материалдарының пайдаланылуы жол жамылғысының мерзімінен бұрын бүлінуіне себеп болады. (Zhang et al., 2018). Аталған факторлар факторлар жиынтығы



автомобиль жолдарының төсемі салынатын учаскелердегі топырақтың маусымдық тоңдануының жол қабатының құрамы мен құрылымына әсерін және соның салдарынан жол жамылғысының зақымдану ықтималдығын жан-жақты зерттеудің өзектілігін айқындайды. Бұл, өз кезегінде, кейінгі кезеңде жол жамылғысын жөндеу қажеттілігін туындатады.

Құрылымдық тұрақтылығы төмен топырақтар сыртқы әсерлерге аса сезімтал болып табылады және мұндай әсерлер олардың зақымдануына себеп болуы мүмкін. Әлсіз топырақтардың тұрақтану үдерісі ұзақ уақытты талап етеді. Сонымен қатар, топырақтан бөлінетін ылғалдың тепе-теңдігін сақтау — автомобиль жолының қабаттарының кейінгі кезеңде тұрақты күйде болуы тұрғысынан маңызды факторлардың бірі болып саналады. (Sangiorgi et al, 2018). Көптеген ғылыми зерттеулер метеорологиялық жауын-шашындардың әсерін, сондай-ақ олардың топырақтың қату тереңдігімен үйлесімін автомобиль жолдарының қабаттарының жай-күйіне ұзақ мерзімді пайдалану кезеңінде тигізетін ықпалын анықтауға бағытталған. Әсіресе, су тасқындары, табиғи апаттар мен жауын-шашынның көп мөлшерде түсуі кезіндегі жол қабаттарының жай-күйін зерттеуге ерекше назар аударылуы тиіс. Себебі, топырақтың қатуынан бөлек, бұл факторлардың барлығы жол жамылғысына кері әсерін тигізіп, автомобиль жолдарын мәжбүрлі түрде жөндеу қажеттілігіне алып келуі мүмкін.

Автомобиль жолдары орналасқан учаскелерде топырақтардың шамадан тыс ылғалдануына жол беруге болмайды. Мұндай жағдайлардың алдын алу мақсатында арнайы инженерлік-техникалық шаралар кешенін жүргізу қажеттілігі туындайды. Топырақтың ылғалдануы мен оның маусымдық тоңдануының үйлесуі жол қабаттары арасындағы байланыс күштерінің әлсіреуіне алып келеді. Бұл өз кезегінде жол жамылғысының маусымдық бұзылуына және оның пайдалану жарамдылығын жоғалтуына себеп болуы мүмкін (Haze, Hunger & Hesitation 2020). Топырақтың қазіргі жай-күйіне практикалық талдау жүргізу, оның маусымдық тоңдануымен қатар жоғарыда аталған беріктігінің әлсіреу себептерімен байланыста деформациялардың даму мүмкіндігін болжау тұрғысынан, автомобиль жолдарының қабаттарын жобалаушылар үшін де, жол жөндеу және құрылыс қызметі өкілдері үшін де маңызды ғылыми-практикалық қызығушылық тудырады. Себебі бұл мамандар өз қызметі барысында маусымдық табиғи құбылыстар салдарынан бүлінген жол төсемі учаскелерін қайта қалпына келтіру бойынша жөндеу жұмыстарын жүйелі түрде орындауға мәжбүр болады. Осы тұрғыда топырақтың қату тереңдігінің автомобиль жолының қабаттарының жай-күйіне әсер ету дәрежесін анықтау жол жамылғысының беріктігі мен оның ұзақ мерзімді пайдалану мүмкіндігін қамтамасыз ететін барлық факторларды кешенді түрде ескерумен жүзеге асырылуы тиіс.

Зерттеу жұмыстары барысында автомобиль жолдары құрылысындағы топырақтың қату тереңдігінің оның қабаттарының құрамына әсерін бағалау мәселелерін жүйелі талдау әдістері мен белгілі бір аймақтарда топырақтың тоңдану ерекшеліктерін аналитикалық тұрғыда зерттеу әдістерінің үйлесімі қолданылды. Мұндай әдістердің үйлесімі автомобиль көлігінің қозғалысына кедергі келтіруі мүмкін маңызды проблемалардың алдын алу үшін аймақтық ерекшеліктерді ескеруге мүмкіндік береді. Таңдалған әдістемелік тәсіл зерттеу тақырыбы бойынша проблемаларды сапалы түрде талдауға және ғылыми жұмыстың тұтас мазмұндық құрылымын қалыптастыруға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде объективті нәтижелер алуға және олар негізінде ғылыми тұжырымдар жасауға жағдай жасайды. Жалпы алғанда, зерттеу әдістемесі теориялық және практикалық зерттеулерді үйлестіре отырып, алынған нәтижелер негізінде статистикалық деректерді ұсыну арқылы зерттеліп отырған ғылыми мәселенің шынайы және ғылыми тұрғыдан дәйекті бейнесін қалыптастыруға бағытталған. Зерттеу жұмысының теориялық негізі ретінде автомобиль



жолдарының қабаттарының құрамына қату тереңдігінің әсерін бағалауға қатысты отандық және шетелдік зерттеушілердің еңбектері алынды. Зерттеудің әдіснамалық негізі зерттеу барысында қарастырылған мәселелерге толық сәйкес келетін және оларды жан-жақты әрі сапалы түрде шешуге бағытталған тәсілдер жүйесінен тұрады. Бұл әдістемелік тәсілдер жиынтығы зерттеу нысанын кешенді түрде талдауға және ғылыми тұрғыда негізделген нәтижелер мен қорытындылар алуға мүмкіндік береді.

Зерттеу жұмысы келесі кезеңдер бойынша жүргізілді:

1. Зерттеудің алғашқы кезеңінде автомобиль жолының қабаттарының құрамына топырақтың қату тереңдігінің әсеріне қатысты отандық және шетелдік авторлардың ғылыми еңбектеріне жүйелі теориялық талдау жүргізілді. Қарастырылып отырған мәселелерге жүйелі талдау жасау қазіргі заманғы зерттеушілердің ұстанымдарын айқындауға және зерттеу тақырыбының мазмұнын ашуда маңызы бар негізгі аспектілерді одан әрі талдауға қажетті тұтас ғылыми база қалыптастыруға мүмкіндік береді.

2. Зерттеудің екінші кезеңінде белгілі бір өңірлердегі топырақтың тоңдану ерекшеліктеріне аналитикалық зерттеу жүргізілді. Бұл өңірлердегі тоңдану құбылыстары автомобиль көлігінің қозғалысына айтарлықтай кедергі келтіретін маңызды факторлардың бірі болуы мүмкін. Аталған талдау ғылыми-зерттеу жұмысының алдын ала нәтижелерін айқындауға және оларды осы мәселе бойынша теориялық әрі практикалық тұрғыда зерттеу жүргізген авторлардың ғылыми тұжырымдарымен салыстыруға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде зерттеу тақырыбы аясында қарастырылған барлық мәселелерді кешенді түрде зерделеуге жағдай жасайды.

3. Ғылыми-зерттеу жұмысының соңғы кезеңінде зерттеу барысында алынған нәтижелер негізінде түпкілікті қорытындылар қалыптастырылды. Жалпы алғанда, осы ғылыми зерттеудің қорытындылары ұсынылған тақырып шеңберінде жүргізілген теориялық және практикалық ізденістердің нәтижелерін жинақтай отырып, зерттеу мәселесін жан-жақты талдауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бұл ғылыми-зерттеу жұмысының нәтижелері мен тұжырымдары автомобиль жолдарын жөндеу жүргізілетін аймақтардағы экологиялық жағдайды жақсарту тұрғысынан алғанда да елеулі практикалық маңызға ие.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Топырағы тоңданатын аймақтарда инженерлік құрылыстарды салу және автомобиль жолдарын төсеу топырақтың қату тереңдігін зерттеу және оны жол төсемінің негізінде азайтуға бағытталған арнайы шараларды жүзеге асыруды қажет етеді. Мұндай шаралар автомобиль жолының қабаттарын нығайтуға және дөңгелекті көлік құралдарының қозғалысы әсерінен жол төсемінің тозуға төзімділігін қамтамасыз етуге қажетті жағдайлар жасауға бағытталады. Егер автомобиль жолы төселетін учаскелерде топырақтың қату тереңдігі айтарлықтай болса, жол қабаттарының бұзылуын болдырмау мақсатында гранулданған көбік-шыны-керамиканы пайдалана отырып, жылу оқшаулағыш қабат төсеу ұсынылады. Зерттеуде пайдаланылған материалдың сыртқы құрылымдық ерекшеліктері 1-суретте бейнеленген.

Көбікті шыныкерамика топырақты маусымдық тоңазудан қорғау құралы ретінде пайдалануға мүмкіндік беретін бірқатар қасиеттерге ие. Бұл материал негізінде жасалатын жылу оқшаулағыш қабат автомобиль жолының төсемі орналасқан жерлерде топырақтың тоңазуын сенімді түрде болдырмай, жол қабаттарының бұзылу ықтималдығын азайтады.



1-сурет. Гранулданған шыныкерамиканың сыртқы келбеті

Ескертпе: авторлар құрастырған (Шахмов Ж.А. и Хафиз Қ.Н.)

1-кестеде Қазақстанның әртүрлі аймақтарындағы (Солтүстік Қазақстан, Оңтүстік Қазақстан, Батыс Қазақстан, Шығыс Қазақстан) ірі қалалар бойынша топырақтың қату тереңдігі мен аяздық ісіну тереңдігіне қатысты деректер келтірілген.

1-кесте. Қазақстанның ірі қалаларындағы топырақтың қату тереңдігі мен аяздық ісіну тереңдігі.

Қала атауы	Топырақтың қату тереңдігі, м (нормативтік құжаттарға сәйкес)	Топырақтың нормативтік қату тереңдігі, м (формула бойынша есептелген)	Топырақтың аяздық көтерілу тереңдігі, м
Солтүстік Қазақстан			
Астана	2,22	2,73	2,21
Павлодар	2,44	2,75	2,29
Оңтүстік Қазақстан			
Алматы	1,01	1,36	1,17
Шымкент	0,69	0,43	0,28
Батыс Қазақстан			
Атырау	1,32	1,71	1,47
Орал	1,82	2,31	1,89
Шығыс Қазақстан			
Семей	2,28	2,43	2,16
Өскемен	2,32	2,64	2,23

Ескерту: кесте мәліметтері ҚР нормативтік құжаты – «Жол конструкцияларының су-жылу режимінің есептік мәндерін анықтау жөніндегі ұсынымдар» (Қазақстан Республикасының Индустрия және инфрақұрылымдық даму министрлігі Автомобиль жолдары комитеті төрағасының 2018 жылғы 21 желтоқсандағы №124 бұйрығы) негізінде автор тарапынан құрастырылған.



1-кестеде ұсынылған топырақтың қату тереңдігіне қатысты мәліметтер Қазақстан Республикасының ресми нормативтік құжаты – «Автомобиль жолдарының климаттық аймақтарына байланысты жол жамылғылары мен жер төсемесінің су-жылу режимінің сипаттамалық көрсеткіштерінің есептік мәндері бойынша ұсынымдар» (ҚР ИИДМ Автомобиль жолдары комитеті төрағасының 2018 жылғы 21 желтоқсандағы № 124 бұйрығы) негізінде алынған. 1-кестеде көрсетілген топырақтың қату тереңдігі автомобиль жолының құрылымына сәйкес жағдайларда анықталған, мұнда қар жамылғысы жол төсемесінде жоқ деп есептелген, бұл жолды пайдалану кезінде жүргізілетін техникалық қызмет көрсету шараларына байланысты.

Топырақтың нормативтік қату тереңдігі бойынша мәліметтер есептеу жүргізу арқылы алынған.

Топырақтың нормативтік қату тереңдігін (d_{fn}) келесі формула бойынша анықтау қажет (1):

$$d_{fn} = d_0 \sqrt{M_t} \quad (1)$$

мұндағы: d_{fn} – топырақтың нормативтік қату тереңдігі, м;

d_0 – ірі сынықты топырақтар үшін шамасы 0,34 м-ге тең деп қабылданады;

M_t – өлшемсіз коэффициент, осы аймақтағы қыс мезгіліндегі бір айдағы төмен температуралардың абсолюттік мәндерінің қосындысына сандық жағынан тең.

Астана: коэффициент $M_t = 64,4$

$$d_{fn} = 0,34 \sqrt{64,4} = 0,34 \cdot 8,025 = 2,73 \text{ м}$$

Павлодар: коэффициент $M_t = 65,7$

$$d_{fn} = 0,34 \sqrt{65,7} = 0,34 \cdot 8,105 = 2,75 \text{ м}$$

Алматы: коэффициент $M_t = 16,1$

$$d_{fn} = 0,34 \sqrt{16,1} = 0,34 \cdot 4,012 = 1,36 \text{ м}$$

Шымкент: коэффициент $M_t = 1,6$

$$d_{fn} = 0,34 \sqrt{1,6} = 0,34 \cdot 1,265 = 0,43 \text{ м}$$

Атырау: коэффициент $M_t = 25,4$

$$d_{fn} = 0,34 \sqrt{25,4} = 0,34 \cdot 5,04 = 1,71 \text{ м}$$

Орал: коэффициент $M_t = 46,1$

$$d_{fn} = 0,34 \sqrt{46,1} = 0,34 \cdot 6,79 = 2,31 \text{ м}$$

Семей: коэффициент $M_t = 51,1$

$$d_{fn} = 0,34 \sqrt{51,1} = 0,34 \cdot 7,15 = 2,43 \text{ м}$$

Өскемен: коэффициент $M_t = 60,2$

$$d_{fn} = 0,34 \sqrt{60,2} = 0,34 \cdot 7,76 = 2,64 \text{ м.}$$

1-кестеде келтірілген топырақтың қатты тоңдану тереңдігі бойынша деректер есептеу әдісімен алынған.

Топырақтың аяздық ісіну тереңдігі (h) келесі формула бойынша анықталады, м (2):

$$h = \frac{K \cdot \sqrt{T}}{\lambda} \quad (2)$$



мұндағы: h – аяздық ісіну тереңдігі (м);

K – коэффициент, 1,3 көрсеткішке тең ірі сынықты топырақтар үшін (жылуөткізгіштік жағдайының коэффициенті);

T – қысқы кезеңнің орташа температурасы;

λ – топырақтың жылу өткізгіштік коэффициенті. 2,2 көрсеткішке тең ылғалды ірі сынықты топырақ үшін.

Астана: қысқы кезеңнің орташа температурасы $T = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h = \frac{1,3 \cdot \sqrt{14}}{2,2} = \frac{4,862}{2,2} = 2,21\text{ м}$$

Павлодар: қысқы кезеңнің орташа температурасы $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h = \frac{1,3 \cdot \sqrt{15}}{2,2} = \frac{5,035}{2,2} = 2,29\text{ м}$$

Алматы: қысқы кезеңнің орташа температурасы $T = 3,93\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h = \frac{1,3 \cdot \sqrt{3,93}}{2,2} = \frac{2,576}{2,2} = 1,17\text{ м}$$

Шымкент: қысқы кезеңнің орташа температурасы $T = 0,23\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h = \frac{1,3 \cdot \sqrt{0,23}}{2,2} = \frac{0,623}{2,2} = 0,28\text{ м}$$

Атырау: қысқы кезеңнің орташа температурасы $T = 6,23\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h = \frac{1,3 \cdot \sqrt{6,23}}{2,2} = \frac{3,243}{2,2} = 1,47\text{ м}$$

Орал: қысқы кезеңнің орташа температурасы $T = 10,26\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h = \frac{1,3 \cdot \sqrt{14}}{2,2} = \frac{4,16}{2,2} = 1,89\text{ м}$$

Семей: қысқы кезеңнің орташа температурасы $T = 13,4\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h = \frac{1,3 \cdot \sqrt{13,4}}{2,2} = \frac{4,758}{2,2} = 2,16\text{ м}$$

Өскемен: қысқы кезеңнің орташа температурасы $T = 14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h = \frac{1,3 \cdot \sqrt{14,3}}{2,2} = \frac{4,915}{2,2} = 2,23\text{ м}$$

2-суретте Қазақстанның әртүрлі өңірлеріндегі (Солтүстік Қазақстан, Оңтүстік Қазақстан, Батыс Қазақстан, Шығыс Қазақстан) ірі қалалар бойынша топырақтың қату тереңдігі мен тоңдану ісіну тереңдігінің графикалық бейнесі көрсетілген. Мәліметтер қисық сызық түрінде ұсынылған.

Ұсынылған графикте Қазақстанның әртүрлі ірі қалалары үшін топырақтың қату тереңдігі мен тоңдану ісіну тереңдігінің мәндері көрсетілген. Көк түсті сызық топырақтың қату тереңдігін нормативтік құжаттар негізінде бейнелейді, ал тоқсары түсті сызық – формула бойынша есептелген нормативтік қату тереңдігін сипаттайды. Сұр түсті сызық топырақтың тоңдану ісіну тереңдігін көрсетеді.



2-сурет. Қазақстанның әртүрлі ірі қалаларындағы топырақтың қату тереңдігі мен тоңдану ісіну тереңдігі

Ескерту: мәліметтер Қазақстанның әртүрлі өңірлеріндегі ірі қалалар бойынша топырақтың қатуы мен тоңдану ісінуі туралы деректер негізінде авторлар тарапынан құрастырылған.

Графикті талдау нәтижесінде қату тереңдігінің өңірдің географиялық орналасуына байланысты айтарлықтай айырмашылықтары бар екені анықталды. Ең жоғары мәндер Павлодар, Өскемен және Семей сияқты солтүстік және шығыс қалаларда байқалады, мұнда топырақтың қату тереңдігі 2,5–3,0 метрге дейін жетеді. Ал Алматы мен Шымкент сияқты оңтүстік қалаларда бұл көрсеткіш едәуір төмен – 0,5–1,0 метр шамасында, бұл жағдай аталмыш өңірлердегі климаттың жұмсақтығымен түсіндіріледі. Қату тереңдігінің екі нұсқасын салыстыру нәтижесінде формула бойынша есептелген мәндер (тоқсары сызық) көбінесе нормативтік құжаттардан алынған мәндерден (көк сызық) жоғары екені байқалады. Айқын түрде көрініп тұрған айырмашылық Павлодар және Атырау қалаларында тіркелген, бұл жағдай топырақтың жылу балансының ерекшеліктерімен және есептеу әдістемесінің өзгешеліктерімен түсіндірілуі мүмкін.

Топырақтың физикалық-механикалық қасиеттері әртүрлі мұздану-еру режимдерінде зертханалық жағдайда сынақтан өткізілді. Сынақ барысында топырақ үлгілері бірнеше цикл бойынша қату (–10...–15 °C) және еру (+18...+20 °C) температуралық режиміне ұшыратылды. Бұл режимдер топырақтың табиғи жағдайда бастан кешетін маусымдық өзгерістерін имитациялау мақсатында таңдалды. Әрбір қату-еру циклі шамамен 48 сағатқа созылып, үлгілердің физикалық-механикалық қасиеттерінің динамикасы бақыланды. Нәтижесінде топырақ құрылымындағы өзгерістер, ылғалдылық деңгейінің ауытқуы, сондай-ақ тығыздық пен беріктік көрсеткіштерінің төмендеуі тіркелді. Әр цикл аяқталған соң топырақтың беріктік көрсеткіші, деформация модулі және суға қанығу деңгейі анықталды.

Зерттеу нәтижелері бойынша, бірінші қату-еру циклынан кейін топырақтың беріктік көрсеткіші бастапқы мәнімен салыстырғанда шамамен 8-12 % төмендегені байқалды. Деформация модулі орта есеппен 10-15 % кеміді. Екінші және үшінші циклдардан кейін бұл өзгерістердің қарқыны күшейіп, тиісінше беріктік шамасы 20-25 %, ал деформация модулі 25-30 % төмендеді. Сонымен қатар, төмен температура жағдайында топырақтың суға қанығу деңгейі біртіндеп артқаны анықталды, бұл мұз түзілу процесінің белсенділігін көрсетеді.

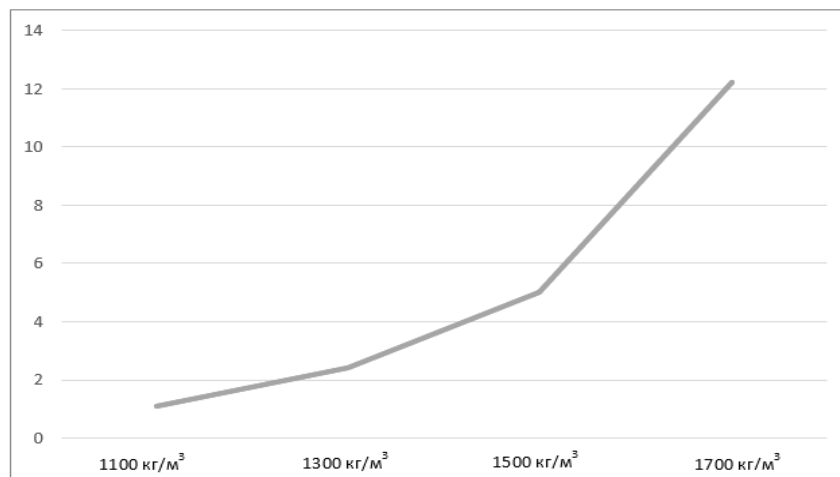


Жалпы алғанда, мұздану-еру режимдерінің қайталануы топырақ құрылымының тұрақтылығын әлсіретіп, оның физика-механикалық қасиеттерін едәуір нашарлататыны дәлелденді. Бұл құбылыс автомобиль жолдарының тоң аймақтарындағы пайдалану сенімділігіне тікелей әсер ететіндігі анықталды.

Топырақтың маусымдық қату тереңдігі автомобиль жолының қабаттарының жалпы күйіне айтарлықтай әсер етеді. Топырақтың қату тереңдігі жоғары аймақтарда жол конструкциясының астындағы көтерілулер рұқсат етілген шектен аспауы тиіс. Бұл талапты қамтамасыз ету мақсатында тоңданудан қорғайтын қабаттар төселеді. Олар кондициялық құмнан, құм-қиыршықтас қоспасынан, шағалдан, беріктендірілген топырақтардан және басқа да тоңдануға төзімді материалдардан тұрады. Автомобиль жолдарының төмен үйінділер мен ойпаң жерлер арқылы өтетін учаскелерінде, жер асты суларының деңгейі жоғары болған жағдайда, тоңданудан қорғайтын қабаттың қалыңдығы 1 метрге дейін және одан да көп болуы мүмкін. Мұндай жағдайларда жол жамылғысының тоңданудан қорғайтын қабатын жасау үшін қажетті кондициялық құм мен материалдардың жеткілікті мөлшерін қамтамасыз ету қиынға соғады. Осыған байланысты, пеношыны керамикасынан жасалған жылуоқшаулағыш қабатты қолдану тоңданудан қорғайтын қабаттың қалыңдығын айтарлықтай азайтуға немесе оны мүлдем қолданбауға мүмкіндік береді.

Дренаждық құм қабаты жол жамылғысы қабаттарынан және оның астындағы топырақтардан суды әкетуге мүмкіндік береді. Оның қалыңдығы нақты жол учаскесіндегі қолайсыз геологиялық-гидрологиялық жағдайларда, сондай-ақ күрделі санаттағы жолдарды салу кезінде едәуір мәнге жетуі мүмкін. Сүзу коэффициенті тәулігіне кемінде 2 метр болатын құмның жеткілікті көлемін құрылысқа жеткізу көп жағдайда күрделі міндет болып табылады. Жол жамылғысы қабаттарының астындағы топырақтың қатуын болдырмайтын пеношыны керамикасынан жасалған жылуоқшаулағыш қабатты қолдану дренаждық қабаттың қалыңдығын (20-25 см-ге дейін) азайтуға мүмкіндік береді. Өйткені бұл жағдайда дренаждық қабатқа судың түсуінің негізгі көзі жойылады. Топырақ қатпаған жағдайда оның тоңдану салдарынан ісінуі және көктемгі еріген кезде шөгуі, соның нәтижесінде дренаж қабатына су ағуы орын алмайды.

3-суретте топырақтың қату тереңдігіне байланысты автомобиль жолы қабаттарының жай-күйінің графикалық тәуелділігі көрсетілген. Мәліметтер қисық сызық түрінде ұсынылған.



3-сурет. Қазақстан Республикасы топырақтың қату тереңдігіне байланысты автомобиль жолы қабаттарының тығыздығының тәуелділігі

Ескерту: мәліметтер Қазақстанның түрлі өңірлеріндегі ірі қалалардағы топырақтың қатуы мен тоңдану ісінуі бойынша деректер негізінде авторлармен құрастырылған



3-суретте ұсынылған деректерден көрініп тұрғандай, Қазақстан Республикасы аумағындағы автомобиль жолдарында топырақтың қатуы кезінде жол жамылғысы қабаттарының тығыздығының жүйелі түрде артуы байқалады. Алайда бұл құбылыс уақытша сипатқа ие, себебі топырақ қатқан күйден шыққаннан кейін оның тығыздық көрсеткіштері бастапқы мәндеріне қайта оралады. Сонымен қатар, жол төсенішін салу барысында топырақтың қату тереңдігі артқан сайын жол қабаттарының тығыздалу көрсеткіштерінің күрт жоғарылайтыны атап өту керек. Мұндай жағдай Қазақстан Республикасы үшін тән құбылыс, себебі ел аумағында топырақ эрозиясы кең таралған мәселелердің бірі болып табылады. Бүгінгі таңда еліміздің топырақ жамылғысының төрттен бір бөлігіне жуығы жел эрозиясына ұшыраған, бұл өз кезегінде топырақтың қату тереңдігі кезінде автомобиль жолы қабаттарының тығыздалу параметрлерінің едәуір артуына жанама себеп болып табылады. Автомобиль жолының төсемі орналасқан учаскелерде топырақтың қатуы кезінде тығыздық көрсеткіштері айтарлықтай артады, себебі эрозияға ұшыраған үстіңгі қабаттарға қарағанда, төменгі қабаттар тығыз болады.

Топырақ маусымдық түрде қататын аймақтарда автомобиль жолы учаскелерінде тоңданудан қорғайтын қабаттарды орнату қажет. Жылуоқшаулағыш материалдардан, соның ішінде пенопласт немесе пеношыны керамикасынан тұратын жұқа қабаттар, жол жамылғысының қалыңдығы мен құрылымдық параметрлерін сақтай отырып, тиімді шешім қабылдауға мүмкіндік береді. Бұл ретте автомобиль жолы қабаттарының құрамы айтарлықтай өзгерістерге ұшырамайды. Осындай материалдардың ішінде гранулданған пеношыны керамикасы ерекше назар аудартады. Ол жоғары жылу оқшаулау коэффициентіне ($\lambda \approx 0,09-0,12$ Вт/м·К), жеңіл салмақтылығына, өрт қауіпсіздігіне және химиялық тұрақтылығына байланысты жол құрылымында кеңінен қолданылуы мүмкін. Сонымен қатар, оның ұзақ мерзімділігі климаттық жағдайға тәуелді: тұрақты аймақтарда қызмет ету мерзімі 30-50 жылға жетсе, ылғалды ортада жылу оқшаулау қасиеті уақыт өте келе төмендеуі ықтимал. Экономикалық тұрғыдан алғанда да материалдың тиімділігі әртүрлі климаттық аймақтарда әрқалай бағаланады – суық климатта жылу шығынын азайту арқылы үнемділік жоғары болса, ылғалды аймақтарда қосымша гидрооқшаулау шығынын талап етеді.

Автомобиль жолының қатқан учаскелерімен көлік қозғалысы кезінде жол жамылғысы қабаттарының құрамында айтарлықтай өзгерістер орын алады. Мұндай жағдайда жол төсеміне түсетін жоғары жүктемелер кезінде қату аймақтарында жол конструкциясының бұзылу ықтималдығы едәуір артады. Сонымен қатар, жел эрозиясының әсерінен топырақтың үстіңгі қабатының бұзылуы жағдайды одан әрі қиындата түседі. Аталған жағдай автомобиль жолының жамылғы қабаттарында құрылымдық өзгерістердің туындауына себеп болады. Бұл өзгерістер келесі негізгі үрдістермен сипатталады:

- жекелеген учаскелерде үгітілу ықтималдығы жоғары болатын беткі қорғаныс қабатының тозу қарқынының артуы;
- жол жамылғысының үстіңгі қабаттарында жарықтардың пайда болуы;
- топырақ жамылғысының эрозиясы орын алатын аймақтарда үстіңгі қабаттардың қарқынды тозуы;
- төменгі конструктивтік қабаттардың шөгуді.

Бұл өзгерістердің қарқындылығы жол төсемі орналасқан учаскелердегі топырақтың маусымдық қату тереңдігі артқан сайын күшейе түседі. Жалпы алғанда, Қазақстан аумағындағы автомобиль жолы конструкцияларының деформациясы (жол жабындысы тегістігінің төмендеуі және үйінділердің тығыздығының азаюы) – маусымдық қату құбылысы тән барлық жол-климаттық аймақтар үшін тән мәселелердің бірі болып табылады. Төмен температураның әсерінен туындайтын тоңдану ісінуі салдарынан көлік



инфрақұрылымы элементтерінің бұзылуы жөндеу жұмыстарын жүргізуді күрделендіреді және жолдарды ұстауға кететін шығындардың артуына алып келеді. Осыған байланысты, жол төсенішінің тоңдану ісінуі әсерінен бұзылуын болдырмау қазіргі Қазақстан Республикасының аумағының 90 %-ы үшін өзекті мәселе болып табылады.

Қазақстан аумағындағы автомобиль жолы қабаттары үшін айрықша қауіп туындататын факторлардың бірі – көктайғақ пен мұздану құбылыстары. Олар көлік қозғалысына кедергі келтірумен қатар, жол төсенішінің конструктивтік қабаттарының техникалық жағдайына кері әсер етеді. (Muthu & Santhanam, 2018). Мұздану құбылыстары кең таралған аймақтар – мәңгі тоңды топырақтар таралған аумақтар болғанымен, олар маусымдық қату тереңдігі жоғары өңірлер үшін де тән. Мұздану алаңдарының көлемі ондаған-жүздеген шаршы метрден бастап, жүздеген шаршы километрге дейін және одан да көп аумақты қамтуы мүмкін. Жол төсенішінде жылу оқшаулағыш материалдар қабаттарын орналастыру арқылы мұзданудың таралуына қарсы күрес жүргізу екі негізгі мәселені шешуге мүмкіндік береді: мұз қабаты ерігеннен кейін туындайтын салдарлардан қорғау және топырақтағы судың қатуын болдырмау. 2-кестеде топырақтың 3 метр тереңдікке дейін қатуы жағдайында жол төсеніші учаскесінің техникалық күйін бағалауға бағытталған эксперименттік зерттеу нәтижелерінің негізгі параметрлері келтірілген.

2-кесте. Қазақстан Республикасы автомобиль жолдары жағдайында топырақтың 3 метрге дейін қатуы кезінде жол төсенішін зерттеудің параметрлері

Сынақ жүргізу уақыты, сағат	Температура кезіндегі сығу беріктігінің шегі, °C, МПа				сүмен қанығу, % көлем бойынша	ісінуі, % көлем бойынша	ұзақ мерзімді сүмен қанығу, % көлем бойынша	суға төзімділік коэффициенті K _в	көлемдік салмақ, г/см ³
	құрғақ күйінде			сүмен қаныққан күйінде					
	20 °C R ₂₀	50 °C R ₅₀	0 °C R ₀	20 °C R ₂₀ ^в					
0	3,4	1,4	12,0	4,9	1,8	0,83	3,5	0,80	3,56
180	3,4	1,4	11,5	5,5	2,35	0,76	2,8	0,65	3,46
360	3,5	1,3	11,5	6,7	1,5	0,58	3,4	0,77	2,28
540	4,2	1,35	11,5	4,5	1,4	0,54	4,0	2,0	3,86
720	4,4	1,4	11,5	4,4	1,0	0,60	3,4	1,0	3,1

Ескерту: автор тарапынан Қазақстан Республикасындағы автомобиль жолдарында топырақтың 3 метрге дейінгі тереңдікке қату процесіне жүргізілген эксперименттік параметрлер негізінде құрастырылған

2-кестеде келтірілген деректер қатқан жол жамылғысы учаскесінің айтарлықтай дәрежеде сүмен қанығуын, сондай-ақ қату процесі кезінде жол қабаттарының суға төзімділік коэффициенті мен көлемдік салмағының артқанын көрсетеді. Бұл көрсеткіштер жол жамылғысы қабаттарының қасиеттері топырақтың қату жағдайында елеулі өзгерістерге ұшырайтынын көрнекі түрде дәлелдейді және топырақтың қату тереңдігі мен жол құрылымының қабаттық сипаттамалары арасында тікелей байланыс бар екенін көрсетеді. (Kala 2016). Топырақтың қату ұзақтығы да маңызды фактор болып табылады, себебі бұл параметр жол жамылғысы қабаттарының қасиеттерінің өзгеруімен және олардың құрамымен тікелей байланысты.

Осы тұрғыдан алғанда, асфальтбетон жабындысының қасиеттерін талдау аса өзекті. Асфальтбетонның маркасы оның қаттылығы мен аязға төзімділігін айқындайды: тығыз,



жоғары модульді қоспалар қату-еру кезінде аз деформацияланады және төменгі қабаттарға біркелкі жүктеме береді, ал төмен маркалы жабындар микроқатпарлы жарықтар мен қабатаралық сырғанауларға бейім болады. Құрылымдық тығыздық жоғары болған жағдайда қабатаралық су өткізгіштік азайып, қату процесінде ылғалдың жиналу қаупі төмендейді. Сонымен қатар, асфальтбетонның төменгі қабаттармен адгезиялық байланысы жақсы болғанда, аяздық көтерілу кезінде конструкция бірге жұмыс істеп, жарықтар азаяды.

Жабынның суға қанығу деңгейі де шешуші рөл атқарады: жоғары қанығу аяздық көтерілу қаупін арттырады, ал тығыз құрылымды, битум мөлшері жеткілікті жабындарда бұл құбылыс әлдеқайда аз байқалады. Асфальтбетонның аязға төзімділігі F-маркасымен (F200, F300) белгіленіп, қабаттың қату-еру циклдарына төтеп беру қабілетін сипаттайды. Жоғары аязға төзімділік қабаттың аяздық көтерілу кезінде жарылып кетуін немесе ойылып кетуін болдырмай, қызмет мерзімін ұзартады.

Нәтижесінде асфальтбетон жабындысы мен төменгі қабаттардың бірлескен жұмысы жол төсемінің сенімділігін қамтамасыз етеді. Егер жабынның суға төзімділігі жоғары, адгезиясы мықты және аязға төзімділігі жеткілікті болса, онда қату ұзақтығы мен қату тереңдігі өзгерген жағдайда да қабаттар бірге қозғалып, кернеулер біркелкі таралады. Ал керісінше, төмен сапалы жабындар мен суға қаныққан құрылымдар қату кезінде локальды көтерілулер мен жарықтардың пайда болуына алып келеді. Бұл жағдай жол жамылғысының мерзімінен бұрын бұзылуына және жөндеу жұмыстарының жиілеуіне себеп болады.

Көлік инфрақұрылымы нысандарында терең қату салдарынан туындайтын бүліну процестерінің даму қарқындылығы көпқабатты құрылымдар мен топырақ негізін құрайтын топырақтардың қату/еріту циклдарының төзімділігіне тікелей байланысты. Терең қату жағдайында топырақ-су-ауа жүйесінің құрылымында елеулі өзгерістер орын алады (Lin et al, 2020). Топырақ құрылымындағы ылғалдың қатуы – жол жамылғысы қабаттарындағы топырақтың аяздық ісінуінің негізгі себебі болып табылады. Осыған байланысты, маусымдық қату аймақтарында жылу оқшаулағыш қабаттарды орналастыру автомобиль қозғалысының қауіпсіздігін қамтамасыз ету тұрғысынан аса маңызды. Бұл мәселені уақтылы және сапалы түрде практикалық шешу жол жамылғысының қабаттарының қасиеттері мен құрамына, сондай-ақ жол учаскелерін қауіпсіз пайдалануға тікелей әсер етеді. Сонымен қатар, қату процесі кезінде ылғалдың жоғалуын бақылау жол жамылғысының аязға және маусымдық бұзылуларға төзімділігін анықтайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады. (Uterov et al, 2022).

Қазақстан Республикасының автомобиль жолдарына қатысты қарастыратын болсақ, ел аумағындағы топырақтар (солтүстік аймақтарды қоспағанда) негізінен тұзға қаныққан, минералды элементтерге тапшы және құрамында ауыр металдармен ластану деңгейі жоғары. Мұндай жағдайда топырақтың қату тереңдігі автомобиль жолының қабаттарының күйіне тікелей әсер етеді, себебі топырақ жамылғысында кездесетін ластаушы заттар маусымдық тоң тереңдігінде орналасқан жол жамылғысының сапасына қосымша кері әсер етуі мүмкін. Осыған байланысты елімізде топырақ ресурстарын ұтымды пайдалану жөніндегі іс-шаралар кешенін әзірлеу және енгізу, сондай-ақ автомобиль жолдарын салу кезінде топырақтардың күйін жақсарту мәселелері өзекті болып табылады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Автомобиль жолының төсеніші орналасқан аумақтағы жолының топырақтың температуралық режимі жылу энергиясының түсуі мен сыртқа шығуына байланысты қалыптасады және ол топырақ құрамындағы минералды элементтерге, бедер ерекшеліктеріне, өсімдіктер жамылғысының болуына, күн сәулесінің түсу деңгейі мен



ұзақтығына, сондай-ақ топырақтың ылғалдылығы мен кеуектілігіне байланысты, себебі бұл қасиеттер топырақтың жылуфизикалық сипаттамаларын анықтайды. Бұдан бөлек, өзге де бірқатар факторлар әсер етеді. Топырақтың жылынуының басты көзі — оның беткі қабаты сіңіретін күн сәулесінің энергиясы. Жоғарғы қабаттарға түскен жылу біртіндеп төменгі қабаттарға таралады. Суық мезгілінде бұл жылу ылғалдың булануына және қоршаған ауаны жылытуға жұмсалады (Тиратурян, Ляпин и Углова 2023). Аталған факторлардың өзара байланысы автомобиль жолының қабаттар құрамына жыл мезгілдеріне байланысты әсер ету тұрғысынан маңызды рөл атқарады. Топырақтың беткі қабаттарындағы тәуліктік және жылдық температуралық өзгерістер жылуөткізгіштік әсерінен төменгі қабаттарға беріледі. Бұл ретте температураның тереңдікке байланысты өзгеру кезеңі, әдетте, тұрақты сипатта болады: топырақтың бетінде және дерлік барлық тереңдіктерде температураның өзгеруінің периодтылығы 24 сағатты (тәуліктік жүріс) және 12 айды (жылдық жүріс) құрайды.

Автомобиль жолдарының жолдарының жамылғысы пайдалану кезеңі бойында сыртқы әсерлер мен маусымдық температура ауытқулары салдарынан құрылымдық деформацияларға ұшырайды. Жол қабаттарының күйі топырақтағы температуралық өзгерістермен — қыс мезгіліндегі тоңдану және жазғы уақытта топырақтың қызуына — тікелей байланысты (Zhussupbekov et al., 2013). Топырақтың тоңдану тереңдігі автомобиль жолы қабаттарының техникалық жай-күйіне тікелей ықпал етеді, өйткені ол жол жамылғысының құрылымдық деформациясына және оның жекелеген қабаттар тұтастығының бұзылуына алып келуі мүмкін (Вишневский & Стетюха 2018).

Сонымен қатар, маусымдық тоңдану тереңдігін төмендету және топырақтың аяздық ісіну үдерістерін азайтуға мүмкіндік беретін әртүрлі жылуоқшаулағыш материалдар аяздан қорғау қабаттарын орнатуда кеңінен қолданылуда. Көлік инфрақұрылымын жақсарту жол құрылысын жобалау нормаларын жетілдіруді және жол жамылғысының негізіне қосымша аяздан қорғайтын қабаттарды орнату үшін жаңа материалдарды енгізуді талап етеді. Бұл өз кезегінде жол конструкцияларының ұзақ мерзімділігін және апатсыз пайдалануын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Chen et al., 2020). Осындай материалдардың бірі ретінде кремнийлі шикізат негізінде алынатын түйіршіктелген көбікті шыныкерамиканы (ТКШК) атауға болады. Бұл материал көлік құрылысында қолдануға қажетті қасиеттер жиынтығына ие. Көлік инфрақұрылымын салу барысында жергілікті материалдарды қолдану – жол жамылғысының сапасын жоғары деңгейде ұстап тұрудың және экономикалық дамудың тұрақтылығын қамтамасыз етудің маңызды факторы болып табылады. Топырақтың тоңдық көтерілімдері – бұл жер ылғалының (шамамен 9 %) мұзға айналу нәтижесінде көлемінің ұлғаюынан туындайтын құбылыс. Бұл құбылыс топырақтағы ылғалдың тоңдануға дейінгі және тоң шекарасына қарай терең қабаттардан көтерілуі нәтижесінде пайда болады. Мұндай жағдайда судың сұйық күйден қатты күйге (мұзға) ауысуы байқалады. Тоңдық көтерілімдер – бұл суық мезгілде жол жамылғысы мен жер төсеніші ісініп, тегістігін жоғалтуымен көрінетін деформациялар. Ал еріген кезеңде көлік қозғалысы нәтижесінде бұл қабаттарда артық ылғалдың әсерінен жол төсеніші беріктігінің төмендеуі салдарынан жарықтар мен шөгу аймақтары пайда болады. (Al-Majidi et al 2018).

Мұздық көтерілу құбылысы бірнеше факторлардың әсерінен жүреді. Алғашқы фактор ретінде, бұл – төмен температура жағдайында ылғалдың қарқынды түрде жиналуы, нәтижесінде жол жамылғысының үстіңгі қабаттарында ылғалдылықтың жоғары деңгейі байқалады. (Zhussupbekov et al., 2012). Келесі фактор ретінде, жол жамылғысы астындағы топырақтың тоңдану тереңдігі кемінде бір метрді құрауы тиіс. Сонымен қатар, топырақ құрамында ұсақ шаңды құмдар мен сазды құм немесе басқа да тоңдануға бейім топырақтар болуы қажет. Қазақстан аумағының көп бөлігі топырақтардың маусымдық



тоңдану құбылысымен ерекшеленеді. Геологиялық-гидрологиялық жағдайлары қолайсыз кейбір автомобиль жолдарының учаскелерінде топырақтың тоңдану процестерімен байланысты әртүрлі деформациялар байқалады. Елдің көптеген аймақтарында көктемгі және күзгі мезгілдерге ауа райының тұрақсыздығы, температураның күрт өзгеруі мүмкін. Ауа температурасының күрт төмендеуі мен қайта жылынуы кезең-кезеңімен алмасып отырады (тәуліктік немесе мерзімді температура айырмашылығы) (Yang et. al., 2017). Аталған құбылыс тоңдану мен еру үдерістерінің көп мәрте қайталанатын цикл түрінде жүретінін аңғартады. Қысқа уақыт аралығында топырақ мерзімді түрде тоңған және еріген күйде бола алады, бұл өз кезегінде жол жамылғысы астындағы үйінді топырақта қайталама тоңдану нәтижесінде пайда болатын топырақтың көтерілуі мен құрылымдық босау үдерістерінің орын алуына себеп болады (Awwad et. al., 2019). Бұл факторлардың барлығы жол жамылғысының беріктігі мен ұзақ мерзімділігіне теріс әсер етіп, автомобиль жолының қабаттары сапасының нашарлауына және кейбір учаскелердің мерзімінен бұрын жарамсыз күйге түсуіне себеп болады. Автомобиль магистральдарында топырақтың көтерілу қаупі бар топырақты учаскелердің болуы жол жамылғысының көлік-пайдалану сипаттамаларының төмендеуіне әкеледі, бұл өз кезегінде жол апатының артуына және автомобиль қатынасының жалпы қауіпсіздік деңгейінің төмендеуіне себеп болады (Zamanabadi et. al., 2019). Осыған ұқсас жағдайларды уақытылы анықтап, оларды тиімді әрі сапалы түрде оңтайландыру – маңызды міндеттердің бірі болып табылады.

Жол жамылғысының қабаттарын жобалау мен салу барысында топырақтың тоңдану тереңдігін есепке алу – міндетті шарттардың бірі болып табылады. (Lee et. al., 2020). Топырақтың тоңдану тереңдігі дұрыс есептелмеген жағдайда, автомобиль жолының қабаттарының мерзімінен бұрын бүлінуі және жиі жөндеу жұмыстарын жүргізу қажеттілігі сияқты жол жамылғысын пайдалану барысында түрлі мәселелер туындауы мүмкін. Жол қабаттарын салу кезінде қолданылатын материалдар салалық сапа стандарттарына сай болуы тиіс және төмен температураның әсеріне жоғары төзімділікке ие болуы қажет.

ҚОРЫТЫНДЫ

Автомобиль жолдары орналасқан учаскелердегі топырақтың терең тоңдануы, жалпы алғанда, жол қабаттарының күйіне кері әсер етеді. Топырақтың тоңдануы салдарынан жол қабаттарындағы ылғалдың кеңеюі байқалады, бұл өз кезегінде жол жамылғысының бұзылуына алып келеді. Осы процестер нәтижесінде автомобиль жолының қабаттық құрамында елеулі өзгерістер орын алады, бұл өз кезегінде жол жамылғысының жекелеген учаскелерінің жарамсыз күйге түсуіне және жол жөндеу жұмыстарын жүргізу қажеттігіне алып келуі мүмкін. Топырақтың маусымдық тоңдану үдерістерінің жол жамылғысының құрылымына әсерін азайту үшін жыл сайын жолдарды жөндеуге қомақты қаржы шығындары талап етіледі. Бүгінгі күні қолданыстағы жол қозғалысы қауіпсіздігіне қойылатын нормативтік талаптар жол шаруашылығы қызметтерін жол жамылғысының сапасының белгілі бір деңгейін қамтамасыз етуге міндеттейді. Мұндай талаптарды сақтау жол қозғалысы қауіпсіздігін қамтамасыз ету тұрғысынан да, сондай-ақ автомобиль жолының жамылғысын практикалық пайдалану мерзімін ұзарту мақсатында да маңызды мәнге ие.

Автомобиль жолының топырағы маусымдық тоңдану нәтижесінде пайда болатын топырақтың көтерілуі процесі жол құрылысында және жөндеу жұмыстарында құм негізіндегі материалдарды қолдану арқылы тиімді түрде азайтылуы мүмкін. Аталған құрылыс әдістемесін топырақтың тоңдану тереңдігі бірнеше метрге дейін немесе одан да жоғары деңгейге жететін аймақтарда орналасқан автомобиль жолдарна қолдану орынды әрі тиімді болып табылады. Сонымен қатар, автомобиль жолының жамылғы



қабаттарының астындағы топырақта тоңдану тереңдігі қар жамылғысымен қорғалған табиғи аумақтарға қарағанда едәуір терең болатынын да назрға алу керек. Себебі қар қабаты жылу оқшаулағыш қызметін атқарады. Бұл жайт, әсіресе ашық жол учаскелерінде және маусымдық жауын-шашын түсетін аймақтарда жөндеу жұмыстарын жүргізу кезінде міндетті түрде назарға алынуы тиіс. Қалай болғанда да, жол жамылғысы орналасқан жерлердегі маусымдық тоңдану үдерісі жолдың пайдалану шарттарының бұзылуына және оның мерзімінен бұрын істен шығуына әкелетін негізгі себептердің бірі болып табылады.

Осылайша, автомобиль жолын жобалау кезінде және оны салудың барлық кезеңдерінде құрылыс жүргізілетін аймақтың климаттық жағдайларын ескеру қажет. Бұл – болашақта топырақтың терең тоңдануына байланысты туындайтын жолды пайдалану мәселелерінің алдын алу үшін маңызды. Мұндай тәсіл автомобиль жолының қабаттарының бүтіндігін сақтап, жол жамылғысының қауіпсіздігі мен сенімді пайдаланылуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Зерттеу авторлардың өз қаражаты есебінен қаржыландырылады.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Бұл жұмысты дайындау барысында авторлар генеративті жасанды интеллект құралдарын қолданбады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Li, Y., et al. (2021). Harmless treatment of municipal solid waste incinerator fly ash through shaft furnace. *Waste Management*, 124, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.039>
- Chen, Q., et al. (2021). Effect of chloride attack on the bonded concrete system repaired by UHPC. *Construction and Building Materials*, 272, – Article number 121971. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121971>
- Zhang, S., et al. (2018). Influence on gaseous pollutants emissions and fly ash characteristics from co-combustion of municipal solid waste and coal by a drop tube furnace. *Waste Management*, 81, 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.048>
- Sangiorgi C. et al. (2018). Stone mastic asphalt (SMA) with crumb rubber according to a new dry-hybrid technology: A laboratory and trial field evaluation. *Construction and Building Materials*, 182, 200-209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.128>
- Haze, Hunger & Hesitation (2020). Disaster aid after the 1783 Laki eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 406. – Article number 107080. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107080>
- Muthu, M. & Santhanam, M. (2018). Effect of reduced graphene oxide, alumina and silica nanoparticles on the deterioration characteristics of Portland cement paste exposed to acidic environment. *Cement and Concrete Composites*, 91, 118-137. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.005>
- Kala R. (2016). *On-Road Intelligent Vehicles* 1st Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, Paperback ISBN: 9780128037294 eBook ISBN: 9780128037560 <https://shop.elsevier.com/books/on-road-intelligent-vehicles/kala/978-0-12-803729-4>
- Lin J. et al (2020). Dispersion of graphene oxide–silica nanohybrids in alkaline environment for improving ordinary Portland cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 106. Article number 103488. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103488>



- Utepov, Y. et al (2022). Investigating the Influence of Initial Water pH on Concrete Strength Gain Using a Sensors and Sclerometric Test Combination. 7(12), <https://doi.org/10.3390/infrastructures7120159>
- Тиратурян А.Н., Ляпин А.А. и Углова Е.В. (2023). Совершенствование неразрушающего метода определения механических характеристик элементов многослойных конструкций на примере дорожных одежд. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета, 1, 56–65. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.1.06> // Tiraturyan A.N., Lyapin A.A., i Uglova E.V. (2023). Sovershenstvovanie nerazrushayushchego metoda opredeleniya mekhanicheskikh kharakteristik elementov mnogosloynnykh konstruktsiy na primere dorozhnykh odezhd [Improvement of the non-destructive method for determining the mechanical characteristics of multilayer structure elements using road pavements as an example]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 1, 56–65. (In Russ.)
- Zhussupbekov, A.Zh., Utepov, Ye.B., Shakhmov, Zh.A. & Ling, H.I. (2013). Model testing of piles in a centrifuge for prediction of their in-situ performance. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 50, 92–96 DOI:10.1007/s11204-013-9217-9
- Вишневецкий А.В. и Стетюха В.А. (2018). Деформации дорожного полотна на структурно-неустойчивых грунтах. Вестник Забайкальского государственного университета, 10, 4–11. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2018-24-10-4-11> // Vishnevskiy A.V., i Stetyukha V.A. (2018). Deformatsii dorozhnogo polotna na strukturno-neustoichivyykh gruntakh [Deformations of road pavement on structurally unstable soils]. Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta, 10, 4–11. (In Russ.)
- Chen L., Liao Y., Ma X. & Niu Y. (2020). Effect of co-combusted sludge in waste incinerator on heavy metals chemical speciation and environmental risk of horizontal flue ash. Waste Management, 102, 645-654. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.027>
- Al-Majidi M.H. et al (2018). A novel corrosion resistant repair technique for existing reinforced concrete (RC) elements using polyvinyl alcohol fibre reinforced geopolymer concrete (PVAFRGC). Construction and Building Materials, 164, 603-619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.213>
- Zhussupbekov, A., Shakhmov, Zh., Shin, E.C. & Krasnikov, S. (2012). Challenges for transportation geotechnics in extreme climates of Kazakhstan and Korea. 2nd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG), 655 – 660. DOI:10.1201/b12754-99
- Yang G.C.C., Chuang T-S. & Huang C-W. (2017). Achieving zero waste of municipal incinerator fly ash by melting in electric arc furnaces while steelmaking. Waste Management, 62, 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.021>
- Awwad, T., Shakhmov, Zh.A., Lukpanov, R.E. & Yenkebayev, S.B. (2019). Experimental Study on the Behavior of Pile and Soil at the Frost Condition. International Congress and Exhibition" Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology", 69–76. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-01902-0_7
- Zamanabadi S.N., Zareei S.A., Shoaie P. & Ameri F. (2019). Ambient-cured alkali-activated slag paste incorporating micro-silica as repair material: Effects of alkali activator solution on physical and mechanical properties. Construction and Building Materials, 229, Article number 116911. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116911>
- Lee B., Lee S., Kim B. & Choi H. (2020). Advanced characterization of IGCC slag by automated SEM-EDS analysis. Waste Management, 116, 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.001>



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Шахмұв Жанболат Ануарбекович – PhD, қауымдастырылған профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Шахмұв Жанболат Ануарбекович – PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Shakhmov Zhanbolat – PhD, associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

e-mail: zhanbolat8624@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1680-5287>



Тлеуленова Гүлшат Төлеуна – PhD, доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Тлеуленова Гүлшат Төлеуна – PhD, и.о. доцент, Евразийский национальный университет им.Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Tleulenkova Gulshat – PhD, acting Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

e-mail: gulshattleulenkova7@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2806-1588>



Хафиз Қайрат Нұрлыбекұлы – докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Хафиз Қайрат Нұрлыбекұлы – докторант, Евразийский национальный университет им.Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Khafiz Kairat – Doctoral's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

e-mail: kairat_9207@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7552-9277>



Хафизов Азамат Нұрлыбекулы – магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

Хафизов Азамат Нұрлыбекулы – магистрант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана қ., Казахстан

Khafizov Azamat – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

e-mail: azamat_khafizov01@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3415-0804>



М А З М Ұ Н Ы

ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС

<i>Асанғалиев Е.А., Данилов М.С., Дудкин М.В., Лутай С.С., Қалибек Ж.С.</i> Ірі қара малға арналған фито минералды-тұзды жалау брикеттерін жасау технологиясында престоуді оңтайландыру	5
<i>Басқанбаева Д.Ж., Елемесов К.К., Сабирова Л.Б., Мырзабекова Д.М.</i> Суық климат жағдайында қысымы төмен ілеспе мұнай газын бұрандалы компрессорлармен сығуды оңтайландыру	16
<i>Боброва В.В., Касперович А.В., Нечитуренко С.В., Ефремов С.А., Ахметова П.Т.</i> Күріш қабығы карбонизатын резеңке матрицасымен әрекеттесуін жақсарту үшін физикалық модификациялау	29
<i>Вавилов А.В., Гурьянов Г.А., Дудкин М.В., Ким А.И., Яковлев В.С.</i> Астық экструдерінің жұмыс тиімділігінің бұрандалы топ бөлшектерінің параметрлеріне тәуелділігі	45
<i>Кабылканов С.К., Абдулина С.А., Махамбетов Е.Н., Onuralp Yücel</i> Хром-марганецті лигатураны алу үшін шикіқұрам материалдардың дифференциалды термиялық талдауы	60
<i>Касымова Д.Б., Сатинов Р.В., Адылканова М.А., Реутова Г.А.</i> Құрамында мыс мөлшері жоғары цианидтік ерітінділеуден алынған ерітіндідегі алтын мен мысты сорбциялау және десорбциялау үрдістерін зерттеу	71
<i>Мусин Р.А., Рабатұлы М., Замалиев Н.М., Ахматнуров Д.Р.</i> Қарағанды көмір бассейнінде метан өндірудің геологиялық жағдайлары мен перспективаларын бағалау	80
<i>Ораз Ф.Б., Оразалиева А.Н., Иванов К.С., Алипбаев К.А.</i> Жетектерді ғарыштық робототехника манипуляторларын әзірлеуде қолдану	91
<i>Сакенова А.М., Басқанбаева Д.Д., Төлебаев Н.С., Сакадиев Н.Н., Сатыбалды С.П.</i> Пневматикалық құбырлардың беріктігін есептеуді салыстырмалы талдау: аналитикалық әдіс және arm winmachine	104
<i>Серая Н.В., Чернавин В.Ю., Даумова Г.К., Миргородский С.И., Рамазанова Р.А.</i> Техногендік қалдықтардан жасалған корунд материалдарының негізінде отқа төзімді бетонды әзірлеу	114
<i>Толубаева К.К., Камет М.</i> Энергия өндіруге арналған технологиялық қондырғы	130

АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

<i>Айдарбеков А.У., Ибрайымов А.Е., Мурзабекова Г.Е., Айдарбекова А., Темирболат А.</i> Анимациялық медиа өндірісіндегі кино бизнес-процестерді қолдану мен аудиоинженерия принциптері	142
<i>Болатбек А.Б., Жоламанов Б.Н., Нұрғалиев М.К., Саймбетов А.К., Әбжанова Г.М.</i> LoRa сымсыз желілерінде жіберу параметрін таңдаудың энергияны үнемдейтін алгоритмі	157



<i>Вайс Ю.А., Омоджола А.Ф., Рахметуллина С.Ж., Уркумбаева А.М.</i> Гаусс жуықтауын қолдану арқылы ауа сапасын болжау және аномалияларды анықтауға арналған гибриді CNN-LSTM моделі	169
<i>Есмұхамедов Н.С., Сапақова С.З., Синчев Б.Қ., Есмұхамедов Н.С.</i> Анықталмаған IT орталарында ресурстарды бөлудің оңтайландыру модельдеріне салыстырмалы талдау	182
<i>Жантасова Ж.З., Нурғалиева С.А., Сыздықпаева А.Р.</i> Конфиденциалдығы сақталған деректер базасына сұраныстар және деректерді талдау	194
<i>Ордабаева Ж.М., Молдағұлова А.Н.</i> Кредиттік өнімдердің әртүрлі түрлері бойынша скорингтік карталар	206
<i>Сембина Г.К., Әйтім Ә.Қ., Сейлова Н.А.</i> Деректерді өңдеу әдістері арқылы әлеуметтік инфрақұрылымның қолжетімділігін болжау үлгілеуі	226
<i>Серіков А.Е., Белощицкий А.А.</i> Білім беру бағдарламалары үшін шығаратын мазмұнының сапасына промпт-инженерингтің әсерін зерттеу	238
<i>Хасенова З.Т., Увалиева И.М., Мукашева Р.У., Букунова А.Ш., Кәрімқызы Б.</i> Медициналық диагностика міндеттеріндегі глюкометрлер мен гематологиялық анализаторлардың деректерін талдауға арналған машиналық оқыту модельдері	250
<i>Шаяхметова А.С., Абдилдаева А.А., Ахметова А.М.</i> Байес желілерімен жұмыс істеуге арналған заманауи технологиялар мен бағдарламалық шешімдер	268

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС

<i>Әбішева Ә., Әлібекова Н., Алдунгарова А., Досмұхамбетова Б., Жұмаділов І.Т.</i> ГИС технологияларын қолдана отырып геотехникалық мәліметтерді өңдеу	284
<i>Батырова Д.Ж., Абдраимова Г.А.</i> Көміртек талшықты композитті шпалдар мен дәстүрлі шпалдардың салыстырмалы талдауы	292
<i>Есболат А.Г., Киялбаев А.К., Есентай Д.Е.</i> Құрғақ климатты жағдайдағы жер төсеме топырағының ылғалдану деңгейіне арналған есептемелер мысалдары	303
<i>Омаров Ж.М., Жаканов А.Н., Булыга Л.Л., Байтұрсынов Ә.И., Ахметова А.А.</i> Құрғақ құрылыс қоспаларының құрамында ЖЭС ұшатын күлін қайта өңдеу және тиімді пайдалану	313
<i>Өжет А., Мусабаев Т.Т., Мамедов С.Ә.</i> Жалпы білім беру мектептерін жобалаудың сәулеттік мәселелері: Астана қаласындағы «Vinom» мектебінің мысалында	323
<i>Руденко О.В., Анон Д.К., Скориков С.П., Крючков А.В., Лутай С.С., Бегентаев М.М.</i> Сейсмикалық қауіпті аудандарда құрылысқа жарамды газкүлбетоннан бұйымдар өндіруге арналған конвейер үлгісіндегі технологиялық желіні түрленді modification	333
<i>Шахмов Ж.А., Ерзатова М.Е., Мұздыбаева Т.Қ.</i> Әлсіз топырақтарды салыстырмалы талдау: тұрақтылық пен көтергіштік қабілетті арттыру үшін геосинтетикалық материалдарды қолдануды бағалау	347
<i>Шахмов Ж.А., Тлеуленова Г.Т., Хафиз Қ.Н., Хафизов А.Н.</i> Қату тереңдігінің автомобиль жолының қабаттарының құрамына әсері	361



СО Д Е Р Ж А Н И Е

ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

<i>Асанғалиев Е.А., Данилов М.С., Дудкин М.В., Лутай С.С., Қалибек Ж.С.</i> Оптимизация прессования в технологии изготовления фитоминерально-солевых брикетов-лизунцов для крупного рогатого скота	5
<i>Басқанбаева Д.Ж., Елемесов К.К., Сабирова Л.Б., Мырзабекова Д.М.</i> Оптимизация компримирования низконапорного попутного нефтяного газа винтовыми компрессорами в условиях холодного климата	16
<i>Боброва В.В., Касперович А.В., Нечипуренко С.В., Ефремов С.А., Ахметова П.Т.</i> Физическая модификация карбонизата рисовой шелухи для улучшения взаимодействия его с каучуковой матрицей	29
<i>Вавилов А.В., Гурьянов Г.А., Дудкин М.В., Ким А.И., Яковлев В.С.</i> Зависимость эффективности работы зернового экструдера от параметров деталей шнековой группы	45
<i>Кабылканов С.К., Абдулина С.А., Махамбетов Е.Н., Onuralp Yücel</i> Дифференциальный термический анализ шихтовых материалов для получения хромомарганцевой лигатуры	60
<i>Касымова Д.Б., Сапинов Р.В., Адылканова М.А., Реутова Г.А.</i> Исследование процессов сорбции и десорбции золота и меди из раствора цианидного выщелачивания с высоким содержанием меди	71
<i>Мусин Р.А., Рабатұлы М., Замалиев Н.М., Ахматнуров Д.Р.</i> Оценка геологических условий и перспективы добычи метана в Карагандинском угольном бассейне	80
<i>Ораз Ф.Б., Оразалиева А.Н., Иванов К.С., Алипбаев К.А.</i> Применение приводов при разработке манипуляторов космической робототехники	91
<i>Сакенова А.М., Басқанбаева Д.Д., Төлебаев Н.С., Сакадиев Н.Н., Сатыбалды С.П.</i> Сравнительный анализ расчётов прочности пневмотрубопроводов: аналитический метод и arm winmachine	104
<i>Серая Н.В., Чернавин В.Ю., Даумова Г.К., Миргородский С.И., Рамазанова Р.А.</i> Разработка жаростойкого бетона на основе корундовых материалов из техногенных отходов	114
<i>Толубаева К.К., Камет М.</i> Технологическая установка для производства энергии	130

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Айдарбеков А.У., Ибрайымов А.Е., Мурзабекова Г.Е., Айдарбекова А., Темирболат А.</i> Кинопроизводственные бизнес-процессы и принципы аудиоинженерии в создании анимационных медиа	142
<i>Болатбек А.Б., Жоламанов Б.Н., Нұрғалиев М.К., Саймбетов А.К., Әбжанова Г.М.</i> Энергоэффективный алгоритм выбора параметров передачи в беспроводных сетях LoRa	157
<i>Вайс Ю.А., Омоджола А.Ф., Рахметуллина С.Ж., Уркумбаева А.М.</i> Гибридная модель CNN-LSTM для прогнозирования качества воздуха и обнаружения аномалий с помощью Гауссовой аппроксимации	169



<i>Есмұхамедов Н.С., Сапакова С.З., Синчев Б.К., Есмұхамедов Н.С.</i> Сравнительный анализ моделей оптимизации для распределения ресурсов в условиях неопределённости IT-среды	182
<i>Жантасова Ж.З., Нурғалиева С.А., Сыздықпаева А.Р.</i> Запросы к базам данных с сохранением конфиденциальности и анализ данных	194
<i>Ордабаева Ж.М., Молдагулова А.Н.</i> Скоринговые карты для различных типов кредитных продуктов	206
<i>Сембина Г.К., Әйтiм Ә.Қ., Сейлова Н.А.</i> Прогнозное моделирование доступности социальной инфраструктуры с использованием методов интеллектуального анализа данных	226
<i>Серіков А.Е., Белощицкий А.А.</i> Исследование влияния промпт-инжиниринга на качество генерируемого контента для образовательных программ	238
<i>Хасенова З.Т., Увалиева И.М., Мукашева Р.У., Букунова А.Ш., Кәрімқызы Б.</i> Модели машинного обучения для анализа данных глюкометров и гематологических анализаторов в задачах медицинской диагностики	250
<i>Шаяхметова А.С., Абдилдаева А.А., Ахметова А.М.</i> Современные технологии и программные решения для работы с Байесовскими сетями	268

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Абишева А., Алибекова Н., Алдунгарова А., Досмұхамбетова Б., Жұмаділов І.Т.</i> Обработка геотехнических данных для зонирования с использованием ГИС-технологий	284
<i>Батырова Д.Ж., Абдраимова Г.А.</i> Сравнительный анализ композиционных шпал с углеродным волокном и традиционными шпалами	292
<i>Есболат А.Г., Киялбаев А.К., Есентай Д.Е.</i> Примеры расчета по определению расчётной влажности грунта земляного полотна в условиях засушливого климата	303
<i>Омаров Ж.М., Жаканов А.Н., Булыга Л.Л., Байтұрсынов Ө.И., Ахметова А.А.</i> Рециклинг и эффективное использование золы-уноса ТЭЦ в составе сухих строительных смесей	313
<i>Өжет А., Мусабаев Т.Т., Мамедов С.Э.</i> Архитектурные вызовы проектирования общеобразовательных школ: кейс школы «Vinom» в городе Астана	323
<i>Руденко О.В., Аноп Д.К., Скориков С.П., Крючков А.В., Лутай С.С., Бегентаев М.М.</i> Модификация технологической линии конвейерного типа для производства изделий из газозолобетона, пригодных для строительства в сейсмически опасных районах	333
<i>Шахмов Ж.А., Ерзатова М.Е., Муздыбаева Т.К.</i> Сравнительный анализ слабых грунтов: оценка применения геосинтетических материалов для повышения устойчивости и несущей способности	347
<i>Шахмов Ж.А., Тлеуленова Г.Т., Хафиз Қ.Н., Хафизов А.Н.</i> Влияние глубины промерзания на состав слоев автомобильной дороги	361



CONTENT

ENGINEERING AND ENGINEERING

<i>Asangaliyev Ye.A., Danilov M.S., Dudkin M.V., Lutai S.S., Kalibek Zh.S.</i> Optimization of pressing in the technology of manufacturing phyto-mineral-salt briquettes for cattle	5
<i>Baskanbayeva D.Zh., Yelemesov K.K., Sabirova L.B., Myrzabekova D.M.</i> Optimization of compression of low-pressure associated petroleum gas by screw compressors in cold climate conditions	16
<i>Bobrova V.V., Kasperovich A.V., Nechipurenko S.V., Efremov S.A., Akhmetova P.T.</i> Physical modification of rice hull carbonizate to improve its interaction with rubber matrix	29
<i>Vavilov A.V., Guryanov G.A., Dudkin M.V., Kim A.I., Yakovlev V.S.</i> The dependence of the efficiency of the grain extruder on the parameters of the screw group parts	45
<i>Kabyllkanov S.K., Abdulina S.A., Makhambetov Ye.N., Onuralp Yucel</i> Differential thermal analysis of charge materials for the production of chromium-manganese ligature	60
<i>Kassymova D.B., Sapinov R.V., Adilkankyzy M.A., Reutova G.A.</i> Study of the processes of sorption and desorption of gold and copper from a cyanide leaching solution with a high copper content	71
<i>Musin R.A., Rabatuly M., Zamaliyev N.M., Akhmatnurov D.R.</i> Assessment of geological conditions and prospects for methane production in the Karaganda coal basin	80
<i>Oraz F.B., Orazalieva A.N., Ivanov K.S., Alipbayev K.A.</i> Application of actuators in the development of space robotics manipulators	91
<i>Sakenova A.M., Baskanbayeva D.D., Tolebayev N.S., Sakadiyev N.N., Satybaldy S.P.</i> Comparative analysis of calculations of strength of pneumatic pipelines: analytical method and apm winmachine	104
<i>Seraya N.V., Chernavin V.Yu., Daumova G.K., Mirgorodsky S.I., Ramazanov R.A.</i> Development of heat-resistant concrete based on corundum materials from man-made waste	114
<i>Tolubayeva K.K., Kamet M.</i> Technological installation for energy production	130

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

<i>Aidarbekov A., Ibraiyev A., Murzabekova G., Aidarbekova A., Temirbolat A.</i> Film business processes and audio engineering principles in the construction of animated media	142
<i>Bolatbek A.B., Zholamanov B.N., Nurgaliyev M.K., Saymbetov A.K., Abzhanova G.M.</i> Energy efficient algorithm for transmission parameter selection in Lora wireless networks	157
<i>Вайс Ю.А., Омоджола А.Ф., Рахметуллина С.Ж., Уркумбаева А.М.</i> Гаусс жуықтауын қолдану арқылы ауа сапасын болжау және аномалияларды анықтауға арналған гибриді CNN-LSTM моделі	169

<i>Abisheva A., Alibekova N., Aldungarova A., Dosmukhambetova B., Zhumadilov I.</i>	
Geotechnical data processing for zoning using GIS technologies	284
<i>Batyrova D.Zh., Abdraimova G.A.</i>	
Comparative analysis of carbon fiber composite sleepers and traditional sleepers	292
<i>Yesbolat A., Kiyalbayev A., Yessentay D.</i>	
Examples of calculations for determining the design moisture content of earthwork soil in arid climate conditions	303
<i>Omarov Zh.M., Zhakanov A.N., Bulyga L.L., Baitursynov U.I., Akhmetova A.A.</i>	
Recycling and efficient use of thermal power plant fly ash as part of dry building mixes	313
<i>Ozhet A., Musabaev T.T., Mamedov S.E.</i>	
Architectural challenges in the design of general education schools: the case of the «Binom» school in Astana	323
<i>Rudenko O.V., Anop D.K., Skorikov S., Kryuchkov A., Lutai S., Begentayev M.</i>	
Of a conveyor-type technological line for the production of aerated concrete products suitable for construction in seismically hazardous areas	333
<i>Shakhmov Zh.A., Yerzatova M.Y., Muzdybayeva T.K.</i>	
Comparative analysis of weak soils: evaluating geosynthetic applications for enhanced stability and load-bearing capacity	347
<i>Shakhmov Zh., Tleulenova G., Khafiz K., Khafizov A.</i>	
Influence of freezing depth on the composition of road layers	361

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің ХАБАРШЫСЫ

Ғылыми журнал

1999 жылдан шыға бастады.

Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінде тіркеліп,
2024 ж. 3 мамырында № KZ71VPY00092356 куәлігі берілген.

**ВЕСТНИК Восточно-Казахстанского технического университета
имени Д. Серикбаева**

Научный журнал

Издается с 1999 г.

Зарегистрирован Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан. Свидетельство № KZ71VPY00092356 от 3 мая 2024 г.

BULLETIN of D. Serikbayev East Kazakhstan technical university

Scientific journal

Published since 1999

Registered by the Ministry of Information and Social Development
Republic of Kazakhstan. Certificate No. KZ71VPY00092356 dated May 3, 2024.

Редакторлар – Редакторы

О.Н. Николаенко, С.С. Мамыраздыкова

Корректорлар – Корректоры

О.Н. Николаенко, С.С. Мамыраздыкова

Руководитель издательства О.Н. Николаенко

Editors O. Nikolaenko, S. Mamyradykova

Copy editors O. Nikolaenko, S. Mamyradykova

Publishing director O. Nikolaenko

Материалдарды компьютерде терген және беттеген С.С. Мамыраздыкова

Набор, верстка, изготовление оригинал-макета С.С. Мамыраздыкова

Text Layout, lead out production of the original layout S. Mamyradykova

Басуға 30 қыркүйек 2025 ж. қол қойылды.

Форматы 84×108/16. Офсет қағазы.

Көлемі: шартты баспа табағы 40,32, есептік баспа табағы 40,37.

Баспа нұсқасы. Таралымы 50 дана. № 803-2025 тапсырыс.

Бағасы келісім бойынша.

Подписано в печать 30 сентября 2025 г.

Формат 84×108/16. Бумага офсетная.

Объем: усл. печ. л. 40,32, уч.-изд. л. 40,37.

Печатная версия. Тираж 50 экз. Заказ № 803-2025.

Цена договорная.

Signed to print on September 30, 2025.

Format 84'108 / 16. Offset paper.

Volume: conventional printing plate 40.32, estimated printing plate 40.37.

Printed version. Circulation 50 copies. Order No. 803-2025.

The price is negotiable.

Шығыс Қазақстан техникалық университеті. 070004, Өскемен қаласы, Протозанов көшесі, 69.
Восточно-Казахстанский технический университет. 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69.
D. Serikbayev East Kazakhstan technical university. 070004, Ust-Kamenogorsk, 69 Protozanov Street.