

Торайғыров университетінің
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Торайғыров университета

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ

Физика, математика және компьютерлік
ғылымдар сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Физика, математика
и компьютерные науки
Издается с 1997 года

ISSN 2959-068X

№ 3 (2026)
Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Физика, математика и компьютерные науки
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ91VPY00046988

выдано

Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
публикация материалов в области физики, математики,
механики и информатики

Подписной индекс – 76208

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/2959-068X>

Бас редакторы – главный редактор

Тлеуенов С. К., д.ф.-м.н., профессор

Заместитель главного редактора Испулов Н. А., к.ф.-м.н., профессор

Ответственный секретарь Жумабеков А. Ж., PhD доктор

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Esref Adali	доктор PhD, профессор (Турция);
Qadir Abdul Rahimoon	доктор PhD, профессор (Пакистан);
Акылбеков Э. Т.	д.ф.-м.н., профессор;
Демкин В. П.	д.ф.-м.н., профессор (Российская Федерация);
Дуйшеналиев Т. Б.	д.ф.-м.н., профессор (Российская Федерация);
Жумадиллаева А. К.	к.т.н., ассоц. профессор;
Ибраев Н. Х.	д.ф.-м.н., профессор;
Кецесбеков А. Б.	доктор PhD;
Косов В. Н.	д.ф.-м.н., профессор;
Сейтова С. М.	д.пед.н., профессор;
Сулюбаева Л. Г.	доктор PhD;
Искакова З. С.	(технический редактор)

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на

«Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МАЗМҰНЫ

«КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР» СЕКЦИЯСЫ
СЕКЦИЯ «КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ»
SECTION «COMPUTER SCIENCE»

Оспанова Н. Н., Аканова А. С., Бейсенов М. К., Байжуманов С. Д., Алинов Е. К.	
Архитектура и технологические решения интеллектуальной LMS-платформы Ashyk Bilim на основе RAG	6
Савченко Н. К., Шакирова Ю. К., Корляков И. Д.	
Сравнительный анализ методов машинного обучения в задаче автоматизированного распределения задач.....	20
Sagar Chhabriya, Hanseeka Dhingana, Noor Nabi Dahar, Dr.Abdul Qadir	
HIREBASE: A cloud-native platform for AI-assisted recruitment with a voice interview agent.....	30

«ТЕОРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ФИЗИКА» СЕКЦИЯСЫ
СЕКЦИЯ «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА»
SECTION «THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS»

Акылбекова А. Д., Бакбергенова К. А., Тулегенова А. Т., Кисабекова А. А., Сарсехан Г. Ғ.	
Жоғары температуралық күйдірудің мырыш селениті нанокристалдарының қасиеттеріне әсері.....	45
Бижигитов Т., Оразымбетова Г. Х.	
Поликристалл 1н мұз модификациясының жан-жақты сығылу модулінің қысымға тәуелділігін зерттеу.....	68
Даутбеков М. К., Мұрал А., Сулюбаева Л. Г.	
Влияние фракционного состава порошка Cr ₃ C ₂ -NiCR на структуру и свойства покрытий, полученных методом HVOF.....	87
Yerzhanov K. K., Sergazina A. M., Baurzhan G. B., Tsyba P. Yu., Simakin M. V.	
Dynamics of rotating and magnetized particles in the space-time of modified black holes.....	105
Искакова А. Б., Жумабеков А. Ж., Аубакирова Ж. А., Исимова Б. Ш., Даниярова Ж. К.	
PZT-5H пьезокерамикалық элементтің сипаттамаларын қолданбалы бағдарламның көмегімен зерттеу.....	117

Қаламбай М. Т., Наурызбаева А. Ж., Мухаммединова Т. С., Үсінов Н. М., Шукиргалиев Б. Т.	
Модельден бақылауға дейін: NGC 2516 шашыраңқы жұлдыз шоғырының N-Body моделін нақтылау және ондағы жұлдыздық қара құрдымдар.....	128
Кеңесбеков А. Б., Сейтханова А. К., Серікбайқызы А., Баяндинова М. Б., Каирбаева Л. С.	
Реактивті магнетронды шашырату арқылы титан оксинитридті қабықшалардың түзілуі, олардың құрылымдық ерекшеліктері мен қасиеттері.....	152
Ali Coruh, Elham Fattahi, Aligholi Niaei	
La-Sr-based perovskite oxides as bifunctional electrocatalysts for water splitting via compositional, electronic, and nanostructural engineering.....	172
Kochneva A. K., Serikbaykyzy A., Askhatov A. N., Zhasulanuly N., Berdimuratov N. E.	
Study of the physicochemical properties of coatings formed by micro-arc oxidation on a titanium alloy.....	183
Маханов К. М., Салькеева А. К., Кусенова А. С., Шакирзянов Р. И., Смагулов Ж. К.	
Исследование радиопоглощающих материалов в миллиметровом диапазоне.....	200
Шанина З. К., Таймагамбетова Н. А., Сергеев Д. М.	
Трансмон режиміндегі кубиттердің спектрлік сипаттамаларын және энергия деңгейлерінің құрылымын талдау.....	214

«ОҚУ ПӘНДЕРІН ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ» СЕКЦИЯСЫ
СЕКЦИЯ «МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН»
SECTION «METHODS OF TEACHING OF EDUCATIONAL DISCIPLINES»

Aralbayeva G. M., Nurkasymova S. N., Nabyeva K. E., Kenes G. M.	
STEM-based inquiry model for teaching the concept of pressure	232
Аққағаз М., Сеитова С. М.	
Болашақ мұғалімдердің зерттеу құзіреттілігінің деңгейін айқындау критерийлері.....	249
Пономарева О. М., Минин М. Г., Вахгельт А. Ф.	
Многоуровневая модель непрерывного профессионального развития преподавателей инженерного вуза.....	264

Авторлар туралы ақпарат Информация об авторах Information about the authors.....	278
Авторларға арналған ережелер Правила для авторов Rules for authors.....	300
Жарияланым этикасы Публикационная этика Publication ethics.....	312

«КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР» СЕКЦИЯСЫ

МРНТИ 50.41.25; 28.23.29

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/6-19>

**Н. Н. Оспанова¹, А. С. Аканова², *М. К. Бейсенов³,
С. Д. Байжуманов⁴, Е. К. Алинов⁵**

^{1,3,4}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

²Астана IT университет, Республика Казахстан, г. Астана;

⁵ИП «RSolutions», Республика Казахстан, г. Павлодар;

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0100-1008>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7178-2121>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0474-5711>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5609-3697>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0086-5415>

*e-mail: meirbek.dev@gmail.com

АРХИТЕКТУРА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ LMS-ПЛАТФОРМЫ ASHYK BILIM НА ОСНОВЕ RAG

Цель исследования данной статьи определить архитектурные особенности и основные технологические решения отечественной LMS-платформы Ashyk Bilim, обосновать выбор технологического стека и оценить целесообразность внедрения системы в организациях высшего и послевузовского образования Республики Казахстан. В работе представлена клиент-серверная архитектура платформы, реализующая полный цикл обучения: от создания курса преподавателем до получения студентом сертификата, а также персональный ИИ-ассистент на основе Retrieval-Augmented Generation (RAG), подключенный к контенту конкретного курса. Рассмотрены организация кода в монорепоzitории Turborepo, разделение клиентской части и серверной части по стандартному контракту OpenAPI, хранение векторных представлений учебных материалов в PostgreSQL с использованием расширения pgvector, обработка асинхронных задач с помощью Redis и Taskiq, а также изолированное выполнение кода студентов в Judge0. Показано, что выбранные технологии обеспечивают масштабируемость,

транзакционную согласованность данных и эмбедингов, суверенитет данных и реализацию языковой политики Казахстана (на трех языках: казахском, русском, английском). В ходе исследования использовались методы анализа программной архитектуры, сравнительного обоснования стека и сопоставления педагогических механизмов платформы с теоретическими положениями зоны ближайшего развития и теории самодетерминации. Результаты пилотного тестирования (110 человек, 39 курсов) подтвердили целесообразность использования полного образовательного цикла, а процент студентов, завершивших отдельные практические курсы, составил от 57,1 % до 68,6 %. Установлено, что внедрение платформы Ashyk Bilim в казахстанских вузах целесообразно с дальнейшим расширением выборки и развитием предиктивной аналитики.

Ключевые слова: образовательная платформа, архитектура программного обеспечения, RAG, FastAPI, Next.js, pgvector, искусственный интеллект, LMS.

Введение

Цифровая трансформация образования и внедрение технологий искусственного интеллекта являются одними из стратегических приоритетов государственной политики Республики Казахстан. Согласно Национальной стратегии крупномасштабной цифровизации и полного внедрения технологий искусственного интеллекта «Digital Qazaqstan» до 2029 года, цифровизация и искусственный интеллект (ИИ) рассматриваются как фундаментальные факторы развития человеческого капитала, включая повышение доступности образования, его персонализацию и формирование у выпускников компетенций в области ИИ [1]. В этих условиях создание отечественных систем управления обучением (LMS) становится актуальным как с теоретической, так и с прикладной точки зрения, поскольку оно решает как проблему суверенитета данных, так и необходимость учета языковых и организационных особенностей национальной системы высшего образования. Зарубежные LMS-платформы хорошо разработаны и обладают богатым функционалом, однако их нельзя просто так внедрить из-за необходимости локализации, размещения данных в соответствии с действующим законодательством, общей стоимости владения и отсутствия интеллектуальных сервисов, адаптированных к содержанию конкретного курса [2]. Между тем отечественные платформы, как правило, не охватывают все этапы образовательного цикла или не имеют педагогически обоснованного ИИ-контура. Платформа «Ashyk Bilim» разработана как полномасштабная

LMS для казахстанских вузов, охватывающая весь образовательный процесс: подготовка преподавателем курса, чтение студентом материалов, выполнение заданий, автоматизированная и экспертная оценка, анализ успеваемости обучающегося и сертификация. Архитектура платформы соответствует принципам разделения ответственности, асинхронной обработки запросов, горизонтальной масштабируемости и наблюдаемости. Ключевым компонентом интеллектуального контура является ИИ-ассистент, использующий технологию Retrieval-Augmented Generation (RAG) и привязанный к содержанию курса [3]. Целью данного исследования является обоснование архитектурного и технологического подхода к разработке платформы «Ashyk Bilim» и оценка перспектив ее внедрения в образовательных организациях Республики Казахстан. Задачи исследования включали: выявление архитектурных особенностей платформы и обоснование целесообразности выбранного технологического стека, а именно разделения клиент-серверной части, RAG-контура и инфраструктурных компонентов; оценку жизнеспособности полного образовательного процесса и потенциала внедрения платформы в вузах Республики Казахстан по результатам пилотного тестирования. Объектом данного исследования является программная архитектура платформы «Ashyk Bilim». Предметом данного исследования является совокупность технических и методических решений, определяющих масштабируемость, безопасность, многоязычность и дидактическую эффективность платформы.

Материалы и методы

В данном исследовании представлены проектирование и анализ программной системы, разработанной в рамках данного исследования, с элементами пилотного тестирования. Методы: анализ программной архитектуры; сравнительное обоснование выбранного технологического стека; сравнение реализованных в системе педагогических механизмов с постулатами теории зоны ближайшего развития [4] и теории самодетерминации [5]; количественная оценка завершения курсов в пилотном контуре. Проект реализован в виде единого монорепозитария с использованием Turbogero в качестве сборщика задач. Репозиторий содержит сервер, написанный на Python, клиент, написанный на TypeScript/React, а также общие правила статического анализа, вспомогательные инструменты разработки и документацию. Turbogero выполняет сборку параллельно, учитывая граф зависимостей между рабочими областями, что значительно ускоряет конвейеры непрерывной интеграции и развертывания [6]. Архитектура следует принципу полного разделения клиентской и серверной частей. Контракт интерфейса между ними определяется стандартом OpenAPI: сервер публикует схему OpenAPI, а клиент импортирует сгенерированные

TypeScript-типы. Это позволяет обеспечить статическую типизацию на уровне системного интерфейса и сократить количество ошибок интеграции при разработке. Инфраструктурный слой состоит из PostgreSQL, Redis и сервиса изолированного выполнения кода Judge0. Для локального развертывания используется Docker Compose. В продакшене сервер и клиент упаковываются в контейнеры. Next.js развертывается в автономном режиме, что позволяет беспрепятственно развертывать его в среде Kubernetes. Общая диаграмма взаимодействия компонентов платформы показана на рис. 1.

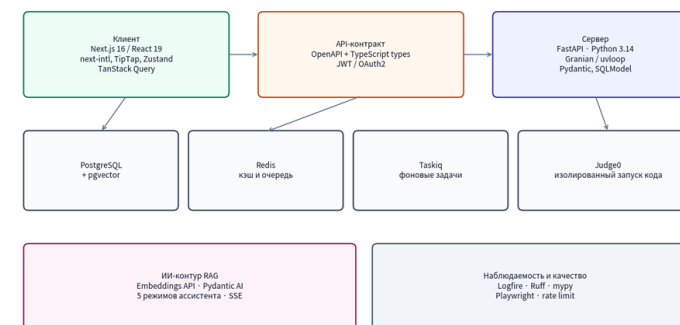


Рисунок 1 – Общая архитектура образовательной платформы «Ashyk Bilim»

Серверная часть проекта реализована на FastAPI и Python 3.14. FastAPI был выбран потому, что он поддерживает асинхронный ввод-вывод «из коробки» (asncio), имеет автоматическую генерацию документации OpenAPI и позволяет валидировать данные с помощью Pydantic [7]. Возможность выполнения асинхронного кода жизненно важна для длительных операций: потоковой генерации ответов ИИ, запросов к базе данных и вызовов внешних API. В качестве HTTP-сервера используется Granian с uvloop. Для работы с базой данных используется комбинация SQLAlchemy и SQLAlchemy; миграции схемы выполняются с помощью Alembic. Среди ключевых миграций следует отметить добавление таблицы document_chunks с типом поля vector из pgvector. Используемый менеджер пакетов – uv. Для фоновых задач используется Taskiq, где в качестве брокера выступает Redis. Клиентская часть разработана с использованием Next.js 16 с App Router и React 19 [8]. С моделью App Router появляется возможность использовать серверные и клиентские компоненты. Серверный компонент не доставляется в браузер и может напрямую запрашивать данные с сервера. Управление состоянием сервера и кэширование запросов выполняются с помощью TanStack Query

[9], клиентское состояние использует Zustand. Редактор учебных материалов основан на TipTap (обертка над ProseMirror) [10]; подсветка синтаксиса выполняется на стороне сервера с помощью Shiki. Интернационализация реализована с помощью next-intl. Она поддерживает три языка: казахский, русский, английский. Формат маршрутизации: `/[locale]/(app)/...`, где locale – первый параметр пути. ИИ-ассистент поддерживает те же языки и автоматически определяет предпочтения пользователя. ИИ-подсистема реализована по схеме RAG [11]. Документы предварительно обрабатываются, разбиваются на семантические фрагменты (tiktoken), векторизуются с помощью API OpenAI Embeddings семейства text-embedding-3 и хранятся в PostgreSQL/pgvector [12]. При поступлении запроса выполняется семантический поиск релевантных фрагментов, после чего языковая модель генерирует ответ в контексте найденных материалов. Оркестрация агентов выполняется с помощью Pydantic AI [13]. Агент поддерживает пять режимов: объяснение материала, редактирование текста студента, перевод, критический анализ и продолжение диалога. Ответ может быть синхронным или потоковым через Server-Sent Events (SSE). Последовательность обработки запроса в RAG-контуре показана на рисунке 2.

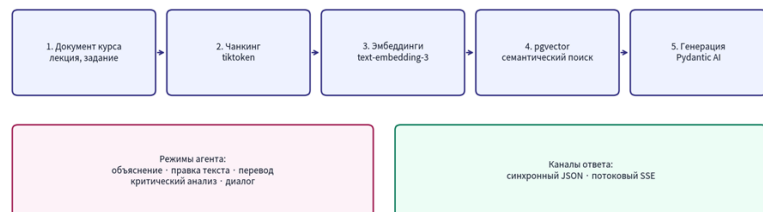


Рисунок 2 – Диаграмма RAG-контура и режимов ИИ-ассистента

Изолированное выполнение кода студентов обеспечивается Judge0: каждое решение запускается в отдельном контейнере с ограничениями по времени и памяти [14]. Мотивационный контур включает систему опыта с квадратичной кривой прогрессии уровней, серии активностей и рейтинги. Аналитический модуль поддерживает выявление точек отвала и прогнозирование итоговых оценок.

Результаты и обсуждение

Принятый набор решений обеспечивает ряд свойств системы, напрямую связанных с целями исследования. Масштабируемость и производительность. Асинхронная модель FastAPI позволяет обслуживать множество длительных соединений, включая потоковую передачу ответов ИИ по SSE, без выделения отдельного потока на каждое соединение. Использование Python 3.14 с

перспективой выполнения без глобальной блокировки интерпретатора (PEP 703) создает условия для реального параллелизма CPU-интенсивных операций (хеширование, пакетная обработка данных). Целостность данных и простота инфраструктуры. Размещение векторного индекса в той же СУБД, что и данные приложения, устраняет необходимость в отдельном векторном хранилище и поддерживает транзакционную согласованность между учебными материалами и их эмбедингами. Многоуровневое кэширование представлений (in-memory cachebox и Redis) снижает нагрузку на внешний API Embeddings. Автоматический размыкатель цепи защищает систему от каскадных сбоев при недоступности внешних сервисов; идемпотентность ключевых операций предотвращает дублирование данных. Педагогическое обоснование ИИ-контура. В отличие от универсальных чат-ботов, ассистент «Ashyk Bilim» работает с фрагментами конкретного курса. Это повышает предметную релевантность ответов и ограничивает галлюцинации модели за счет опоры на извлеченный контекст. С дидактической точки зрения такое взаимодействие соответствует теории зоны ближайшего развития: система выступает в роли более компетентного партнера, направляя студента к самостоятельному освоению материала [4]. Мотивационный контур. Квадратичная кривая прогрессии, серии активностей и рейтинги формируют структуру, соответствующую теории самодетерминации: автономия реализуется через выбор темпа обучения, компетентность – через визуализацию прогресса, а связанность – через социальный контекст рейтингов [5]. Элементы мотивационного контура в интерфейсе платформы показаны на рисунке 3.

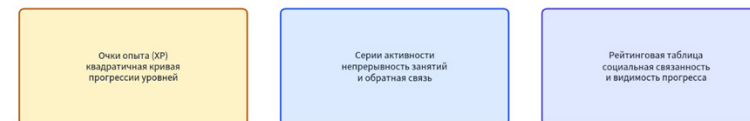


Рисунок 3 – Элементы мотивационного контура платформы

Адаптивность интерфейса. Дизайн-система ShadCN UI и Tailwind CSS обеспечивают гибкие макеты. На мобильных устройствах среда программирования трансформируется из многопанельного режима в полноэкранный с вкладками. Dvh-единицы корректно учитывают системные панели браузера. Ленивая загрузка ресурсоемких модулей (TipTap, аналитика) снижает начальный размер бандла и улучшает метрики Core Web Vitals. Интерфейс студента и адаптация среды программирования на мобильном устройстве показаны на рисунках 4 и 5.

Ashyk Bilim | <https://cs-mooc.tou.edu.kz/>

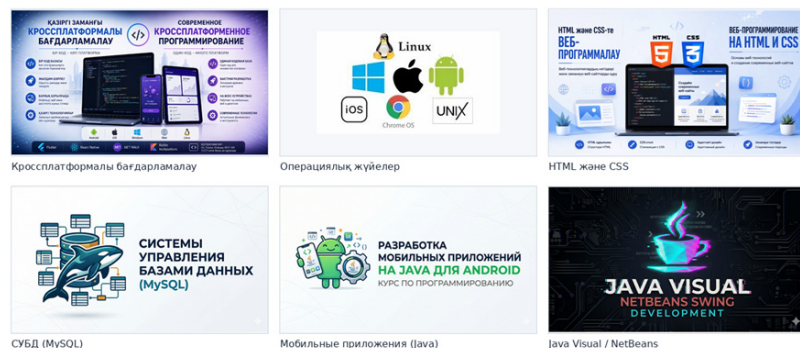


Рисунок 4 – Каталог курсов платформы «Ashyk Bilim»
(<https://cs-mooc.tou.edu.kz/>)



Рисунок 5 – Мобильный вид каталога курсов платформы «Ashyk Bilim»

Обеспечение качества и безопасность. Серверный код проверяется Ruff, а также тремя статическими типизаторами (myru, basedpyright, pyrefly).

Граница API защищена контрактными тестами; сквозное тестирование выполняется Playwright. Аутентификация построена на fastapi-users и JWT, поддерживая локальный вход и OAuth2 (Google). Ролевая модель ограничивает права доступа; ограничитель скорости с скользящим окном на Redis снижает риск перебора паролей. Наблюдаемость обеспечивается Logfire. Результаты пилотного тестирования сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 – Показатели пилотного тестирования платформы «Ashyk Bilim»

Показатель	Значение
Число пользователей	110
Соотношение преподаватели: студенты	30 : 70
Всего курсов / готовых к публикации	39 / 15
Завершаемость курса «Blender-де 3D модельдеу және текстуралау»	68,6 %
Завершаемость курса «VR разработка»	57,1 %

Соотношение преподавателей и студентов составило 30:70. Полный цикл от создания курса до выдачи сертификата был воспроизведен без разрыва технологической цепочки. Аналитический модуль позволил выявить активности с наибольшим количеством прерываний и скорректировать сложность соответствующих разделов. Экран аналитики по точкам отвала показан на рисунке 6.

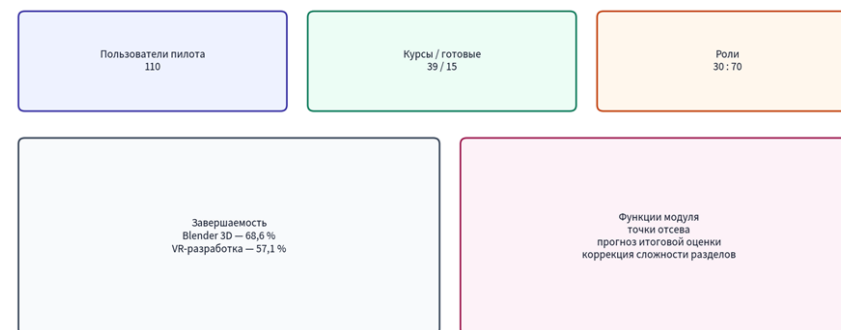


Рисунок 6 – Панель аналитики образовательного процесса и точек отвала

Полученные показатели завершения следует интерпретировать с осторожностью: выборка ограничена пилотным контуром, курсы являются практически ориентированными техническими дисциплинами, и отсутствует

контрольная группа для сравнения. Тем не менее, данные подтверждают фундаментальную работоспособность архитектуры и пригодность аналитического контура для управления качеством курсов. Таким образом, обе исследовательские задачи были решены. Выявлены архитектурные принципы платформы и обоснована целесообразность технологического стека с учетом требований асинхронности, типобезопасности контракта API, транзакционной согласованности векторного поиска и изоляции выполнения кода. На основе полученных данных в ходе пилотного тестирования подтверждена работоспособность всего образовательного цикла и целесообразность внедрения разработанной системы в сфере высшего образования Республики Казахстан.

Информация о финансировании

Данная статья выполнена в рамках грантового финансирования проекта (№ AP23485289), выделенного Научным комитетом Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Выводы

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

Платформа «Ashyk Bilim» обеспечивает полный цикл управления образованием в рамках клиент-серверной архитектуры, основанной на стандартизированном контрактном API (OpenAPI), монорепозитории, построенном с использованием TurboRepo, а также контейнеризированном слое инфраструктуры.

Выбор перечисленных технологий (FastAPI, Next.js 16, PostgreSQL/pgvector, Redis/Taskiq, Judge0) обоснован с учетом требований к обработке асинхронных нагрузок, обеспечению типобезопасности, поддержанию согласованности данных, выполнению фоновых операций, а также обеспечению безопасности выполнения кода студентов.

Встраивание учебных материалов, хранящихся в PostgreSQL с использованием расширения pgvector, позволяет оперативно осуществлять RAG-контур без дополнительного внедрения внешней системы управления векторными базами данных и гарантирует транзакционную целостность данных, что можно считать значимым архитектурным решением.

Использование ИИ-ассистента, учитывающего содержание курса, и применение принципов геймификации с учетом принципов теории самодетерминации повышает добавленную стоимость системы по сравнению с универсальными чат-системами.

Пилотное тестирование (110 пользователей, 39 курсов) подтверждает реализуемость описанных технических решений, а также работоспособность полного образовательного цикла и целесообразность внедрения платформы в

сфере высшего образования Республики Казахстан при условии расширения выборки и реализации разработки предиктивной аналитики.

Научная новизна представленной работы заключается в том, что впервые описана полномасштабная система управления обучением (LMS) отечественного производства, где все ключевые компоненты (RAG-контур, многоязычный интерфейс, средства вовлечения студентов) объединены в единую масштабируемую архитектуру с акцентом на обеспечение суверенитета данных. Практическая значимость исследования обусловлена возможностью применения полученных технических решений при разработке национальных образовательных платформ. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением числа пользователей, участвующих в тестировании разработанной образовательной платформы, количественной оценкой влияния ИИ-ассистента на академическую успеваемость, совершенствованием предиктивной модели прогнозирования отсева студентов из образовательного процесса и расширением использования ИИ-сервисов в образовательном процессе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Об утверждении Общенациональной стратегии масштабной цифровизации и тотального внедрения технологий искусственного интеллекта «Digital Qazaqstan» до 2029 года: Указ Президента Республики Казахстан от 9 июня 2026 года № 1311 [Электронный ресурс]. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2600001311>

2 **Bradley V. M.** Learning Management System (LMS) Use with Online Instruction // International Journal of Technology in Education. – 2021. – Vol. 4, No. 1. – P. 68–92. – <https://doi.org/10.46328/ijte.36>

3 **Lewis P., Perez E., Piktus A. et al.** Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – Vol. 33. – P. 9459–9474.

4 **Vygotsky L. S.** Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes. Cambridge : Harvard University Press, 1978. –159 p.

5 **Deci E. L., Ryan R. M.** The «What» and «Why» of Goal Pursuits: Human Needs and the Self-Determination of Behavior // Psychological Inquiry. – 2000. – Vol. 11, No. 4. – P. 227–268. – https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01

6 TurboRepo Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://turbo.build/repo/docs> (Date of access: 10.09.2026).

7 FastAPI Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://fastapi.tiangolo.com> (Date of access: 10.09.2026).

- 8 Next.js Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://nextjs.org/docs> (Date of access: 10.09.2026).
- 9 TanStack Query Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://tanstack.com/query> (Date of access: 10.09.2026).
- 10 TipTap Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://tiptap.dev> (Date of access: 10.09.2026).
- 11 **Lewis P., Perez E., Piktus A. et al.** Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – Vol. 33. – P. 9459–9474.
- 12 pgvector: Open-source vector similarity search for Postgres. [Electronic resource]. – URL: <https://github.com/pgvector/pgvector> (Date of access: 10.09.2026).
- 13 Pydantic AI Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://ai.pydantic.dev> (Date of access: 10.09.2026).
- 14 Judge0 CE Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://judge0.com> (Date of access: 10.09.2026).

REFERENCES

1 Ob utverzhdenii Obshhenacional'noj strategii masshtabnoj cifrovizatsii i total'nogo vnedreniya tekhnologiy iskusstvennogo intellekta «Digital Qazaqstan» do 2029 goda: Ukaz Prezidenta Respubliki Kazaxstan ot 9 iyunya 2026 goda № 1311 [On the Approval of the National Strategy for Large-Scale Digitalization and the Comprehensive Implementation of Artificial Intelligence Technologies «Digital Qazaqstan» through 2029: Decree of the President of the Republic of Kazakhstan No. 1311 dated June 9, 2026] [Electronic resource]. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2600001311>

2 **Bradley V. M.** Learning Management System (LMS) Use with Online Instruction // International Journal of Technology in Education. – 2021. – Vol. 4, No. 1. – P. 68–92. – <https://doi.org/10.46328/ijte.36>

3 **Lewis P., Perez E., Piktus A. et al.** Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – Vol. 33. – P. 9459–9474.

4 **Vygotsky L. S.** Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes. Cambridge : Harvard University Press, 1978. – 159 p.

5 **Deci E. L., Ryan R. M.** The “What” and “Why” of Goal Pursuits: Human Needs and the Self-Determination of Behavior // Psychological Inquiry. – 2000. – Vol. 11, No. 4. – P. 227–268. – https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01

6 TurboRepo Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://turbo.build/repo/docs> (Date of access: 10.09.2026).

- 7 FastAPI Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://fastapi.tiangolo.com> (Date of access: 10.09.2026).
- 8 Next.js Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://nextjs.org/docs> (Date of access: 10.09.2026).
- 9 TanStack Query Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://tanstack.com/query> (Date of access: 10.09.2026).
- 10 TipTap Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://tiptap.dev> (Date of access: 10.09.2026).
- 11 **Lewis P., Perez E., Piktus A. et al.** Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // Advances in Neural Information Processing Systems. 2020. Vol. 33. P. 9459–9474.
- 12 pgvector: Open-source vector similarity search for Postgres [Electronic resource]. – URL: <https://github.com/pgvector/pgvector> (Date of access: 10.09.2026).
- 13 Pydantic AI Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://ai.pydantic.dev> (Date of access: 10.09.2026).
- 14 Judge0 CE Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://judge0.com> (Date of access: 10.09.2026).

Поступило в редакцию 07.08.26.

Поступило с исправлениями 07.08.26.

Принято в печать 10.09.26.

*Н. Н. Оспанова¹, А. С. Ақанова², *М. К. Бейсенов³,*

С. Д. Байжуманов⁴, Е. К. Алинов⁵

^{1,3,4}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

²Астана ІТ университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

⁵«RSolutions» ЖК, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

07.08.26 ж. баспаға түсті.

07.08.26 ж. түзетулерімен түсті.

10.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

RAG НЕГІЗІНДЕГІ АШЫҚ БІЛІМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ LMS ПЛАТФОРМАСЫНЫҢ АРХИТЕКТУРАСЫ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ШЕШІМДЕРІ

Осы мақаланы Зерттеудің мақсаты Ashyk Bilim отандық LMS-платформасының архитектуралық ерекшеліктері мен негізгі технологиялық шешімдерін айқындау, технологиялық стекті таңдауды негіздеу және Қазақстан Республикасының жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру ұйымдарында жүйені енгізудің

орындылығын бағалау. Жұмыста оқытушының курсты құрудан бастап студенттің сертификат алуына дейін, сондай-ақ белгілі бір курстың мазмұнына қосылған Retrieval-Augmented Generation (RAG) негізінде дербес AI-ассистенті сияқты оқытудың толық циклін іске асыратын платформаның клиент-серверлік архитектурасы ұсынылған. Turborepo монорепозиторийінде кодты ұйымдастыру, оренари стандартты келісімшарты бойынша клиенттік бөлік пен серверді бөлу, pgvector кеңейтімін қолдана отырып, PostgreSQL-де оқу материалдарының векторлық көріністерін сақтау, Redis және Taskiq көмегімен асинхронды тапсырмаларды оңдеу және judge0-де студенттік кодты оқшаулау қарастырылады. Таңдалған технологиялар ауқымдылықты, деректер мен эмбедингтердің транзакциялық келісімділігін, деректердің егемендігін және Қазақстанның тіл саясатын іске асыруды қамтамасыз ететіні көрсетілген (үш тілде: қазақ, орыс, ағылшын). Зерттеу барысында бағдарламалық архитектураны талдау, стекті салыстырмалы негіздеу және платформаның педагогикалық механизмдерін жақын даму аймағының теориялық ережелерімен және өзін-өзі анықтау теориясымен салыстыру әдістері қолданылды. Пилоттық тестілеу нәтижелері (110 адам, 39 курс) толық білім беру циклін қолданудың орындылығын растады, ал жекелеген практикалық курстарды аяқтаған студенттердің пайызы 57,1 %-дан 68,6 %-ға дейін болды. Қазақстандық жоғары оқу орындарында Ashyk Bilim платформасын енгізу іріктеуді одан әрі кеңейтумен және болжамды талдауды дамытумен орынды екені анықталды.

Кілтті сөздер: білім беру платформасы, бағдарламалық жасақтама архитектурасы, RAG, FastAPI, Next.js, pgvector, жасанды интеллект, LMS.

N. N. Ospanova¹, A. S. Akanova², *M. K. Beisenov³,
S. D. Baizhumanov⁴, E. K. Alinov⁵

^{1,3,4}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

²Astana IT University, Republic of Kazakhstan, Astana;

⁵«RSolutions» IE, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 07.08.26.

Received in revised form 07.08.26.

Accepted for publication 10.09.26.

ARCHITECTURE AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF THE ASHYK BILIM INTELLIGENT LMS PLATFORM BASED ON RAG

The purpose of the research in this article is to identify the architectural features and main technological solutions of the domestic Ashyk Bilim LMS platform, to justify the choice of a technology stack and to evaluate the feasibility of implementing the system in higher and postgraduate education organizations in the Republic of Kazakhstan. The paper presents the client-server architecture of the platform, which implements a full learning cycle: from creating a course by a teacher to obtaining a student certificate, as well as a personal AI assistant based on Retrieval-Augmented Generation (RAG), connected to the content of a specific course. The organization of the code in the Turborepo monorepository, the separation of the client and server parts according to the standard OpenAPI contract, the storage of vector representations of educational materials in PostgreSQL using the pgvector extension, the processing of asynchronous tasks using Redis and Taskiq, as well as the isolated execution of student code in Judge0 are considered. It is shown that the selected technologies ensure scalability, transactional consistency of data and embeddings, data sovereignty and the implementation of Kazakhstan's language policy (in three languages: Kazakh, Russian, English). The research used methods of analyzing the software architecture, comparative justification of the stack, and comparison of the pedagogical mechanisms of the platform with the theoretical provisions of the zone of proximal development and the theory of self-determination. The results of the pilot testing (110 people, 39 courses) confirmed the feasibility of using a full educational cycle, and the percentage of students who completed individual practical courses ranged from 57.1 % to 68.6 %. It has been established that the introduction of the Ashyk Bilim platform in Kazakhstani universities is advisable with the further expansion of the sample and the development of predictive analytics.

Keywords: educational platform, software architecture, RAG, FastAPI, Next.js, pgvector, artificial intelligence, LMS.

Н. К. Саевченко¹, *Ю. К. Шакирова², И. Д. Корляков³

^{1,2,3}Карагандинский технический

университет имени Абылкаса Сагинова,

Республика Казахстан, г. Караганда.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3750-1012>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2583-1751>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2099-1661>

*e-mail: uliya_sch@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ

Ручное распределение инцидентов и задач разработки в крупных организациях неизбежно приводит к срыву сроков (SLA) и когнитивной перегрузке диспетчеров. В настоящей работе исследуется проблема автоматизации данного процесса посредством методов машинного обучения (ML) и обработки естественного языка (NLP). Проведен критический разбор и сравнение классических частотных алгоритмов (TF-IDF) с современными нейросетевыми архитектурами на базе трансформеров (семейство BERT). Особое внимание уделено эмуляции векторных баз данных (алгоритм k-NN) для реализации парадигмы семантического поиска.

Главный эмпирический вывод исследования: специфика доменной области критически влияет на качество предсказаний. Предобученные языковые модели «из коробки» без целевого дообучения (fine-tuning) катастрофически уступают классическим алгоритмам из-за незнания локальной терминологии. Экспериментально подтверждено, что адаптация весов нейросети под внутренний корпоративный сленг позволяет поднять Ассигасу на 30 сильно несбалансированных классах с 41.5 % до 48.4 %. Боле того, гибридный метод (Fine-Tuned BERT в связке с k-NN) при сопоставимой точности (47.1%) решает проблему «черного ящика», обеспечивая высокую интерпретируемость (Explainable AI) и устойчивость архитектуры к ротации ИТ-кадров.

Ключевые слова: машинное обучение, обработка естественного языка (NLP), векторные базы данных, BERT, TF-IDF, классификация текстов, автоматизация Service Desk, Explainable AI.

Введение

Цифровизация бизнес-процессов, в особенности в реалиях казахстанского корпоративного сектора с его плотной интеграцией с государственными сервисами – порталы ЭСФ, СНТ, Госзакупки, – привела к кратному росту нагрузки на внутренние ИТ-подразделения. В большинстве современных трекинговых систем, будь то Jira, Redmine или специализированные HelpDesk-решения, первичная маршрутизация тикетов до сих пор остается ручной рутинной. Диспетчер или Team Lead вынужден читать каждую заявку и, опираясь на свой субъективный опыт, решать, кому из инженеров ее передать. С ростом объема входящих запросов этот узел становится главным «бутылочным горлышком» всего ITSM-процесса. Ошибки маршрутизации множатся. Система рушится. Заявка, попавшая по ошибке или недосмотру не к тому специалисту, может сутками висеть в статусе ожидания, нарушая жесткие рамки согласованного SLA. Возникает острая необходимость в автоматизации процессов назначения, где на помощь приходят алгоритмы искусственного интеллекта [1].

Однако практическая имплементация ML-моделей для парсинга текста заявок неизбежно наталкивается на ряд фундаментальных барьеров, которые, к сожалению, крайне редко описываются в тепличных академических датасетах, но при этом повсеместно и ежедневно встречаются в реальном, жестком бизнесе.

Во-первых, это экстремальный дисбаланс классов, так называемая проблема длинного хвоста. Исторически сложилось так, что нагрузка в ИТ-отделах распределяется неравномерно. Это факт. Ключевые архитекторы и Senior-разработчики закрывают сотни критических тасков, тогда как специалисты первой линии или стажеры могут иметь в активе лишь единицы решенных заявок. Подобный перекоп порождает сильный, практически непреодолимый bias базового классификатора: неопытная модель пытается максимизировать общую метрику, банально назначая абсолютно все новые задачи на самых продуктивных и загруженных сотрудников [2].

Во-вторых, камнем преткновения становится узкоспециализированный вокабуляр. Корпоративные заявки – это далеко не литературный русский язык. Это большая смесь аббревиатур, кодов системных ошибок, специфических названий продуктов, навроде «УТП для Казахстана», «ЗУП» или «ЕРДР», а также искаженных наименований контрагентов, например

«ТОО Рога и копыта». Универсальные NLP-модели, кропотливо обученные на выверенных статьях Википедии, этого языка просто не понимают. Они на них путаются.

В-третьих, ситуацию усугубляет тотальная фрагментарность текстовых артефактов. Культура заведения заявок рядовыми пользователями зачастую оставляет желать лучшего, поэтому нередко случаи, когда поле описания содержит лишь обрывочное «ошибка базы» или «доработать отчет». Основная же фактура, критически важная для работы аналитика, обычно кроется в прикрепленных файлах или, что еще хуже, в размытых скриншотах [3].

Цель нашего исследования – разработать отказоустойчивую ML-модель, способную с высокой точностью определять оптимального исполнителя исключительно на базе скудных текстовых метаданных заявки, а также провести стресс-тест различных архитектур классификации на реальном, «грязном» датасете.

Материалы и методы

Эмпирической базой послужил массив исторических данных, выгруженный из реально действующей системы учета задач. Исходный сырой дамп насчитывал более 21 000 строк.

Первый этап разведочного анализа, сокращенно EDA, показал высокую степень интерференции: в базе вперемешку лежали заявки АХО, юристов, бухгалтерии и программистов. Чтобы алгоритм не искал ложных корреляций, проведена жесткая фильтрация. Оставлены только таски целевого подразделения – отдел разработки, что резко сузило выборку до 8 789 записей.

Далее мы столкнулись с проблемой отсутствующего контекста. В изначальном виде поле «Описание задачи» оказалось нерелевантным: почти в 40 % случаев его длина не превышала 20 символов. Изначально рассматривалась амбициозная гипотеза о внедрении модулей оптического распознавания OCR для вытягивания текста из вложенных PDF-файлов и сканов, однако от этой идеи пришлось быстро отказаться из-за неадекватно высоких вычислительных затрат инфраструктуры, а также из-за того, что в подавляющем большинстве заявок просто не были приложены файлы (они присутствовали в менее 10 процентах задач).

Вместо этого было решено применить агрессивный Feature Engineering. Мы взяли разрозненные строковые атрибуты, такие как «Вид Задания», наименование «Клиента», тему, текст самой заявки и поле «Заметки Руководителя», по возможности очистили их от стоп-слов, спецсимволов и HTML-тегов, привели к нижнему регистру и соединили в единый текстовый монолит. Полученный текст был аугментирован в колонку full_text.

Этот простой, но на удивление элегантный шаг решил проблему пустых описаний, дав NLP-моделям достаточный контекст для зацепки.

Для стабилизации же градиентов при обучении из датасета были хирургически удалены исполнители-аномалии (те, кто выполнил менее 50 задач за весь исследуемый период, который составил около 10 лет). Прогнозировать вероятности для статистического шума бессмысленно [4].

Финальный, вычищенный датасет сократился до 8136 качественных записей. Количество уникальных классов составило 30 человек. Разделение на обучающий (Train) и валидационный (Test) сетки проводилось в пропорции 80/20 с обязательной стратификацией, чтобы редкие специалисты случайно не выпали из тестовой выборки [5].

В рамках настоящего эксперимента мы пошли по пути последовательного усложнения архитектуры, протестировав несколько принципиально разных подходов к извлечению признаков. Отправной точкой и надежным бейзлайном послужила классическая статистическая классификация на базе старого но все еще действенного алгоритма TF-IDF (Term Frequency – Inverse Document Frequency). Данный метод отлично, словно рентгеновский сканер, выявляет слова, аномально часто встречающиеся в конкретном документе, но редко – во всем остальном корпусе текстов. В нашем случае были извлечены униграммы и биграммы с жестким ограничением словаря до топа из 5000 наиболее информативных фичей. Классификатором в этой связке выступила Логистическая регрессия. Она работает быстро, но эффективно. Чтобы хоть как-то скомпенсировать дикий перекося в данных, использовался параметр балансировки весов (class_weight='balanced'), который математически жестоко штрафует алгоритм за малейшие ошибки на миноритарных классах [6].

Далее мы решили проверить гипотезу о безусловном превосходстве глубокого семантического анализа, задействовав Generic NLP – трансформеры из коробки. Использовалась легковесная, но весьма эффективная для своих задач модель cointegrated/rubert-tiny2. Тексты конвертировались в плотные векторные представления, так называемые эмбединги, с фиксированной размерностью в 312 признаков. Эти абстрактные числовые векторы затем скамливались всё той же Логистической регрессии.

Третьим шагом стала полноценная эмуляция семантического поиска через векторную БД. Здесь мы отказались от линейного классификатора: вместо этого векторы от базового BERT проецировались напрямую в многомерное пространство. Идентификация оптимального исполнителя для каждого нового тикета происходила алгоритмически прозрачно, через поиск k-ближайших соседей, она же k-NN с вычислением косинусного расстояния при k=5. Это, по сути, чистая эмуляция стремительно набирающего

популярность RAG-подхода, суть которого сводится к умному поиску исторических прецедентов.

Наконец, концом эксперимента стала Fine-Tuning и гибридная модель. Проблема заключалась в том, что базовый gubert-tiny2 абсолютно не знал нашего корпоративного сленга. Он был слеп. Поэтому мы провели его глубокое дообучение непосредственно на собранном корпусе грязных задач, прикрутив сверху классификационную «голову» на 30 выходных нейронов. Процесс шел с использованием оптимайзера AdamW, функции потерь Cross-Entropy Loss и обязательного механизма ранней остановки на пятой эпохе без улучшений во избежание фатального переобучения сетей. После этого новые, контекстно-осведомленные эмбединги были аккуратно извлечены и снова пропущены через алгоритм k-NN, что в итоге и сформировало наш пятый, гибридный метод классификации [7].

Результаты и обсуждение

Замеры метрик проводились на отложенной выборке из 1628 задач. Базовыми критериями оценки выступили Accuracy и Macro Avg F1-score. Мы сознательно ориентируемся на Macro F1, так как эта метрика уравнивает в правах Senior-разработчика с тысячей тикетов и Junior-специалиста с двумя десятками. Для контекста: слепое случайное угадывание из 30 вариантов дает точность около 3.3 %.

Сводные результаты тестирования представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сравнительного анализа ML-моделей

Модель/Подход	Извлечение признаков	Модель классификации	Accuracy	Macro F1
Baseline	TF-IDF	Logistic Regression	0.4152	0.35
Generic NLP	Предобученный BERT	Logistic Regression	0.2819	0.24
Semantic Search	Предобученный BERT	k-NN	0.3729	0.31
Fine-Tuning	Дообученный BERT	Sequence Classifier	0.4840	0.46
Hybrid	Дообученный BERT	k-NN	0.4705	0.33

Детальная интерпретация выявленных аномалий представляет особый интерес для инженеров данных. Прежде всего, в глаза бросается ярко выраженный феномен так называемого Domain Shift. Наблюдается парадоксальная, на первый, неискушенный взгляд, картина. Архаичный алгоритм TF-IDF с его 41.5 % точности на голову разбил современную, распиаренную языковую модель общего назначения, выдавшую жалкие 28.1 %. Почему так произошло? Ответ прост. TF-IDF работает как простой,

но предельно жесткий сканер паттернов. Если в тексте есть маркер «ТОО Альфа» или системная ошибка «НДС не рассчитан», частотный алгоритм моментально, без лишних раздумий связывает это с конкретным аналитиком. Предобученный BERT же вел себя иначе. Он упорно пытался искать глубокий философский смысл и скрытый контекст в фрагменте оборванного кода из логов 1С. Разумеется, не найдя знакомых токенов в своем словаре, он просто размывал векторы. И часто на это ошибался. Это яркое, неоспоримое подтверждение давнего тезиса о том, что трансформеры абсолютно беспомощны в узких нишах без предварительной тонкой настройки [8].

С другой стороны, мы зафиксировали настоящий триумф дообучения. Целенаправленная адаптация весов нейросети под наш специфический лексикон произвела фурор. Fine-Tuning подбросил общую точность до 48.4 %. Это не просто формальный прирост в 7 % по сравнению с базовой статистической моделью. Самое важное и методологически ценное кроется в скачке метрики Macro F1: с 0.35 у бейзлайна до 0.46. Модель реально научилась выделять абстрактные, скрытые признаки задач. Она стала справедливо отдавать тикеты специалистам с малым историческим бэкграундом, перестав, наконец, слепо передавать всю работу на медиану, то есть в нашем случае опытных сеньоров [9].

Что касается гибридной связки (Дообученный BERT + k-NN), то она продемонстрировала интересный архитектурный компромисс, выдав 47.05 %. Да, она чуть-чуть уступила чистому нейросетевому классификатору на статистически незначимые 1.35 %. Это можно списать на погрешность. Однако именно этот комбинированный подход обладает поистине феноменальной практической ценностью для запуска в суровый продакшен из-за легкости в поддержке и дообучения налету [10].

Выводы

Результаты экспериментов окончательно разрушают миф об универсальности современных ИИ-моделей в корпоративном секторе. Стратегия «взял готовую модель из HuggingFace и пустил в бой» на узкоспециализированных данных неизменно приводит к деградации метрик на 13 % даже по сравнению с алгоритмами двадцатилетней давности. Fine-tuning на внутренних исторических данных – не опция, а суровая бизнес-необходимость.

Несмотря на номинальное абсолютное лидерство классификатора по метрике Accuracy, для фактического внедрения в реальный бизнес-процесс мы однозначно рекомендуем использовать гибридный векторный метод. Этому есть два весьма критических обоснования.

Первое – это прозрачность принимаемых алгоритмом решений, также известная в научном мире как Explainable AI. Бизнес органически не переваривает «черные ящики». Если слепой классификатор просто сухо выдает фамилию Иванов, любой опытный диспетчер неизбежно усомнится в адекватности алгоритма. Векторный же поиск k-NN работает совершенно иначе. Он способен наглядно показать на экране диспетчера живое обоснование: «Я предлагаю назначить эту сложную задачу на Иванова, потому что вот лежат три абсолютно таких же исторических тикета за прошлый год, которые этот человек успешно и быстро закрыл». Согласитесь, это работает лучше. Это формирует реальное доверие пользователя к автоматизированной системе.

Второе обоснование заключается в изоляции от неизбежной ротации кадров, то есть в реализации концепции Lazy Learning. Классическую глубокую нейросеть при каждом увольнении сотрудника или при плановом найме нового отдела придется каждый раз переобучать заново практически с нуля, мучительно пересчитывая градиенты на огромных и дорогих серверных кластерах. Дорого и долго. В парадигме же векторных баз данных все решается изящно и просто: достаточно закинуть готовые эмбединги исторических задач новичка в общий индекс (Vector Store). Система тут же начнет учитывать его при распределении заявок «на лету», в реальном времени и без единого ресурсоемкого ретрейна.

В перспективе планируется расширить конвейер за счет интеграции пайплайна с мультимодальными моделями, они же Vision Language Models, для автоматизированного чтения скриншотов с ошибками пользователей и интеграции приложенных к задачам файлов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Bhattacharya, P., Neamtiu, I., Shelton, C. R.** Automated, Highly-Accurate, Bug Assignment Using Machine Learning and Tossing Graphs // Journal of Systems and Software. – 2012. – Vol. 85, No. 10. – P. 2275–2292. – <https://doi.org/10.1016/j.jss.2012.04.053>
- 2 **He, H., Garcia, E. A.** Learning from Imbalanced Data // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2009. – Vol. 21, No. 9. – P. 1263–1284. – <https://doi.org/10.1109/TKDE.2008.239>
- 3 **Manning, C. D., Raghavan, P., Schütze, H.** Introduction to Information Retrieval. – Cambridge : Cambridge University Press, 2008. – XXI, 482 p. – ISBN 978-0-521-86571-5.
- 4 **Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., Toutanova, K.** BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings

of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. – Vol. 1. – Minneapolis, MN : Association for Computational Linguistics, 2019. – P. 4171–4186. – <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>

5 **Giggs, D. R.** Understanding Semantic Search: Vector Embeddings and Similarity Search [Electronic resource] // DEV Community. – 2026. – 2 February. – [Electronic resource]. – URL: <https://dev.to/derrickryangiggs/understanding-semantic-search-vector-embeddings-and-similarity-search-2ahp>

6 Digital Divide Data. Advanced Fine-Tuning Techniques For Domain-Specific Language Models [Electronic resource]. – 2025. – URL: <https://www.digitaldividedata.com/blog/fine-tuning-techniques-for-domain-specific-language-models>

7 **Loshchilov, I., Hutter, F.** Decoupled Weight Decay Regularization // Proceedings of the 7th International Conference on Learning Representations (ICLR 2019). – New Orleans, LA, 2019.

8 **Sharma, A., Gupta, R.** An Enhanced K-NN Algorithm Leveraging BERT Techniques for Resume Parsing System // Asian Journal of Research in Computer Science. – 2025.

9 **Almeida, J. R. et al.** Using Transfer Learning Approach to Implement Convolutional Neural Network model to Recommend Airline Tickets by Using Online Reviews (BERT vs TF-IDF comparison) // IEEE Conference Proceedings. – 2020. – [Electronic resource]. – URL: https://www.researchgate.net/figure/BERT-vs-tf-idf-comparison_fig3_346831124

10 **Johnson, J., Douze, M., Jégou, H.** Billion-scale similarity search with GPUs // IEEE Transactions on Big Data. – 2021. – Vol. 7, No. 3. – P. 535–547. – <https://doi.org/10.1109/TBDATA.2019.2921572>

Поступило в редакцию 27.02.26.

Поступило с исправлениями 17.03.26.

Принято в печать 04.06.26.

Н. К. Савченко¹, *Ю. К. Шакирова², И. Д. Корляков³

^{1,2,3}Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

27.02.26 ж. баспаға түсті.

17.03.26 ж. түзетулерімен түсті.

04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ТАПСЫРМА БЕРУ МӘСЕЛЕСІНДЕ МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Ірі ұйымдарда АТ-инциденттерін және әзірлеу тапсырмаларын қолмен бөлу мерзімдердің бұзылуына (SLA) және диспетчерлердің когнитивтік шамадан тыс жүктелуіне сөзсіз әкеледі. Бұл жұмыста машиналық оқыту (ML) және табиғи тілді өңдеу (NLP) әдістері арқылы осы процесті автоматтандыру мәселесі зерттеледі. Классикалық жиілік алгоритмдері (TF-IDF) мен трансформерлер базасындағы заманауи нейросетілік архитектураларға (BERT отбасы) сыни талдау жасалып, өзара салыстырылды. Семантикалық іздеу парадигмасын іске асыру үшін векторлық деректер базаларын эмуляциялауға (k -NN алгоритмі) ерекше назар аударылды.

Зерттеудің басты эмпирикалық қорытындысы: домендік ерекшелік болжам сапасына тікелей әсер етеді. Мақсатты түрде қосымша оқытусыз (fine-tuning) «дайын күйінде» қолданылатын алдын ала оқытылған тілдік модельдер жергілікті терминологияны білмегендіктен, классикалық алгоритмдерден катастрофика түрде қалып қояды. Нейросетінің салмақтарын ішкі корпоративтік сөзгеке бейімдеу 30 қатты теңгерімсіз класс бойынша дәлдікті (Accuracy) 41.5 %-дан 48.4 %-ға дейін арттыруға мүмкіндік беретіні тәжірибе жүзінде расталды. Сонымен қатар, гибридті әдіс (Fine-Tuned BERT және k -NN байланысы) салыстырмалы дәлдікте (47.1 %) «қалай жәшік» мәселесін шешіп, жоғары түсіндірмелілікті (Explainable AI) және архитектураның IT-кадрлар ротациясына төзімділігін қамтамасыз етеді.

Кілтті сөздер: машиналық оқыту, табиғи тілді өңдеу (NLP), векторлық деректер базасы, BERT, TF-IDF, мәтінді жіктеу, Service Desk автоматтандыру, Explainable AI.

N. K. Savchenko¹, *Y. K. Shakirova², I. D. Korlyakov³

^{1,2,3} Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.

Received 27.02.26.

Received in revised form 17.03.26.

Accepted for publication 04.06.26.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MACHINE LEARNING METHODS IN THE PROBLEM OF AUTOMATED TASK ASSIGNMENT

The manual assignment of incidents and development tasks in large organizations inevitably leads to SLA breaches and cognitive overload for dispatchers. This paper investigates the problem of automating this process using Machine Learning (ML) and Natural Language Processing (NLP) techniques. A critical review and comparison of classical frequency-based algorithms (TF-IDF) with modern transformer-based neural network architectures (BERT family) is presented. Special attention is given to the emulation of vector databases (k -NN algorithm) to implement the semantic search paradigm. The main empirical finding of the study reveals that domain specificity critically affects prediction quality. Pre-trained language models used «out-of-the-box» without target fine-tuning catastrophically underperform compared to classical algorithms due to their inability to recognize local terminology. It was experimentally confirmed that adapting the neural network weights to internal corporate language allows for an increase in Accuracy across 30 highly imbalanced classes from 41.5 % to 48.4 %. Furthermore, the hybrid method (Fine-Tuned BERT coupled with k -NN), while providing comparable accuracy (47.1 %), resolves the «black box» issue by ensuring high interpretability (Explainable AI) and structural resilience to IT staff turnover.

Keywords: machine learning, natural language processing, vector databases, BERT, TF-IDF, text classification, service desk automation, Explainable AI.

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/30-44>

***Sagar Chhabriya¹, Hanseeka Dhingana²,
Noor Nabi Dahar³, Abdul Qadir⁴**

^{1,2,3,4}Department of Computer Science,
Sukkur IBA University, Pakistan, Sindh.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5416-0045>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1503-2101>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3499-1954>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0506-2417>

*e-mail: sagarchhabriya.bsckdkf22@iba-sukkur.edu.pk

HIREBASE: A CLOUD-NATIVE PLATFORM FOR AI-ASSISTED RECRUITMENT WITH A VOICE INTERVIEW AGENT

Hiring is still one of the most manual parts of running an organization. Recruiters then manually read through the piles of resumes, follow up with candidates through email for tests and interview appointments, and evaluate first round interviews based on a gut feeling for the right candidate. The tools developed to rectify this one by one are limited in their scope, e.g. a job board, a keyword-matching ATS. The other part of the process remains in spreadsheets and inboxes. To address this need, we've designed and deployed a cloud-native recruitment platform, Hirebase, to close this gap. Publish jobs, score candidates using a large language model (LLM) on resumes, assess candidates with timed performance-based tests and automatically grade, and interview candidates in the first round using a real-time voice AI agent (all within a single system) with recruiters having the final say on all hires. The platform is built with a React/TypeScript front-end, a FastAPI back-end, and Supabase for the PostgreSQL Database and object storage, a dedicated LiveKit voice-agent worker, and an auto-deploying CI/CD pipeline to Vercel, Azure App Service, and Azure Container Instances. Describe the system architecture, engineering decisions made, and results of testing the system end-to-end. We also cover the areas where we believe the platform is lacking and what we believe should be built next! We will not be providing some single algorithm, but instead a working, deployed reference architecture demonstrating how a small team can integrate LLM-based scoring into a

real-time speech AI and standard cloud services into one seamless hiring pipeline, without resorting to a multi-agent framework.

Keywords: recruitment automation, AI-assisted hiring, resume scoring, voice interview agents, WebRTC, cloud-native systems, decision support.

Introduction

Anybody who has ever been involved in HR, even if only for a short period of time, will be familiar with the routine: A position is posted, dozens or even hundreds of resumes arrive in the first week and someone needs to review them all before anything else can occur. But ATS were supposed to solve that problem, and most of them still rely on keyword matching, which means if an applicant writes “led group projects” rather than “team leadership,” that candidate can be disqualified, even though it’s not a wrong or incorrect word, but simply different phrasing. This mismatch was clearly demonstrated by Ajjam and Al-Raweshidy [1] when they tested keyword based matching and semantic similarity models and concluded that there is a significant difference in accuracy. In addition, as Herold and Roedenbeck note [2] in their review of the literature on AI in recruitment, most of the systems discussed so far focus on one part of the hiring process, while leaving the others scattered across various tools. That’s where Hirebase comes in, as an end-to-end platform that we designed, built, and tested, rather than a research prototype. A recruiter can post a job, add a screening assessment, and receive AI-powered resume scoring all in one dashboard. Once a candidate passes the assessment threshold, the system automatically schedules a live, voice based interview for the candidate with an AI agent, through WebRTC using LiveKit as the real-time audio interface, Deepgram as the speech recognition and synthesis engine, and Groq as the conversation and scoring engine. The interview is transcribed, summarized and scored and the recruiter reviews the transcript, score breakdown and (where available) a behavioural analysis of the video recorded before taking a decision on whether to proceed. In the initial stage, we were going to develop it as a complete multi-agent orchestration system like LangChain or LangGraph, with different specialized agents for screening, scheduling, and evaluation. During construction and testing, we decided a simpler split was more effective: a single instance of the LiveKit worker used to run the real-time interview, and a single instance of the modular FastAPI backend used to run all other business logic. This proved to be simpler to deploy, debug, and understand, and one of the practical results we report in this paper is that a well-scoped service architecture can provide agentic behaviour without the need to have a general purpose orchestration framework running in production. The rest of this paper is organized as follows. Section 2 discusses the related works about the AI-based recruitment, semantic matching

and real-time communication technologies. The system architecture and design methodology is described in Section 3. The implementation details and technology stack are discussed in section 4. The results of testing the deployed system are given in Section 5. Section 6 ends up and summarizes limitations and future work.

Drawing from the study of AI in recruitment, there are several categories of research that could be mentioned: Semantic-based matching of resumes and job description, Multi-agent frameworks to automate sections of the pipeline, Explainability in hires, and the real-time communication tech that enables voice/video hires in a browser. As Hirebase covers all four, we looked at them all. For semantic matching, Ajjam and Al-Raweshidy [1] designed a real-time recruitment system based on TF-IDF vectorization and cosine similarity, with the outcome of their results indicating that the semantic similarity scores for software engineering jobs were about 0.74, whereas for plain keyword search it was only 0.35, thus providing a strong indication that semantic matching is indeed superior to keyword ATS logic. This matches a process we followed in our resume-scoring module on Hirebase, which involved using an LLM (Groq-hosted) to give us reasons, in addition to a score, from a vector-similarity pipeline. Herold and Roedenbeck [2] undertook a large systematic review of literature, from 4579 papers to a small 502, and discovered most of the studies on AI in recruitment fall into two categories: assessment and selection, and processing incoming applications, where Hirebase focuses its automation. On multi-agent side, Pathak and Pandey [6] presented an architecture of four agents (sourcing agent, vetting agent, evaluation agent, and decision agent) utilizing GPT-4 and LangChain to automate the entire technical hiring process. Instead, Lo et al. [5] proposed a more focused but thorough multi-agent framework that leverages RAGs for the resume screening task, consisting of agents for extraction, evaluation, summarization, and score formulation, as well as tested against human HR ratings. Both papers gave us the confirmatory feedback to reaffirm our initial impulse to use multi-agent design for research demonstrations but to use a simplified design for a production deployment. All the ideas of specialized responsibilities (resume scoring, interview conduct, summarization) are taken with Hirebase, but are applied as scoped API routes and one dedicated worker process instead of a persistent agent framework. As far as communication is concerned, Mahmoud and Abozariba [4] did a systematic review of 83 studies on WebRTC, which included its use in applications beyond video calls in healthcare, remote monitoring and interactive applications, and found it to be a suitable technology for real time applications, such as video streaming and interactive applications, that require no additional client software and are based on the Web. This is the reason why Hirebase’s interview room works the way it works: No downloads, no plugins, just a browser and microphone. Last but not least, on the bigger question of whether AI is aiding recruitment outcomes or not, Ouakili

[3] analysed the impact of AI on recruitment efficiency and found that there are generally positive results in terms of speed and candidate experience, but equally identified issues of fairness and adoption which are consistent with our opinion that AI should complement the recruiter’s judgement, rather than replace it. Two additional works underpin the AI components used inside Hirebase’s interview agent rather than the recruitment domain itself. Devlin et al. [7] introduced BERT, the transformer architecture that underlies most modern NLP scoring pipelines including resume-job matching. Brown et al. [8] introduced GPT-3 and demonstrated the few-shot capabilities of large instruction-following language models, which is the same class of model (via Groq’s hosted inference) that powers Hirebase’s resume scoring, question generation, and interview summarization. Lastly, Fazel-Zarandi and Fox [9] proposed one of the earliest ontology-based hybrid approaches to job-candidate matching, combining deductive logic with similarity ranking, a useful historical reference point showing that semantic matching in recruitment is not a new idea, just one that has become far more practical with LLMs. What stands out across Table 1 is that nearly every paper solves one stage of hiring well: matching, screening, or communication, but none combine matching, structured assessment, live interviewing, and recruiter decision support into a single deployed system. That gap is what Hirebase was built to close.

Table 1 – Literature Review Matrix

Ref	Focus Area	Method	Relevance
Ajjam & Al-Raweshidy (2025) [1]	Semantic job-candidate matching	TF-IDF + cosine similarity, real-time system	Confirms semantic scoring outperforms keyword ATS; motivates our LLM-based resume scoring module
Herold & Roedenbeck (2025) [2]	AI in recruitment (systematic review)	AI taxonomy + systematic literature review (502 studies)	Confirms fragmentation gap in existing tools; motivates unified single-platform design
Ouakili (2025) [3]	Impact of AI on recruitment process	Survey-based mixed-methods study	Supports efficiency gains from AI while flagging fairness concerns we address via recruiter-in-the-loop design
Mahmoud & Abozariba (2025) [4]	WebRTC applications and limitations	Systematic review of 83 studies	Justifies LiveKit/ WebRTC choice for browser-based voice interviews

Lo et al. (2025) [5]	Multi-agent resume screening	RAG-based 4-agent LLM framework	Informed (and contrasted with) our decision to use a modular monolith instead of a persistent multi-agent framework
Pathak & Pandey (2025) [6]	Multi-agent recruitment automation	4-agent GPT-4/ LangChain pipeline	Same as above; shows feasibility but also operational complexity of multi-agent orchestration
Devlin et al. (2019) [7]	Transformer-based language understanding	BERT pretraining	Foundational NLP architecture underlying LLM-based
Brown et al. (2020) [8]	Large language models, few shot learning	GPT-3, 175B parameter model	Foundational basis for the class of LLMs (via Groq) used in Hirebase's scoring/interview logic
Fazel-Zarandi & Fox (2009) [9]	Ontology-based job matching	Deductive + similarity-based hybrid matching	Historical precedent for semantic job matching before LLMs

Materials and methods

System design and methodology. This section explains the methodology that was adopted to design, develop and deploy Hirebase. The methodology will include the engineering approach, as well as the entire system design, since the platform will include not only the development of a web application, but also capabilities for assisted recruitment using artificial intelligence and a voice interviewer that works in real time. The following sections describe our development process, the architecture of the platform, and how all the components of the platform are put together to create an end-to-end recruitment workflow.

Development Approach. A combination of plan-driven development up front to agree on the data model, API contracts, and technology choices; and iterative development of the AI-dependent components of the system (prompt design, behaviour of interview agent, scoring calibration) where requirements emerged in the course of testing. A pure waterfall process would have been too inflexible for the LLM and voice-agent, as the behaviour of the prompts had to be adjusted in multiple rounds; a pure agile process would have risked inconsistencies between the frontend, backend and interview worker. The hybrid method provided us with the stability required in the architecture (schema, API routes) and the flexibility sought after (AI prompts, UI responses).

System Architecture. Hirebase is designed as a multi-tier, service oriented system to avoid being a single application. Each tier is responsible for its own tasks and can be scaled independently.

- Client tier. A single-page application built with React 18, TypeScript, and Vite, styled with Tailwind CSS, using TanStack Query for server-state management and React Router for navigation. Deployed on Vercel.

- Application/API tier. A FastAPI backend exposing REST endpoints under /api/v1, using SQLAlchemy 2.x with async sessions (asyncpg) for non-blocking database access. Deployed on Azure App Service.

- Interview agent tier. A separate, long-running Python worker built on the LiveKit Agents framework. It is dispatched automatically whenever a candidate joins an interview room, and it drives the conversation using Deepgram for speech-to-text/text-to-speech and Groq for dialogue generation, with Silero VAD handling natural turn-taking. Deployed as an independent container on Azure Container Instances, so a spike in interview traffic does not affect the main API's responsiveness.

- Data tier. PostgreSQL hosted on Supabase for structured data (users, jobs, applications, assessments, interviews), plus Supabase Storage buckets for resumes, company logos, and interview recordings.

- External services. Clerk for authentication and session management, Resend for transactional email, and Azure Cognitive Services (Computer Vision and Face API) for optional post-interview video behaviour analysis.

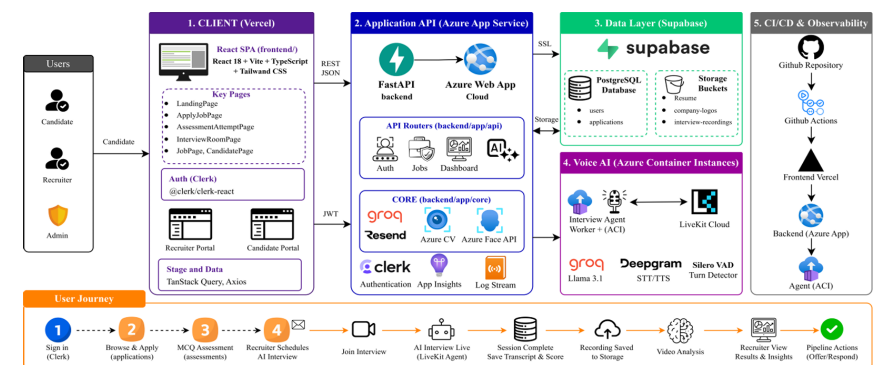


Figure 1 – Architecture and overall method used by Hirebase.

The figure above shows the cloud-native architecture and end-to-end recruitment process deployed with Hirebase. The users can access the application via a React client application deployed on Vercel, with a FastAPI back end running on Azure App Service. The backend is responsible for authentication, business logic, AI-powered recruitment services, and persistence using Supabase's

PostgreSQL and object storage. The AI agent is a dedicated service that operates in isolation on Azure Container Instances, utilizing language generation via Groq, speech processing via Deepgram, and turn detection via Silero VAD, all powered by Real-time voice Interviews. Real-time voice Interviews use a dedicated AI agent operating separately on Azure Container Instances, with language generation powered by Groq, speech processing powered by Deepgram, and turn detection powered by Silero VAD. Additionally, the figure illustrates the automated CI/CD pipeline and the entire candidate journey, from application submission to assessment, AI interview, transcript generation, optional video analysis, and recruiters' decision support.

We didn't automatically choose the API/Interview Agent split: it was a deliberate choice. Voice interviews are stateful, long-running, and latency critical, and do not easily fit within a stateless REST API paradigm that is geared towards short transactional cycles. By dividing them into two services, we could scale, restart and monitor each one separately and, crucially, a failure in the interview worker service would not have brought down the job posting or application review service for our other users.

Recruitment Workflow. The end-to-end flow is as follows: First a recruiter can register, then create a company profile (admin must approve this profile before posting a job), then post a job with the optional linked assessment. A job-seekers applies, either by sending a resume that automatically populates their profile, or by completing the profile themselves. This is what we call the explainability (XAI) layer, in that the only thing a recruiter can do with a score is to explain it to him or her, which a plain language explanation offers.

At this step, the system emails the candidate a LiveKit interview link to complete if the candidate passes the combined threshold (resume score + assessment score) and the recruiter takes action – the date and time are set. The candidate logs into a virtual interview room and the agent interviews the candidate live, by voice. Once it's completed, the agent publishes the completed transcript back to the API (which is authenticated via a shared secret so only the agent process can call this endpoint), and the backend uses the LLM to generate a summary and numeric score. Recordings are uploaded and optionally frame by frame analysis for behavioural signals. One recruiter-facing candidate detail page for everything: score, transcript, summary, recording, and behaviour metrics – the final decision is up to the human.

Implementation. We implemented Hirebase using a modern, mostly TypeScript/Python stack, chosen for a balance of developer productivity, async performance, and strong managed-service support. Table 2 summarizes the stack by layer.

Table 2 – Technology Stack

Layer	Technology	Purpose
Frontend	React 18, TypeScript, Vite, Tailwind CSS	SPA UI, build tooling, styling
State/data fetching	TanStack Query, Zustand	Server-state caching, client state
Backend	FastAPI (Python 3.11+), Uvicorn/Gunicorn	REST API, async request handling
ORM/DB access	SQLAlchemy 2.x (async) + asyncpg	Non-blocking PostgreSQL access
Database & storage	PostgreSQL + Object Storage via Supabase	Structured data, resumes, recordings
Authentication	Clerk (JWT-based)	Session management, role-based access
LLM inference	Groq (hosted inference)	Resume scoring, JD/question generation, interview dialogue, summarization
Speech processing	Deepgram	Speech-to-text and text-to-speech for the interview agent
Real-time communication	LiveKit (WebRTC)	Browser-based, plugin-free voice interview rooms
Interview agent framework	LiveKit Agents + Silero VAD	Turn detection, agent dispatch, conversation flow
Transactional email	Resend	Assessment links, interview invites, offers
Video analysis (optional)	Azure Computer Vision & Face API, OpenCV	Frame sampling and behavioural signal extraction
Frontend hosting	Vercel	Static hosting + CDN for the SPA
API hosting	Azure App Service	Backend deployment
Agent hosting	Azure Container Instances	Long-running interview worker
CI/CD	GitHub Actions, GitHub Container Registry	Automated build, test, and deployment pipeline

We implemented DevOps best practices across the board, each push to the main branch is accompanied by a pipeline that builds and deploys the front end to Vercel, the back end to Azure App Service, and for the interview agent, it builds a Docker image that is pushed to the GitHub container registry and rolled out to Azure Container Instances. This enabled us to constantly experiment with prompt behavior or scoring criteria without having to wait days for the AI to be deployed and tested in the real world – a huge advantage, since so much of the AI behaviour had to be fine-tuned in the real world. Migration of startups to databases is automatically

handled, allowing schema changes to be deployed safely in parallel with code changes, and Azure Application Insights provides visibility into API health and error rates after deployments. Security was not added on after the design was complete but was considered as a first class citizen. All traffic runs over HTTPS/WSS. Role-based access control is enforced at the route level: a recruiter cannot view another company's applications, and a candidate cannot access another candidate's interview token. The interview agent authenticates to the backend using a shared secret header rather than a normal user token, which keeps agent-only endpoints isolated from anything a compromised user session could reach. Recruiters access recordings only through short-lived, server generated signed URLs rather than permanent public links, and all API keys and database credentials are supplied through environment variables rather than committed to source.

Results and discussion

We tested Hirebase using twenty structured test cases covering the core user journeys for both HR and candidate roles, registration, login, company profile setup, job and assessment creation, resume upload (including invalid file type rejection), assessment attempts, and interview room access. All twenty test cases passed, confirming that the core workflow is stable end-to-end for both user types.

Table 3 – Summary of Functional Test Results

Area Tested	Cases	Result
Registration & role selection	5	All passed
Company profile management	2	All passed
Job posting & assessment creation	3	All passed
Candidate CV upload (valid/invalid)	2	All passed
Assessment attempt & scoring	3	All passed
Interview scheduling & room access	1	Passed
Session management (logout, timeout handling)	2	Passed
Validation handling (missing fields)	2	Passed

In addition to being correct, here are a couple of practical results. The first thing that worked in real-world tests was the separation of the interview agent from an unrelated request on the dashboard: in the real world, an active interview session did not block or slow down other dashboard requests, suggesting that our choice of tiering was correct, and not merely a matter of theoretical niceness. Second, the explainability layer that we added on top of the resume scoring proved to be more valuable than we thought when it came time to review the system, and during all of our client interviews, the recruiter detail page breakdown of achieved vs. missing was valued more than just the resume score, as it gave them the ability to review a written justification. Third, the async database layer (SQLAlchemy with asyncpg)

had no impact on core operations: job listing, applications, dashboard queries; it was responsive even as we had heavier operations running in the background, such as LLM scoring calls or video-frame analysis, which confirmed our choice to move the AI-heavy tasks outside the main request/response cycle [10]. We should be direct about the limitations here too. Our testing was functional rather than large-scale, we validated that the pipeline works correctly end-to-end and under normal usage, not under high concurrent load or with adversarial inputs. The resume-scoring and interview-scoring outputs are also LLM-generated, which means they carry the usual risks of non-determinism and potential bias inherited from the underlying model; we treat these scores strictly as decision support, not as an automated hire/reject decision, and the system design reflects that by always routing the final call through a human recruiter.

Conclusion

Recruitment is still, in most organizations, a slow and manual process held together by email threads and spreadsheets. In this paper, we presented Hirebase, a cloud native recruitment platform that we designed, built, and deployed to bring job posting, resume scoring, structured assessments, and AI-driven voice interviews into a single, coherent system, while keeping recruiters firmly in control of the final hiring decision. Our main contribution is a working reference architecture, not a novel algorithm, but a demonstration that a modular API paired with a dedicated real-time worker, built on managed cloud services (Clerk, Supabase, Groq, Deepgram, LiveKit, Azure) and deployed through a proper CI/CD pipeline, can deliver genuinely useful AI-assisted hiring without the operational overhead of a full multi-agent orchestration framework. We validated the system through structured functional testing across both recruiter and candidate journeys, and all tested workflows performed as expected. A. Limitations The existing iteration of Hirebase is limited to the early stages of the recruitment process, and does not impact any aspects of payroll, background checks, or onboarding. The platform is English only, in both UI and LLM/speech pipeline. It's designed for the desktop browser and not for mobile. Scheduling is still done via email and manual coordination, not on a deep calendar level. Like all LLM based scoring systems, outputs are advisory and may be biased owing to the underlying model or to the way it was prompted, so all scores are accompanied by supporting text and undergo human oversight, not automatic scoring. B. Future Work Several directions could extend this work meaningfully. Multilingual support (for the UI, resume parsing, and the interview agent) would make the platform usable well beyond English-speaking markets. Deeper calendar integration (Google Calendar or Microsoft Graph) would remove one of the last manual steps in the pipeline. Richer analytics, such as time-to-hire trends and cohort comparisons across jobs, would give recruiters more to work with beyond individual candidate scores. On

the fairness side, we think it's worth building out proper audit logging of model versions and documented bias-testing protocols, rather than relying only on the explainability layer we currently have. Finally, revisiting a lightweight multi-agent design for specific sub tasks (such as parallel resume parsing and question generation) could be worth exploring now that the core architecture is stable, provided the added complexity is actually justified by a measurable gain.

REFERENCES

- 1 **Ajjam, M.-H., & Al-Raweshidy, H. S.** AI-driven semantic similarity-based job matching framework for recruitment systems // Information Sciences. – 2026. – Vol. 724. – Art. 122728. – <https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122728>
- 2 **Herold, M., & Roedenbeck, M. R. H.** AI-Driven Research in the Recruitment and Selection Process: Application of an AI Taxonomy With a Systematic Literature Review // SAGE Open. – 2025. – Vol. 15. – № 3. – <https://doi.org/10.1177/21582440251361746>
- 3 **Ouakili, O.** The impact of artificial intelligence (AI) on recruitment process // Open Journal of Business and Management. – 2025. – Vol. 13. – №. 2. – P. 749–762. – <https://doi.org/10.4236/ojbm.2025.132039>
- 4 **Mahmoud, H., & Abozariba, R.** A systematic review on WebRTC for potential applications and challenges beyond audio video streaming // Multimedia Tools and Applications. – 2025. – Vol. 84. – P. 2909–2946. – <https://doi.org/10.1007/s11042-024-20448-9>
- 5 **Lo, F. P.-W., Qiu, J., Wang, Z., Yu, H., Chen, Y., Zhang, G., & Lo, B. P. L.** AI Hiring with LLMs : A Context-Aware and Explainable Multi-Agent Framework for Resume Screening // arXiv. – 2025. – arXiv:2504.02870. – [Electronic resource]. – <https://arxiv.org/abs/2504.02870>
- 6 **Pathak, G., & Pandey, D.** AI Agents in Recruitment: A Multi Agent System for Interview, Evaluation, and Candidate Scoring [Electronic resource] // SSRN. – 2025. – [Electronic resource]. – <https://ssrn.com/abstract=5242372>
- 7 **Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K.** BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. – Minneapolis, Minnesota : Association for Computational Linguistics, 2019. – Vol. 1. – P. 4171–4186. – [Electronic resource]. – <https://aclanthology.org/N19-1423>
- 8 **Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., et al.** Language Models are Few-Shot Learners // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – Vol. 33. – P. 1877–1901. – [Electronic resource]. – <https://arxiv.org/abs/2005.14165>

9 **Fazel-Zarandi, M., & Fox, M. S.** Semantic Matchmaking for Job Recruitment: An Ontology-Based Hybrid Approach // Proceedings of the Third International Workshop on Service Matchmaking and Resource Retrieval in the Semantic Web. – 2009. – 8 p. – [Electronic resource]. – <http://www.eil.utoronto.ca/wpcontent/uploads/km/papers/fazel-sm09.pdf>

10 Karaca Celal Prospects for the integration of large language models into the scientific environment // Bulletin of Toraighyrov University. Physics, Mathematics and Computer Science Series. – 2026. – № 2. – P. 6–16. – <https://doi.org/10.48081/BGQF1883>

Received 07.08.26.

Received in revised form 07.08.26.

Accepted for publication 10.09.26.

*Сағар Чхабрия¹, Хансека Дхингана², Нур Наби Дахар³, Абдул Кадир⁴

^{1,2,3,4}Компьютерлік ғылымдар кафедрасы,

Суккур ИБА университеті, Пәкістан, Синдх.

07.08.26 ж. баспаға түсті.

07.08.26 ж. түзетулерімен түсті.

10.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

HIREBASE: ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ҚОЛДАНЫЛАТЫН ЖӘНЕ ДАУЫСТЫҚ СҰХБАТ АГЕНТІ БАР ПЕРСОНАЛДЫ ІРІКТЕУГЕ АРНАЛҒАН БҰЛТТЫҚ ПЛАТФОРМА

Персоналды іріктеу ұйымдар қызметіндегі ең көп еңбекті қажет ететін және автоматтандырылуы төмен үдерістердің бірі болып қала береді. Рекрутерлер көптеген түйіндемелерді қолмен қарап шығады, тестілеу өткізу және сұхбат уақытын белгілеу үшін үміткерлермен электрондық пошта арқылы байланысады, сондай-ақ алғашқы сұхбат нәтижелерін бағалау кезінде үміткердің лауазым талаптарына сәйкестігі туралы субъективті пікірге сүйенеді. Осы үдерістің жекелеген міндеттерін шешуге арналған құралдардың қолданылу аясы шектеулі. Оларға, мысалы, жұмыс іздеу платформалары немесе түйінді сөздерді сәйкестендіруге негізделген үміткерлерді қадағалау жүйелері (ATS) жатады. Сонымен қатар персоналды іріктеудің басқа кезеңдері әлі де электрондық кестелер мен электрондық пошта арқылы жүзеге асырылады.

Аталған мәселені шешу мақсатында персоналды іріктеудің негізгі кезеңдерін бірыңғай жүйеге біріктіретін Hirebase бұлттық

платформасы әзірленіп, қолданысқа енгізілді. Платформа бос жұмыс орындарын жариялауға, үлкен тілдік модельдің (LLM) көмегімен үміткерлердің түйіндемелерін бағалауға, уақыты шектеулі практикалық тестілеуді өткізіп, оның нәтижелерін автоматты түрде тексеруге, сондай-ақ нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін жасанды интеллектінің дауыстық агенті арқылы алғашқы сұхбаттарды ұйымдастыруға мүмкіндік береді. Бұл ретте үміткерді жұмысқа қабылдау туралы түпкілікті шешімді рекрутер қабылдайды.

Платформа React/TypeScript негізіндегі клиенттік қосымшадан, FastAPI серверлік бөлігінен және PostgreSQL дерекқорымен әрі объектілік қоймамен жұмыс істеу үшін пайдаланылатын Supabase сервисінен тұрады. Жүйенің құрамына LiveKit дауыстық агентінің жеке жұмыс модулі және Vercel, Azure App Service пен Azure Container Instances платформаларын пайдаланатын үздіксіз интеграциялау және жеткізу (CI/CD) конвейері де кіреді.

Мақалада жүйенің архитектурасы, қабылданған инженерлік шешімдер және платформаны толассыз тестілеу нәтижелері сипатталған. Сонымен қатар жүйенің қазіргі шектеулері қарастырылып, оны одан әрі дамыту бағыттары ұсынылған. Зерттеуде жеке алгоритм емес, шағын топтың LLM негізіндегі бағалауды, нақты уақыттағы сөйлеу жасанды интеллектісін және стандартты бұлттық сервистерді көпәгентті архитектураны пайдаланбай, персоналды іріктеудің бірыңғай әрі үздіксіз үдерісіне қалай біріктіре алатынын көрсететін жұмыс істейтін және қолданысқа енгізілген үлгілік архитектура ұсынылған.

Кілтті сөздер: персоналды іріктеуді автоматтандыру, жасанды интеллект көмегімен персоналды іріктеу, түйіндемелерді бағалау, сұхбат жүргізуге арналған дауыстық агенттер, WebRTC, бұлттық жүйелер, шешім қабылдауды қолдау.

*Сағар Чхабрия¹, Хансека Дхингана², Нур Наби Дахар³, Абдул Кадир⁴

^{1,2,3,4}Кафедра компьютерных наук,
Университет Суккур ИВА, Пакистан, Синдх.

Поступило в редакцию 07.08.26.

Поступило с исправлениями 07.08.26.

Принято в печать 10.09.26.

HIREBASE: ОБЛАЧНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПОДБОРА ПЕРСОНАЛА С ПОДДЕРЖКОЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ГОЛОСОВЫМ АГЕНТОМ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СОБЕСЕДОВАНИЙ

Подбор персонала по-прежнему остаётся одним из наиболее трудоёмких и слабо автоматизированных процессов в деятельности организаций. Рекрутеры вручную просматривают большое количество резюме, связываются с кандидатами по электронной почте для организации тестирования и назначения собеседований, а также оценивают результаты первого этапа интервью, зачастую основываясь на субъективном мнении о соответствии кандидата требованиям должности. Инструменты, разработанные для решения отдельных задач данного процесса, имеют ограниченную функциональность: например, сайты по поиску работы или системы отслеживания кандидатов (ATS), основанные на сопоставлении ключевых слов. При этом остальные этапы подбора персонала продолжают осуществляться с использованием электронных таблиц и электронной почты.

Для решения данной проблемы нами разработана и развернута облачная платформа Hirebase, объединяющая все основные этапы подбора персонала в единой системе. Платформа позволяет публиковать вакансии, оценивать резюме кандидатов с помощью большой языковой модели (LLM), проводить ограниченные по времени практические тестирования с автоматической проверкой результатов, а также организовывать первичные собеседования с использованием голосового агента искусственного интеллекта, работающего в режиме реального времени. При этом окончательное решение о приёме кандидата на работу остаётся за рекрутером.

Платформа построена на основе клиентского приложения React/TypeScript, серверной части FastAPI и сервиса Supabase, используемого для работы с базой данных PostgreSQL и объектным хранилищем. В состав системы также входят отдельный рабочий модуль голосового агента LiveKit и автоматически развертываемый конвейер непрерывной интеграции и доставки (CI/CD), использующий Vercel, Azure App Service и Azure Container Instances.

В статье описываются архитектура системы, принятые инженерные решения и результаты сквозного тестирования

платформы. Кроме того, рассматриваются существующие ограничения системы и предлагаются направления её дальнейшего развития. В работе представлен не отдельный алгоритм, а функционирующая и развернутая эталонная архитектура, демонстрирующая, каким образом небольшая команда может объединить оценивание на основе LLM, речевой искусственный интеллект реального времени и стандартные облачные сервисы в единый непрерывный процесс подбора персонала без использования многоагентной архитектуры.

Ключевые слова: автоматизация подбора персонала, подбор персонала с поддержкой искусственного интеллекта, оценивание резюме, голосовые агенты для проведения собеседований, WebRTC, облачные системы, поддержка принятия решений.

«ТЕОРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ФИЗИКА» СЕКЦИЯСЫ

FTAMP 29.19.31

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/45-67>

***А. Д. Акылбекова¹, К. А. Бакбергенова², А. Т. Тулегенова³,
А. А. Кисабекова⁴, Г. Ф. Сарсехан⁵**

^{1,5}Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

²Астана қаласы әкімдігінің «Техникалық колледжі»,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

³Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

⁴Ө. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1211-8877>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6702-8195>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5701-6674>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6300-6758>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7473-5315>

*e-mail: aiman88_88@mail.ru

ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ КҮЙДІРУДІҢ МЫРЫШ СЕЛЕНИТІ НАНОКРИСТАЛДАРЫНЫҢ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Бұл жұмыста SiO_2/Si тректік темплайттерінде химиялық тұндыру әдісімен синтезделген мырыш селениті (ZnSeO_3) нанокристалдарының құрылымдық, оптикалық және электрфизикалық қасиеттеріне жоғары температуралық күйдірудің әсері зерттелді. Мырыш селениті нанокристалдары мырыш хлориді және селен диоксиді прекурсорлары негізінде бөлме 18°C температурасында химиялық тұндыру арқылы алынды. Алынған үлгілер вакуум жағдайында 800 және 1000°C температураларда термиялық өңдеуден өткізілді. Үлгілердің морфологиясы сканерлеуші электрондық микроскопия әдісімен, кристалдық құрылымы рентгендік дифракциялық талдау арқылы, оптикалық қасиеттері фотолюминесценция спектроскопиясымен, ал электрфизикалық сипаттамалары ток-кернеу тәуелділіктерін өлшеу арқылы зерттелді.

Рентгенқұрылымдық талдау нәтижелері бастапқы үлгілерде орторомбтық құрылымды мырыш селениті фазасының түзілгенін көрсетті. Жоғары температуралық күйдіру барысында мырыш селениті нанокристалдарының ішінара ыдырауы байқалып, 800 °C температурада тетрагональды құрылымды мырыш селениті фазасы, ал 1000 °C температурада гексагональды құрылымды мырыш оксиді фазасы қалыптасатыны анықталды. Фотолюминесценция спектрлерінде 400–600 нм аралығындағы кең сәулелену жолағы байқалып, оның ақаулық күйлермен байланысты екендігі көрсетілді. Күйдіру температурасының артуы көк және күлгін сәулеленудің қарқындылығын арттырып, спектрлік құрамның өзгеруіне алып келетіні анықталды. Электрлік өлшеулер нәтижесінде зерттелген құрылымдардың электрондық өткізгіштік типіне жататыны және олардың ток-кернеу сипаттамаларының айқын сызықтық емес тәуелділік көрсететіні анықталды. Ең жоғары меншікті электрөткізгіштік 800 °C температурада күйдірілген үлгі үшін байқалды.

Алынған нәтижелер жоғары температуралық өңдеудің мырыш селениті нанокристалдарының фазалық құрамына, фотолюминесценциялық қасиеттеріне және электрөткізгіштік параметрлеріне елеулі әсер ететінін көрсетті. Бұл материалдардың оптоэлектроника және наноэлектроника құрылғыларында қолданылу перспективаларын кеңейтеді.

Кілтті сөздер: мырыш селениті, нанокристалдар, химиялық түндыру, термиялық өңдеу, фотолюминесценция, электрөткізгіштік, рентгендік дифракция.

Кіріспе

Наноқұрылымды материалдар ерекше оптикалық, электрлік және фотокаталитикалық қасиеттеріне байланысты оптоэлектроникада, фотокатализде және күн энергиясын түрлендіру технологияларында кеңінен қолданылады [1]. A²B⁶ типті жартылай өткізгіш қосылыстардың ішінде ZnO және ZnSe материалдары кең тыйым салынған аймағы, жоғары электрондық қозғалғыштығы және қолайлы оптоэлектрондық қасиеттерінің арқасында жарық диодтары, фотодетекторлар және басқа да оптоэлектрондық құрылғылар үшін перспективалы материалдар болып табылады [2].

Соңғы жылдары ZnO негізіндегі наноқұрылымды жартылай өткізгіш материалдардың құрылымын басқару және олардың фотолуэлектрхимиялық, фотокаталитикалық әрі оптоэлектрондық қасиеттерін жақсартуға бағытталған зерттеулер қарқынды дамуда [3–6]. Осыған байланысты ZnO

мен ZnSe материалдарының қасиеттерін біріктіретін мырыш селениті (ZnSeO₃) қосылысына да қызығушылық артуда. Бұл материал фотоанодтарда, фотокатализдік және каталитикалық жүйелерде қолдануға перспективалы болып саналады [7; 8]. Алайда мырыш селениті наноқұрылымдарының физикалық қасиеттері мен жоғары температуралық өңдеу кезіндегі мінез-құлқы әлі де жеткілікті зерттелмеген.

Наноқұрылымдарды алудың перспективалы тәсілдерінің бірі – оларды SiO₂/Si негізіндегі тректік темплейттерде синтездеу болып табылады. Бұл әдіс өлшемдері мен морфологиясы басқарылатын наноқұрылымдарды алуға мүмкіндік береді. Соңғы жылдары тректік темплейттерде синтезделген наноқұрылымдардың құрылымдық, оптикалық және электрфизикалық қасиеттерін зерттеуге бағытталған жұмыстардың саны артып келеді [9; 10; 11].

Жартылай өткізгіш наноматериалдардың қасиеттерін басқарудың маңызды әдістерінің бірі – термиялық өңдеу. Күйдіру нәтижесінде материалдың кристалдық құрылымы жетіліп, ақаулар концентрациясы мен фазалық құрамы өзгереді. Әдебиет деректері бойынша мырыш селениті қосылысы жоғары температураларда ыдырап, ZnSe және ZnO фазаларының түзілуіне алып келеді [12]. Сондықтан жоғары температуралық өңдеудің ZnSeO₃ нанокристалдарының құрылымдық, оптикалық және электрфизикалық қасиеттеріне әсерін зерттеу ғылыми және практикалық тұрғыдан өзекті болып табылады.

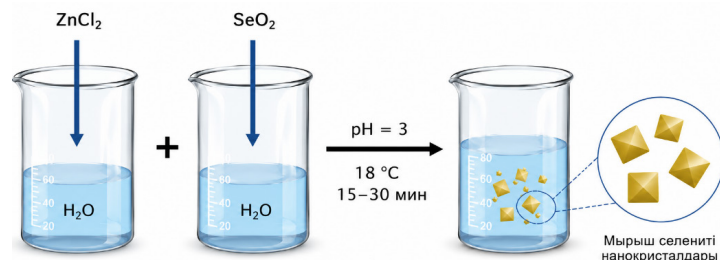
Осы жұмыстың мақсаты – a-SiO₂ нанокеукті/Si темплейттерінде химиялық түндыру әдісімен синтезделген мырыш селениті нанокристалдарының жоғары температуралық күйдіру әсерінен болатын құрылымдық, оптикалық және электрфизикалық қасиеттерінің өзгеру заңдылықтарын анықтау.

Материалдар мен әдістер

Аморфты SiO₂/Si құрылымы кремний түптөсемін 900 °C температурада ылғалды оттегі атмосферасында термиялық тотықтыру арқылы дайындалды. Эллипсометриялық өлшеулер бойынша SiO₂ қабатының қалыңдығы 700 нм болды. Оксидтелген пластиналардан өлшемі 1×1 см² болатын үлгілер дайындалып, Астана қаласындағы DC-60 үдеткішінде энергиясы 200 МэВ ксенон иондарымен 108 ион/см² флюенске дейін сәулелендірілді.

SiO₂ қабатында нанокеуктер қалыптастыру үшін сәулелендірілген үлгілер 4 %-дық HF ерітіндісінде (PdCl₂ – 0,025 г) 18°C температурада химиялық өңдеуден өткізілді. Өңдеу алдында үлгілердің беті изопропанол ерітіндісінде ультрадыбыстық тазартқышта 15 минут бойы тазартылды. Химиялық өңдеуден кейін үлгілер 18,2 МОм кедергілі деионизацияланған сумен мұқият шайылды.

Мырыш селениті нанокристалдарын синтездеу үшін ZnCl_2 (4 г/л) және SeO_2 (0,2 г/л) ерітінділері жеке дайындалып, кейін $\text{pH} = 3$ мәнінде араластырылды. Тректік темплейттерге химиялық тұндыру үздіксіз араластыру жағдайында 18°C температурада жүргізілді. Мұндай температура ерітінді тұрақтылығын сақтауға және жанама реакциялардың ықтималдығын төмендетуге мүмкіндік береді. Мырыш селенитін тұндыру процесінің сызбасы 1-суретте көрсетілген.



1-сурет – Мырыш селенитін нанокристалдарын алу процесінің сызбалық көрінісі

Химиялық тұндыру аяқталғаннан кейін тұндырылған үлгілер дистилденген сумен шайылып, бөлме температурасында ауада бір сағат бойы кептірілді. Химиялық тұндырудан кейін тұнбалары бар үлгілер дистилденген сумен мұқият шайылып, бөлме температурасында ауада кептірілді.

Термиялық күйдіру AVERON пешінде (Екатеринбург, Ресей) вакуумдық ортада жүргізілді. Үлгілер 800°C және 1000°C температураларда 60 минут бойы күйдірілді. Қыздыру жылдамдығы $30^\circ\text{C}/\text{мин}$ құрады.

Тректі темплейттердің беткі морфологиясы JSM-7500F сканерлеуші электрондық микроскопының (JEOL, Токио, Жапония) көмегімен зерттелді. Рентгенқұрылымдық талдау D8 ADVANCE ECO рентгендік дифрактометрінде (Bruker, Германия) Си-анодты рентген түтігін пайдалану арқылы жүргізілді. Өлшеулер $2\theta = 30-110^\circ$ бұрыштық диапазонында $0,01^\circ$ қадаммен орындалды. Фазалық құрамды сәйкестендіру және кристалдық құрылымды талдау үшін Bruker AXS DIFFRAC.EVA v4.2 бағдарламалық қамтамасыз етуі мен ICDD PDF-2 халықаралық дереккөзі қолданылды.

Фотолюминесценция спектрлері CM2203 спектрофлуориметрінде (Solar, Минск, Беларусь) тіркелді. Қоздыру көзі ретінде толқын ұзындығы $\lambda = 240$ нм болатын ксенон шамы пайдаланылды. Өлшеулер 320–700 нм спектрлік диапазонда жүргізілді. Қос монохроматорларды қолдану бөгде сигналдардың әсерін азайтып, өлшеулердің жоғары дәлдігін қамтамасыз етті.

Барлық жағдайларда алынған фотолюминесценция спектрлерінен бастапқы SiO_2 нанокеукеті/Si темплейтінің сәулелену үлесі алынып тасталды.

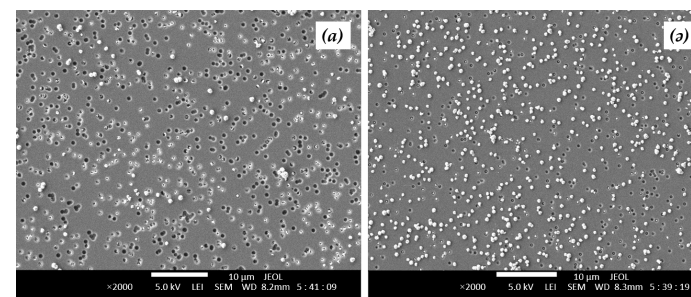
Нанокристалдардың электрлік қасиеттері HP 66312A ток көзі және 34401A Agilent мультиметрі (Keysight Technologies, Санта-Роза, Калифорния, АҚШ) көмегімен зерттелді. Вольт-амперлік сипаттамалар (BAC) ауданы $0,3\text{ см}^2$ болатын толтырылған наноарналар массивінен өлшенді. Мыс электрод үлгінің толтырылған кеукетері бар бетіне термиялық буландыру әдісімен тұндырылды, ал екінші электрод үлгінің артқы бетінде қалыптастырылды.

BAC тұрақты кернеу режимінде -6 В-тан $+6$ В-қа дейінгі аралықта $0,5$ В қадаммен өлшенді. Алынған тәуелділіктер екінші дәрежелі полиномдық аппроксимация әдісімен өңделді.

Нәтижелер мен талқылау

Кеукетердің толу дәрежесі тұндыру уақытына тәуелділік ретінде орташа диаметрі 450 нм болатын үлгілер үшін бағаланды. Күтілгендей, химиялық тұндыру (ХТ) уақытының артуымен кеукетердің толу дәрежесі де жоғарылады. Атап айтқанда, кеукетердің толу дәрежесі 15 минуттық химиялық тұндырудан кейін шамамен 39%-ды құраса, тұндыру уақыты 30 минутқа дейін арттырылған кезде бұл көрсеткіш шамамен 90 %-ға дейін жетті.

2-суретте 15 және 30 минут бойы жүргізілген химиялық тұндырудан кейінгі үлгілердің беткі морфологиясы көрсетілген. 15 минуттық тұндырудан кейін үлгі бетінде толық толтырылмаған және бос кеукетердің бар екені байқалады. Ал 30 минуттық тұндырудан кейін кеукетердің басым бөлігі толық толтырылғаны анықталды. Сонымен қатар нанокеукетерден тұндырылған заттың сыртқа шығып тұрғаны байқалды. Алынған нәтижелер химиялық тұндыру ұзақтығының кеукетердің толу дәрежесіне елеулі әсер ететінін және 30 минуттық тұндыру кезінде нанокеукетердің тиімді толтырылатынын көрсетті.



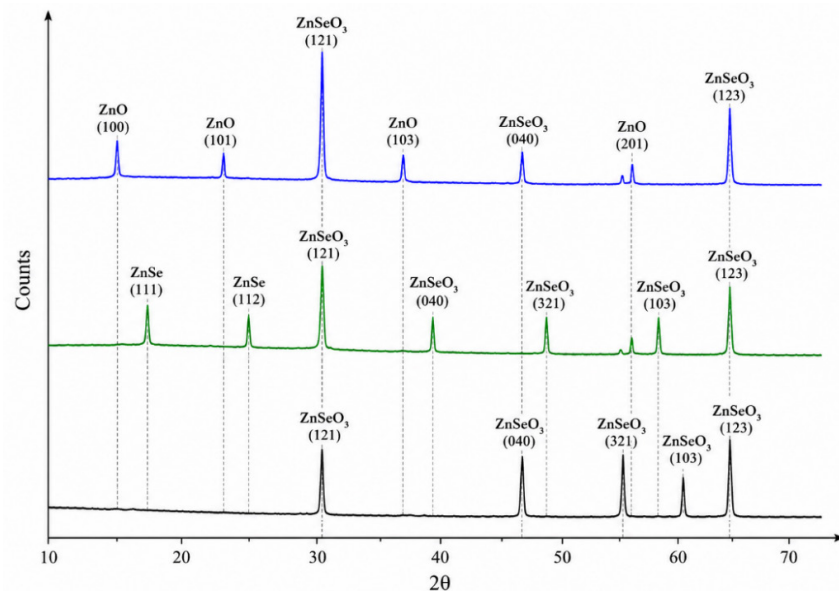
2-сурет – Бөлме 18°C температурасында химиялық тұндырудан кейінгі үлгілердің беткі морфологиясының СЭМ кескіндері:

а) 15 минут; б) 30 минут

Химиялық тұндыру ұзақтығын одан әрі арттырған кезде кеуектердің толу дәрежесі іс жүзінде өзгеріссіз қалды. Сондықтан кеуектердің толу тиімділігі тұрғысынан алғанда, тұндырудың онтайлы ұзақтығы 30 минут деп анықталды. Осыған байланысты кейінгі зерттеулер үшін преципитаттарды тұндыру бөлме 18 °C температурадағы ерітіндіде 30 минут бойы жүргізілді.

Күйдіруге дейінгі және кейінгі нанокристалдары бар үлгілердің рентгендік дифракциялық спектрлері 3-суретте көрсетілген. $2\theta = 33,00^\circ$, $47,76^\circ$, $54,53^\circ$, $56,41^\circ$ және $61,66^\circ$ бұрыштарында анықталған дифракциялық максимумдар мырыш селениті қосылысының орторомбтық фазасына сәйкес келеді.

Мырыш селениті фазасына тән ең қарқынды дифракциялық максимумдар $2\theta = 33,00^\circ$ және $61,66^\circ$ бұрыштарында орналасқан және сәйкесінше мырыш селениті кристалдық құрылымының (121) және (123) Миллер жазықтықтарына жатады.



3-сурет – Тұндырылған нанокристалдардың рентгендік дифрактограммалары: а) күйдіруге дейін;
ә) 800 °C температурада 1 сағат күйдіргеннен кейін;
б) 1000 °C температурада 1 сағат күйдіргеннен кейін

Жоғары температуралық күйдіруден кейін аталған дифракциялық максимумдардың қарқындылығының айтарлықтай артуы байқалды. Бұл құбылыс мырыш селениті тұнбаларының тығыздалуын, кристалдылық дәрежесінің жоғарылауын және аморфты фазаға қарағанда поликристалдық фазаның үлесінің артуын көрсетеді.

Бастапқы және күйдірілген үлгілердегі иондық-тректі темплекттерде қалыптасқан нанотұнбалардың рентгендік дифракциялық талдау негізінде есептелген кристаллографиялық параметрлері 1 және 2-кестелерде келтірілген.

1-кесте – ZnSeO_3 нанокристалдарының кристаллографиялық параметрлері

Көрсеткіш	Мәні	Көрсеткіш	Мәні
Фаза	ZnSeO_3	Кеңістік тобы	Pnma (62)
Құрылым түрі	Орторомбалық	Кристаллит өлшемі, нм	21.17
Тор параметрлері, Å	$a=5.94b=7.61c=5.10$	Ұяшық көлемі, Å ³	231.41
Фазалық құрамы, %	100	(hkl)	(121), (040), (321), (103), (123)
2θ , °	33.00, 47.76, 54.53, 56.41, 61.66	d, Å	2.71, 1.90, 1.68, 1.63, 1.50

2-кесте – Күйдіруден кейінгі нанотұнбалардың кристаллографиялық параметрлері

Көрсеткіш	800 °C температурада күйдірілген үлгі	1000 °C температурада күйдірілген үлгі
Фазалар	ZnSe (68.5 %) ZnSeO_3 (31.5 %)	ZnO (77.3 %) ZnSeO_3 (22.7 %)
Құрылым түрі	Тетрагональды Орторомбтық	Гексагональды Орторомбтық
Кеңістік тобы	P4/nmm (129); Pnma (62)	P63mc (186); Pnma (62)
Тор параметрлері, Å	ZnSe: $a = 3.97$, $c = 5.23$ ZnSeO_3 : $a = 5.94$, $b = 7.61$, $c = 5.10$	ZnO: $a = 3.27$, $c = 5.23$ ZnSeO_3 : $a = 5.94$, $b = 7.61$, $c = 5.10$
Кристаллит өлшемі, нм	ZnSe: 25.7 ZnSeO_3 : 26.52	ZnO: 37.5 ZnSeO_3 : 36.17
Ұяшық көлемі, Å ³	ZnSe: 82.57 ZnSeO_3 : 231.41	ZnO: 48.47 ZnSeO_3 : 231.41

Дифракциялық максимумдар (2θ , °)	ZnSe: 28.0; 40.2	ZnO: 21.9; 25.8; 38.3; 55.5
	ZnSeO ₃ : 33.002; 47.76; 54.53; 56.41; 61.656	ZnSeO ₃ : 33.002; 47.76; 54.53; 56.41; 61.656

Мырыш селениті қосылысының орторомбтық фазасына сәйкес келетін дифракциялық максимумдарды сәйкестендіру үшін JCPDS 78-0446 эталондық картасы пайдаланылды.

2-кестеден көрініп тұрғандай, күйдіру нәтижесінде мырыш селениті кристаллитерінің өлшемі ұлғаяды. Сонымен қатар, термиялық өңдеуден кейін рентгендік дифрактограммаларда қосымша дифракциялық максимумдардың пайда болуы байқалады, бұл мырыш селениті қосылысының термиялық ыдырауы нәтижесінде жаңа фазалардың түзілгенін көрсетеді.

Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері термиялық өңдеу барысында жаңа фазалардың түзілетінін көрсетті. 800 °C температурада күйдірілген үлгіде $2\theta = 28,0^\circ$ және $40,2^\circ$ бұрыштарында орналасқан дифракциялық максимумдар байқалып, олардың тетрагональды құрылымды мырыш селениті (ZnSe) фазасына сәйкес келетіні анықталды. Температураны 1000 °C-қа дейін арттырған кезде $2\theta = 21,9^\circ$, $25,8^\circ$, $38,3^\circ$ және $55,5^\circ$ бұрыштарында қосымша максимумдар пайда болды. Бұл максимумдар гексагональды құрылымды мырыш оксиді (ZnO) фазасының түзілуін көрсетеді.

Алынған нәтижелерге сүйене отырып, вакуумдық ортадағы термиялық өңдеу ең алдымен мырыш селениті тұнбаларынан оттегінің булануына әкеледі деп болжауға болады. Соның салдарынан 800 °C температурада күйдірілгеннен кейін мырыш селениті фазасының үлесі 31,5 %-ға дейін төмендейді, ал тетрагональды мырыш селениті фазасының мөлшері 68,5 %-ды құрайды.

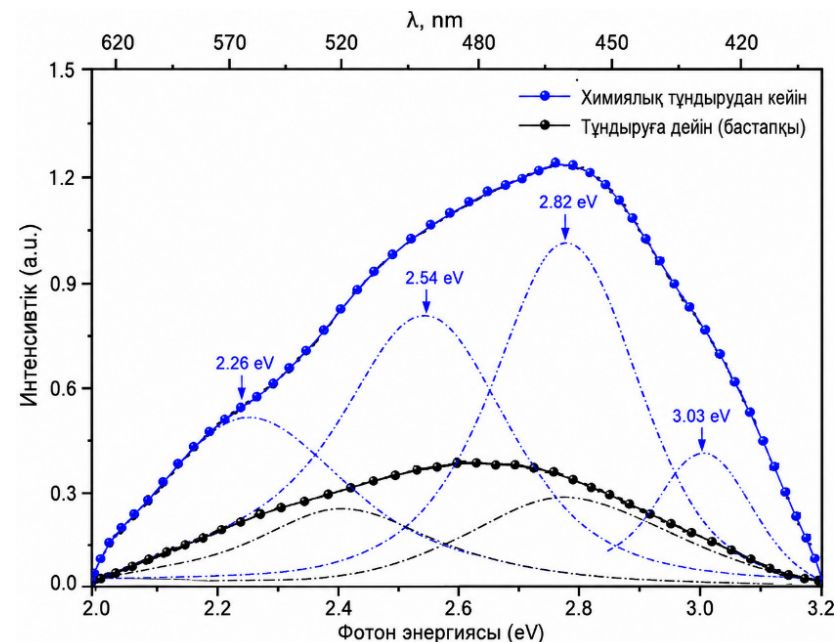
Температураның одан әрі жоғарылауы кезінде селен құрамды компоненттердің булануы басталады [13]. Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері бойынша, 1000 °C температурада күйдірілгеннен кейін тұнбалардың негізгі бөлігін гексагональды құрылымды мырыш оксиді фазасы құрайды, оның мөлшері 77,3 %-ға жетеді. Ал орторомбалық құрылымды мырыш селениті фазасының үлесі 22,7 %-ды құрайды.

Фотолюминесценттік қасиеттері

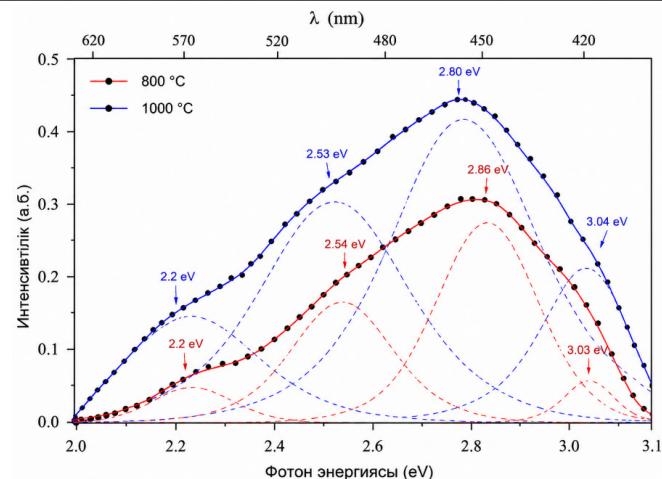
Бастапқы күйдегі нанокристалдары бар үлгінің және термиялық өңделген үлгілердің фотолюминесценция спектрлері 4 және 5-суреттерде берілген. Салыстырмалы талдау жүргізу мақсатында 4-суреттің ішкі бөлігінде нанокристалдар тұндырылғанға дейінгі бастапқы SiO₂ нанокеуекті/Si темплейтінің фотолюминесценция спектрі көрсетілген.

Зерттелген үлгілердің фотолюминесценция спектрлерінде 400–600 нм аралығындағы кең сәулелену жолағы байқалады. Спектрлік ыдырату нәтижесінде бұл жолақтың максимумдары 550 нм (2,2 эВ), 488 нм

(2,54 эВ), 440 нм (2,82 эВ) және 410 нм (3,03 эВ) аймақтарында орналасқан төрт Гаусс компонентінен тұратыны анықталды. Мырыш селениті қосылысының люминесценциясы ZnSe және ZnO фазаларының сәулелену үлестерінің қосындысы ретінде қарастырылуы мүмкін. Әдебиет мәліметтері бойынша [14], шамамен 550 нм аймағындағы жасыл сәулелену оттегі тапшылығынан пайда болатын терең деңгейлі тұзақтық күйлермен байланысты.



4-сурет – Бастапқы SiO₂ нанокөекті/Si темплейтінің және химиялық тұндырудан кейінгі мырыш селениті нанокристалдарының фотолюминесценция спектрлері және олардың Гаусс компоненттеріне жіктелуі



5-сурет – Жоғары температураларда (800 және 1000 °C) күйдірілген мырыш селениті нанокристалдарының фотолуминесценция спектрлері және олардың Гаусс компоненттеріне жіктелуі

Шамамен 488 нм аймағында орналасқан жолақ Zn және Se вакансияларымен, сондай-ақ аралық энергетикалық күйлермен байланысқан донорлық-акцепторлық жұптардың сәулеленуіне сәйкес келуі мүмкін [15]. Ал 440 нм маңындағы көк сәулелену ZnO кристалдық торының аралық позицияларында орналасқан оттегі атомдарынан туындайтын ақаулармен байланыстырылады [16]. 410 нм аймағындағы жолақ ZnO нанобөлшектеріне тән күлгін сәулеленуге сәйкес келеді және Zn_i мен VZn типті кешенді ақаулардың, сондай-ақ ZnO түйіршіктері шекараларындағы интерфейстік тұзақтық күйлердің әсерінен пайда болуы мүмкін [17].

Қызықты жайт, бастапқы тұндырылған нанокристалдардың фотолуминесценция қарқындылығы термиялық өңдеуден кейін төмендейді, алайда сәулелену максимумдарының орналасуы синтезделген және күйдірілген үлгілер үшін іс жүзінде өзгеріссіз қалады. Жоғарыда келтірілген нәтижелер фотолуминесценцияның ақаулық табиғатқа ие екенін көрсетеді. Осыған байланысты термиялық өңдеуден кейін фотолуминесценция қарқындылығының төмендеуін ақаулардың жойылуымен түсіндіруге болады. Дегенмен, бұл құбылысты тұндырылған зат массасының термиялық өңдеу барысында азаюымен байланыстыру анағұрлым орынды болып көрінеді. Зерттеу аясында күйдірілген үлгілердің масса жоғалту шамасы арнайы бағаланған жоқ. Алайда әдебиет мәліметтері бойынша жоғары

температуралық өңдеу кезінде $ZnSeO_3$ немесе ZnSe қосылыстарының массасы шамамен 30–40 %-ға дейін азаюы мүмкін [18].

Күйдіру температурасының жоғарылауымен 488, 440 және 410 нм аймақтарындағы сәулелену жолақтарының қарқындылықтарының қайта бөлінуі байқалады. Атап айтқанда, 1000 °C температурада күйдірілген үлгіде 440 және 410 нм аймақтарындағы көк және күлгін сәулеленудің қарқындылығы 800 °C температурада күйдірілген үлгімен салыстырғанда артады. Ал 488 нм аймағындағы жолақтың қарқындылығы, керісінше, төмендейді.

Жоғарыда айтылғандай, 488 нм аймағындағы сәулелену Zn және Se вакансияларымен, сондай-ақ аралық энергетикалық күйлермен байланысқан донорлық-акцепторлық жұптарға сәйкес келеді және ZnSe фазасымен байланысты. Ал 440 және 410 нм аймақтарындағы сәулелену жолақтары ZnO фазасындағы ақаулармен байланысты сәуле шығару орталықтарына тән. Жоғары температурада күйдірілген үлгілерде ZnO нанокристалдарына тән көк және күлгін сәулелену қарқындылығының артуы рентгендік дифракциялық талдау нәтижелерімен жақсы үйлеседі. Рентгенқұрылымдық талдау деректеріне сәйкес, 1000 °C температурада күйдірілген үлгілердегі тұнбалардың негізгі бөлігін ZnO фазасы құрайды (77,3 %), ал мырыш селениті фазасының үлесі 22,7 %-ға дейін төмендейді. Ал 800 °C температурада күйдірілген үлгіде мырыш селениті және мырыш селениді фазаларының мөлшері тиісінше 31,5 % және 68,5 % құрайды. Сондықтан 488 нм аймағындағы сәулеленудің мырыш селениді фазасымен байланысты екенін ескерсек, оның қарқындылығы мырыш селениді фазасының мөлшері жоғары үлгіде күштірек байқалуы заңды құбылыс болып табылады.

Электрлік қасиеттері

Химиялық тұндыру әдісімен синтезделген мырыш селениті нанокристалдарының электрлік қасиеттерін зерттеу мақсатында олардың вольт-амперлік сипаттамалары (ВАС) өлшенді. Өлшеу кезінде нанокристалдармен толтырылған аймақ екі металл электродтың арасына орналастырылды. Өлшенетін аймақтың ауданы $0,3 \text{ см}^2$ құрады. Электродтар мультиметр арқылы ток көзіне тізбектей жалғанды.

6-суретте бастапқы және термиялық өңдеуден кейінгі үлгілердің вольт-амперлік сипаттамалары көрсетілген.

SiO_2 қабатын қалыптастыру үшін пайдаланылған бастапқы кремний түптөсемі n-типті өткізгіштікке ие болды. Вольт-амперлік сипаттамаларды талдау нәтижелері SiO_2 нанокеукті/Si құрылымының да, мырыш селениті нанокристалдарымен толтырылған SiO_2 нанокеукті/Si құрылымының да электрондық өткізгіштік типіне жататынын көрсетті. Сонымен қатар, барлық зерттелген үлгілердің вольт-амперлік сипаттамалары айқын сызықтық емес тәуелділікке ие екендігі анықталды.

Нанокристалдармен толтырылған кеуекті құрылымның меншікті электрөткізгіштігі келесі өрнек бойынша есептелді:

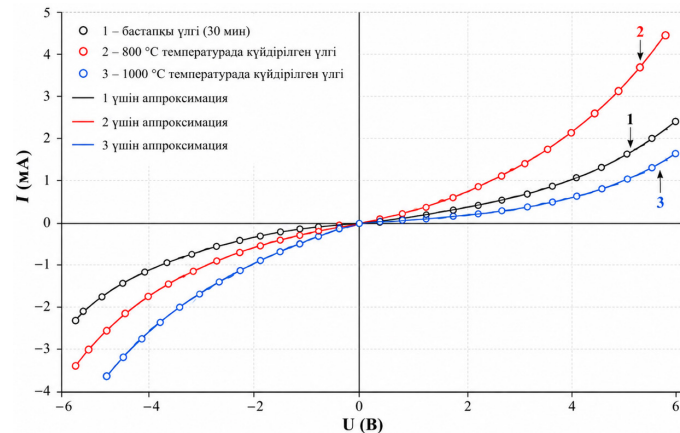
$$\sigma = \frac{dl}{dU} \frac{l}{A} \quad (1)$$

мұндағы: σ – құрылымның меншікті электрөткізгіштігі, Ом⁻¹ см⁻¹; dl/dU – вольт-амперлік сипаттамасының көлбеулігінен анықталатын дифференциалдық өткізгіштік; l – нанокристалл массивінің ұзындығы (оксид қабатының қалыңдығына сәйкес келеді, шамамен 700 нм); A – электрлік түйісу ауданы.

Нанокристалл массивінен тұратын әрбір конустық наносымның электрөткізгіштігі келесі өрнек арқылы анықталды:

$$\sigma_W = \frac{dl}{dU} \frac{l}{A\Phi\eta\pi r^2} \quad (2)$$

мұндағы: σ_W – жеке конустық наносымның меншікті электрөткізгіштігі; Φ – кеуектердің тығыздығы; η – толық толтырылған кеуектердің үлесі; r – нанокеуектің орташа радиусы.



6-сурет – Мырыш селениті нанокристалдарының вольт-амперлік (I–V) сипаттамалары. Мұндағы: 1 – бастапқы үлгі (30 мин ХТ); 2 – 800 °C-де күйдірілген үлгі; 3 – 1000 °C-де күйдірілген үлгі. Ашық шеңберлер эксперименттік деректерді, ал тұтас сызықтар (7) теңдеу бойынша жүргізілген аппроксимация нәтижелерін көрсетеді.

Конус тәрізді нанокеуектер үшін орташа радиус мәні СЭМ кескіндерінің деректері бойынша 112,5 нм деп қабылданды.

Вольт-амперлік сипаттамаларының сызықтық емес сипатын поликристалды жартылай өткізгіштерге арналған перколяциялық өткізгіштік моделі негізінде түсіндіруге болады [19; 20]. Ұсақ түйіршікті материалдарда түйіршіктердің кристаллографиялық бағдарлануының кездейсоқтығы, олардың өлшемдері мен құрамының әркелкілігі түйіршікаралық бөгеттердің пайда болуына алып келеді. Нәтижесінде материал ток тасымалдаушылары үшін рұқсат етілген және тыйым салынған аймақтарға бөлініп, перколяциялық құрылым қалыптасады. Поликристалдың тиімді электрөткізгіштігі өткізгіштік аймағының төменгі бөлігіндегі кездейсоқ энергетикалық рельефтің перколяциялық деңгейін анықтайтын критикалық бөгеттердің биіктігімен сипатталады. Ток тасымалдаушылар тек критикалық ішкі желіге (шексіз кластерге) кіретін, биіктігі $\xi \leq \xi_c$ болатын бөгеттер арқылы өте алады. Түйіршікаралық бөгеттердің биіктіктері бойынша таралу функциясы $f(\xi)$ перколяция деңгейін анықтайтын ξ_c параметрін басқарады және ол келесі өрнекпен анықталады [19]:

$$p_c = \int_{\xi_{min}}^{\xi_c} f(\xi) d\xi \quad (3)$$

мұндағы p_c – корреляциялық шек. Күшті электр өрістерінде бөгеттік ретсіз жүйенің электрөткізгіштігінің өзгеруі тек қолданылған өрістің әсерінен бөгет биіктігінің төмендеуімен ғана емес, сонымен қатар ток тасымалына жауап беретін критикалық ішкі желінің қайта құрылуымен де байланысты болады. Бұл жағдайда вольт-амперлік сипаттамасы келесі өрнекпен жазылады [19]:

$$I = I_0 \exp \left[\left(\frac{ce\bar{E}L}{k_b T} f^{-\nu}(\xi_c) \right)^{1/(1+\nu)} \right] \quad (4)$$

мұндағы c – тұрақты коэффициент $c \approx 1$; e – электрон заряды; L – түйіршіктің орташа өлшемі; k_b – Больцман тұрақтысы; $\bar{E}$ – электр өрісінің кернеулігі; $\nu \approx 0,9 \div 1$ – үшөлшемді жағдай үшін критикалық көрсеткіш [20].

Қолданылған кернеу әсерінен түйіршікаралық күйлер толтырылған жағдайда ретсіз поликристалды жартылай өткізгіштің электрөткізгіштігі келесі өрнекпен сипатталады [12]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[(cV_0/k_b T) \left(\frac{e\bar{E}L}{\delta V} \right)^{1/\nu} \right] \quad (5)$$

мұндағы V_0 – өртүрлі түйіршік шекаралары үшін бөгет биіктігінің кездейсоқ өзгерістерінің амплитудасы; δV – электрондардың қармалуы нәтижесінде бөгет биіктігінің арту шамасы.

Түйіршікаралық күйлер алдын ала толтырылған деп есептеген жағдайда электрөткізгіштік келесі түрде өрнектеледі [19]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[D(\bar{E})^{1/(1+\nu)} \right] \quad (6)$$

Әдебиетте көрсетілгендей [17], A^2B^6 типті жартылай өткізгіштердегі кристаллитаралық шекаралар акцепторлық қасиетке ие. Олар беткі күйлерде теріс заряд жинақтап, нәтижесінде кристаллитаралық потенциалдық бөгеттердің қалыптасуына себеп болады.

Тәжірибелік ток-кернеу сипаттамалары (6-сурет) (6) теңдеуімен сипатталатын модельмен жақсы сәйкес келеді. Толығырақ жағдайда ток тығыздығы Пул–Френкель теңдеуімен сипатталуы мүмкін [2] ($\nu = 1$):

$$j = \sigma_0 \bar{E} \exp \left(\frac{\sqrt{ceL\Delta E}}{k_b T} \right) \quad (7)$$

мұндағы ($c = 1$) деп қабылданған; L – әрбір үлгі үшін негізгі нанотүнба фазасының кристаллит өлшемі (2-кесте бойынша); Δ – кездейсоқ потенциалдың шамасы; σ_0 – төмен электр өрістеріндегі омикалық электрөткізгіштік.

Барлық үлгілер үшін σ_0 параметрінің сәйкестендірілген мәндері 3-кестеде келтірілген. Өлшенген ток-кернеу сипаттамаларымен ең жақсы сәйкестік барлық үлгілер үшін I – V қисығының тура тармағында $\Delta = 0,012$ эВ болған жағдайда алынды. Бұл нәтиже термиялық өңдеу барысында бастапқы $ZnSeO_3$ нанокристалдарының $ZnSe$ және ZnO фазаларына ішінара ыдырауына қарамастан, өткізгіштік механизмінің сапалық тұрғыдан өзгермейтінін және негізінен үлестік мөлшері ең жоғары фазаның электрөткізгіштік қасиеттерімен анықталатынын көрсетеді.

3-кесте – Бастапқы және күйдірілген үлгілердегі нанокристалдардың электрофизикалық сипаттамалары

Көрсеткіш	Бастапқы үлгі	800 °C температурада күйдірілген үлгі	1000 °C температурада күйдірілген үлгі
Нанокристалл массивімен толтырылған құрылымның меншікті электрөткізгіштігі, σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	$1,0 \times 10^{-7}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$5,9 \times 10^{-8}$
Нанокристалл массивінен тұратын жеке конустық наносымның меншікті электрөткізгіштігі, σW , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	$2,7 \times 10^{-6}$	$8,5 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$
Кездейсоқ потенциал, Δ , эВ	0,012	0,012	0,012
Төмен өрістегі омикалық электрөткізгіштік, σ_0 , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	$2,0 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-7}$

Осылайша, ең жоғары меншікті электрөткізгіштік 800 °C температурада күйдірілген үлгі үшін байқалды.

Қорытынды

Мырыш селениті нанокристалдары SiO_2/Si тректік темплейттерінде химиялық түндыру әдісімен синтезделіп, олардың құрылымдық, оптикалық және электрфизикалық қасиеттеріне жоғары температуралық күйдірудің әсері зерттелді.

Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері бастапқы үлгілерде орторомбалық құрылымды мырыш селениті фазасының түзілгенін көрсетті. Вакуум жағдайында 800°C температурада күйдіру нәтижесінде мырыш селениті нанокристалдарының ішінара ыдырауы жүріп, тетрагональды құрылымды $ZnSe$ фазасы қалыптасты. Ал 1000°C температурада күйдіру кезінде құрамында селен бар компоненттердің булануына байланысты тұнбалардың негізгі бөлігін гексагональды құрылымды ZnO фазасы құрады. Сонымен қатар, термиялық өңдеу кристаллиттердің өлшемінің ұлғаюына ықпал етті.

Фотолюминесценция спектрлерінде 400-600 нм аралығындағы кең сәулелену жолағы байқалды. Күйдіру температурасының жоғарылауымен көк және күлгін сәулеленудің қарқындылығы артып, спектрлік құрамның қайта бөлінуі орын алды. Бұл өзгерістер фазалық құрамның трансформациясымен және ақаулық күйлердің өзгеруімен байланысты.

Вольт-амперлік сипаттамаларын талдау зерттелген құрылымдардың электрондық өткізгіштік типіне жататынын және айқын сызықтық емес мінез-құлық көрсететінін анықтады. Меншікті электрөткізгіштіктің ең жоғары мәні 800 °С температурада күйдірілген үлгі үшін алынып, $8,5 \times 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ құрады.

Жүргізілген зерттеулер жоғары температуралық өңдеудің мырыш селениті нанокристалдарының фазалық құрамына, фотолюминесценциялық қасиеттеріне және электрөткізгіштігіне елеулі әсер ететінін көрсетті. Алынған нәтижелер мырыш селениті негізіндегі нанокұрылымдарды оптоэлектроника және наноэлектроника құрылғыларында қолдану мүмкіндіктерін кеңейтеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Machín, A., Fontánez, K., Arango, J.C., Ortiz, D., De León, J., Pinilla, S., Nicolosi, V., Petrescu, F.I., Morant, C., Márquez, F. One-Dimensional (1D) Nanostructured Materials for Energy Applications // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 2609. – <https://doi.org/10.3390/ma14102609>.

2 Zhang, Q., Li, H., Ma, Y., Zhai, T. ZnSe Nanostructures: Synthesis, Properties and Applications // Progress in Materials Science. – 2016. – Vol. 83. – P. 472–535. – <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.07.005>

3 Kaniukov, E. Yu., Ustarroz, J., Yakimchuk, D. V., Petrova, M., Terryn, H., Sivakov, V., Petrov, A. V. Tunable Nanoporous Silicon Oxide Templates by Swift Heavy Ion Tracks Technology // Nanotechnology. – 2016. – Vol. 27. – P. 115305. – <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/11/115305>.

4 Кули, Ж., Бакранов, Н. Б., Сейтов, Б. Ж., Бакранова, Д. И., Синтез zno наностержней при различных концентрациях прекурсора для повышения плотности тока фотоэлектрохимической реакции // Вестник Торайгыров университета Серия: физика, математика и компьютерные науки. – 2025. – № 2 – С. 341–357. – <https://doi.org/10.48081/FAUE2045>

5 Кули, Ж., Идрисова, Т. К., Алиакбарова, А. А., Бакранова, Д. И., Бакранова, М. Н. Формирование развитых 2d zno наноструктур на гибкой углеродной подложке // Вестник Торайгыров университета Серия: физика, математика и компьютерные науки. – 2025. – № 4. – <https://doi.org/10.48081/NNJW3985>

6 Кули, Ж., Бакранов, Н. Б., Бакранова, Д. И., Мукаш, Ж. О. Квантовые точки bivo4 на поверхности zno – нанотрубок: синтез и характеристика // Вестник Торайгыров университета Серия: физика, математика и компьютерные науки. – 2026. – № 1. – С. 166–177. – <https://doi.org/10.48081/BGQF1893>

7 Dauletbekova, A., Akyzbekova, A., Sarsekhan, G., Usseinov, A., aimukhanov, Z., Kozlovskiy, A., Vlasukova, L.A., Komarov, F. F., Popov, A. I., Akilbekov, A. T. Ion-Track Template Synthesis and Characterization of ZnSeO₃ Nanocrystals // Crystals. – 2022. – Vol. 12. – P. 817. – <https://doi.org/10.3390/cryst12060817>.

8 Polivtseva, S., Spalatu, N., Abdalla, A., Volobujeva, O., Hiie, J., Bereznev, S. Pulsed Laser Deposition of Zn(O,Se) Layers for Optoelectronic Applications // ACS Applied Energy Materials. – 2018. – Vol. 1. – P. 6505–6512. – <https://doi.org/10.1021/acsaeam.8b01431>.

9 Акылбекова, А. Д. Комплексное исследование нанокристаллов ZnSe, осаждённых на SiO₂/Si // Вестник Торайгыров университета Серия: физика, математика и компьютерные науки. – 2025. – № 3. – С. 74–91. – <https://doi.org/10.48081/HYNG1295>

10 Акылбекова, А. Д., Мухатаева, А. Ж. Синтез и характеристика нанопроволок ZnS. // Вестник НЯЦ РК. 2024;(2):84-90. – <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-84-90>

11 Акылбекова А. Д., Ахмеди Т. Д., Сарсехан Г. Г. Синтез нанокристаллов CuO методом электроосаждения в трековых структурах. Вестник НЯЦ РК. – 2025. – No. 4. – P. 209–213. – <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-209-213>

12 Charykova, M. V., Fokina, E. L., Klimova, E. V., Krivovichev, V.G., Semenova, V.V. Physicochemical Formation Conditions and Thermal Stability of Zinc Selenites // Geology of Ore Deposits. – 2014. – Vol. 56. – P. 546–552. – <https://doi.org/10.1134/S1075701514070046>.

13 Ou, K., Wang, S., Huang, M., Zhang, Y., Wang, Y., Duan, X., Yi, L. Influence of Thickness and Annealing on Photoluminescence of Nanostructured ZnSe/ZnS Multilayer Thin Films Prepared by Electron Beam Evaporation // Journal of Luminescence. – 2019. – Vol. 199. – P. 34–38. – <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.03.014>.

14 Ramya, E., Rao, M.V., Jyothi, L., Rao, D.N. Photoluminescence and Nonlinear Optical Properties of Transition Metal (Ag, Ni, Mn) Doped ZnO Nanoparticles // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2018. – Vol. 18. – P. 7072–7077. – <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15521>.

15 Kazmersky, L.L. Polycrystalline and Amorphous Thin Films and Devices [Text]. – New York : Academic Press, 1980. – P. 135–152.

16 Gao, F., Naik, S.P., Sasaki, Y., Okubo, T. Preparation and Optical Properties of Nanosized ZnO Electrochemically Deposited in Mesoporous Silica Films // Thin Solid Films. – 2006. – Vol. 495. – P. 68–72. – <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.08.303>.

- 17 **Ravindra, C.A.** X-Ray Diffraction and Photoluminescence Studies on ZnO Nanoparticles Synthesized by Sol-Gel Auto-Combustion Method // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. – 2021. – Vol. 8. – P. 143–147.
- 18 **Zuala, L., Agarwal, P.** Growth and Characterization of ZnSe Nanocrystals Synthesized Using Solvothermal Process // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2020. – Vol. 31. – P. 14756–14766. – <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04039-6>.
- 19 **Balakhayeva, R., Akilbekov, A., Baimukhanov, Z., Usseinov, A., Giniyatova, S., Zdorovets, M., Vlasukova, L., Popov, A.I., Dauletbekova, A.** CdTe Nanocrystal Synthesis in SiO₂/Si Ion-Track Template: The Study of Electronic and Structural Properties // Physica Status Solidi A. – 2021. – Vol. 218. – P. 2000231. – <https://doi.org/10.1002/pssa.202000231>.
- 20 **Avetissov, I., Chang, K., Zhavoronkov, N., Davydov, A., Mozhevitina, E., Khomyakov, A., Kobeleva, S., Neustroev, S.** Nonstoichiometry and Luminescent Properties of ZnSe Crystals Grown from Melt and Vapor // Journal of Crystal Growth. – 2014. – Vol. 401. – P. 686–690. – <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.01.071>.

REFERENCES

- 1 **Machín, A., Fontánez, K., Arango, J. C., Ortiz, D., De León, J., Pinilla, S., Nicolosi, V., Petrescu, F.I., Morant, C., Márquez, F.** One-Dimensional (1D) Nanostructured Materials for Energy Applications // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 2609. – <https://doi.org/10.3390/ma14102609>.
- 2 **Zhang, Q., Li, H., Ma, Y., Zhai, T.** ZnSe Nanostructures: Synthesis, Properties and Applications // Progress in Materials Science. – 2016. – Vol. 83. – P. 472–535. – <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.07.005>.
- 3 **Kaniukov, E. Yu., Ustarroz, J., Yakimchuk, D. V., Petrova, M., Terryn, H., Sivakov, V., Petrov, A. V.** Tunable Nanoporous Silicon Oxide Templates by Swift Heavy Ion Tracks Technology // Nanotechnology. – 2016. – Vol. 27. – P. 115305. – <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/11/115305>.
- 4 **Kuli, Zh., Bakranov, N. B., Seitov, B. Zh., Bakranova, D. I.** [Sintez ZnO nanosterzhnej pri razlichny'x koncentraciyax prekursora dlya pov'y'sheniya plotnosti toka fotoe'lektroximicheskoy reakcii] Synthesis of ZnO Nanorods at Different Precursor Concentrations to Increase the Current Density of the Photoelectrochemical Reaction // Vestnik Toraighyrov University. Series: Physics, Mathematics and Computer Science. – 2025. – No. 2. – P. 341–357. – <https://doi.org/10.48081/FAUE2045>.
- 5 **Kuli, Zh., Idrissova, T. K., Aliakbarova, A. A., Bakranova, D. I., Bakranova, M. N.** [Formirovanie razvity'x 2D ZnO nanostruktur na gibkoj uglernodnoj

podlozhke] Formation of Developed 2D ZnO Nanostructures on a Flexible Carbon Substrate // Vestnik Toraighyrov University. Series: Physics, Mathematics and Computer Science. – 2025. – No. 4. – <https://doi.org/10.48081/NNJW3985>.

6 **Kuli, Zh., Bakranov, N. B., Bakranova, D. I., Mukash, Zh. O.** [Kvantovy'e tochki BiVO₄ na poverxnosti ZnO - nanotrubok: sintez i xarakteristika] BiVO₄ Quantum Dots on ZnO Nanotubes: Synthesis and Characterization // Vestnik Toraighyrov University. Series: Physics, Mathematics and Computer Science. – 2026. – No. 1. – P. 166–177. – <https://doi.org/10.48081/BGQF1893>.

7 **Dauletbekova, A., Akylbekova, A., Sarsekhan, G., Usseinov, A., Baimukhanov, Z., Kozlovskiy, A., Vlasukova, L. A., Komarov, F. F., Popov, A. I., Akilbekov, A. T.** Ion-Track Template Synthesis and Characterization of ZnSeO₃ Nanocrystals // Crystals. – 2022. – Vol. 12. – P. 817. – <https://doi.org/10.3390/cryst12060817>.

8 **Polivtseva, S., Spalatu, N., Abdalla, A., Volobujeva, O., Hiie, J., Bereznev, S.** Pulsed Laser Deposition of Zn(O,Se) Layers for Optoelectronic Applications // ACS Applied Energy Materials. – 2018. – Vol. 1. – P. 6505–6512. – <https://doi.org/10.1021/acsaeam.8b01431>.

9 **Akylbekova, A. D.** Comprehensive Study of ZnSe Nanocrystals Deposited on SiO₂/Si // Vestnik Toraighyrov University. Series : Physics, Mathematics and Computer Science. – 2025. – No. 3. – P. 74–91. – <https://doi.org/10.48081/HYNG1295>.

10 **Akylbekova, A. D., Mukhatayeva, A. Zh.** [Sintez i xarakteristika nanoprovolok ZnS.] Synthesis and Characterization of ZnS Nanowires // Vestnik of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. – 2024. – No. 2 (98). – P. 84–90. – <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-84-90>

11 **Akylbekova, A. D., Akhmedi, T. D., Sarsekhan, G. G.** [Sintez nanokristallov CuO metodom e'lektroosazhdeniya v trekovy'x strukturax.] Synthesis of CuO Nanocrystals by Electrodeposition in Track Structures // Vestnik of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. – 2025. – No. 4. – P. 209–213. – <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-209-213>

12 **Charykova, M. V., Fokina, E. L., Klimova, E. V., Krivovichev, V. G., Semenova, V. V.** Physicochemical Formation Conditions and Thermal Stability of Zinc Selenites // Geology of Ore Deposits. – 2014. – Vol. 56. – P. 546–552. – <https://doi.org/10.1134/S1075701514070046>.

13 **Ou, K., Wang, S., Huang, M., Zhang, Y., Wang, Y., Duan, X., Yi, L.** Influence of Thickness and Annealing on Photoluminescence of Nanostructured ZnSe/ZnS Multilayer Thin Films Prepared by Electron Beam Evaporation // Journal of Luminescence. – 2019. – Vol. 199. – P. 34–38. – <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.03.014>.

14 **Ramya, E., Rao, M. V., Jyothi, L., Rao, D. N.** Photoluminescence and Nonlinear Optical Properties of Transition Metal (Ag, Ni, Mn) Doped ZnO Nanoparticles // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2018. – Vol. 18. – P. 7072–7077. – <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15521>.

15 **Kazmersky, L. L.** Polycrystalline and Amorphous Thin Films and Devices [Text]. – New York : Academic Press, 1980. – P. 135–152.

16 **Gao, F., Naik, S. P., Sasaki, Y., Okubo, T.** Preparation and Optical Properties of Nanosized ZnO Electrochemically Deposited in Mesoporous Silica Films // Thin Solid Films. – 2006. – Vol. 495. – P. 68–72. – <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.08.303>.

17 **Ravindra, C. A.** X-Ray Diffraction and Photoluminescence Studies on ZnO Nanoparticles Synthesized by Sol-Gel Auto-Combustion Method // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. – 2021. – Vol. 8. – P. 143–147.

18 **Zuala, L., Agarwal, P.** Growth and Characterization of ZnSe Nanocrystals Synthesized Using Solvothermal Process // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2020. – Vol. 31. – P. 14756–14766. – <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04039-6>.

19 **Balakhayeva, R., Akilbekov, A., Baimukhanov, Z., Usseinov, A., Giniyatova, S., Zdorovets, M., Vlasukova, L., Popov, A.I., Dauletbekova, A.** CdTe Nanocrystal Synthesis in SiO₂/Si Ion-Track Template: The Study of Electronic and Structural Properties // Physica Status Solidi A. – 2021. – Vol. 218. – P. 2000231. – <https://doi.org/10.1002/pssa.202000231>.

20 **Avetissov, I., Chang, K., Zhavoronkov, N., Davydov, A., Mozhevitina, E., Khomyakov, A., Kobeleva, S., Neustroev, S.** Nonstoichiometry and Luminescent Properties of ZnSe Crystals Grown from Melt and Vapor // Journal of Crystal Growth. – 2014. – Vol. 401. – P. 686–690. – <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.01.071>.

21.06.26 ж. баспаға түсті.

24.06.26 ж. түзетулерімен түсті.

06.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. Д. Акылбекова¹, К. А. Бакбергеннова², А. Т. Тулегенова³,
А. А. Кисабекова⁴, Г. Ф. Сарсехан⁵

^{1,5}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;

²«Технический колледж» акимата города Астана,
Республика Казахстан, г. Астана;

³Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы;

⁴Павлодарский педагогический университет имени А. Маргулана
Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 21.06.26.

Поступило с исправлениями 24.06.26.

Принято в печать 06.09.26.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ СЕЛЕНИТА ЦИНКА

В данной работе исследовано влияние высокотемпературного отжига на структурные, оптические и электрофизические свойства нанокристаллов селенита цинка (ZnSeO₃), синтезированных методом химического осаждения в трековых темплейтах SiO₂/Si. Нанокристаллы селенита цинка были получены химическим осаждением из растворов прекурсоров хлорида цинка и диоксида селена при температуре 18 °С. Полученные образцы подвергались термической обработке в вакууме при температурах 800 и 1000 °С. Морфология образцов исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии, кристаллическая структура – методом рентгенодифракционного анализа, оптические свойства – методом фотолюминесцентной спектроскопии, а электрофизические характеристики – путем измерения вольт-амперных характеристик.

Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что в исходных образцах формируется орторомбическая фаза селенита цинка. В процессе высокотемпературного отжига наблюдается частичное разложение нанокристаллов селенита цинка с образованием тетрагональной фазы селенида цинка при температуре 800 °С и гексагональной фазы оксида цинка при температуре 1000 °С. В спектрах фотолюминесценции обнаружена широкая полоса излучения в диапазоне 400–600 нм, связанная с дефектными состояниями. Установлено, что повышение температуры отжига приводит к увеличению интенсивности синего и фиолетового свечения и изменению спектрального состава излучения. Электрические измерения показали, что исследуемые структуры обладают электронной проводимостью, а их вольт-амперные характеристики имеют выраженный нелинейный характер. Наибольшее значение удельной электропроводности наблюдалось для образца, отожженного при температуре 800 °С.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии высокотемпературной обработки на фазовый состав, фотолюминесцентные свойства и параметры электропроводности нанокристаллов селенита цинка. Это расширяет перспективы применения данных материалов в устройствах оптоэлектроники и наноэлектроники.

Ключевые слова: селенит цинка, нанокристаллы, химическое осаждение, термическая обработка, фотолюминесценция, электропроводность, рентгеновская дифракция.

**A. D. Akylbekova¹, K. A. Bakbergenova², A. T. Tulegenova³,*

A. A. Kissabekova⁴, G. Sarsekhan⁵

^{1,5}L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;

²«Technical College» of the Akimat of Astana,
Republic of Kazakhstan, Astana;

³Al-Farabi Kazakh National University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁴A. Margulan Pavlodar Pedagogical University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 21.06.26.

Received in revised form 24.06.26.

Accepted for publication 06.09.26.

EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE ANNEALING ON THE PROPERTIES OF ZINC SELENITE NANOCRYSTALS

This study investigates the effect of high-temperature annealing on the structural, optical, and electrophysical properties of zinc selenite (ZnSeO₃) nanocrystals synthesized by chemical deposition in SiO₂/Si ion-track templates. Zinc selenite nanocrystals were obtained by chemical deposition from precursor solutions of zinc chloride and selenium dioxide at a temperature of 18°C. The synthesized samples were thermally treated in vacuum at temperatures of 800 and 1000°C. The morphology of the samples was examined by scanning electron microscopy (SEM), the crystal structure was analyzed by X-ray diffraction (XRD), the optical properties were investigated using photoluminescence spectroscopy, and the electrophysical characteristics were determined from current–voltage (I–V) measurements.

The X-ray diffraction analysis revealed the formation of an orthorhombic zinc selenite phase in the as-deposited samples. During high-temperature annealing, partial decomposition of zinc selenite nanocrystals was observed, resulting in the formation of a tetragonal zinc selenide (ZnSe) phase at 800 °C and a hexagonal zinc oxide (ZnO) phase at 1000 °C. A broad emission band in the 400–600 nm range associated with defect-related states was detected in the photoluminescence spectra. It was found that increasing the annealing temperature leads to an enhancement of blue and violet emissions and changes in the spectral composition of the luminescence. Electrical measurements showed that the investigated structures exhibit electron-type conductivity and pronounced nonlinear current–voltage characteristics. The highest value of specific electrical conductivity was observed for the sample annealed at 800 °C.

The obtained results demonstrate that high-temperature treatment significantly affects the phase composition, photoluminescence properties, and electrical conductivity parameters of zinc selenite nanocrystals. These findings expand the potential applications of these materials in optoelectronic and nanoelectronic devices.

Keywords: zinc selenite, nanocrystals, chemical deposition, thermal treatment, photoluminescence, electrical conductivity, X-ray diffraction.

Т. Бижигитов¹, *Г. Х. Оразымбетова²

^{1,2}М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті,
Қазақстан Республикасы, Тараз қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1098-6657>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2055-7426>

*e-mail: gulaiymoraz1981@gmail.com

**ПОЛИКРИСТАЛЛ 1h МҰЗ МОДИФИКАЦИЯСЫНЫҢ
ЖАН-ЖАҚТЫ СЫҒЫЛУ МОДУЛІНІҢ
ҚЫСЫМҒА ТӘУЕЛДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ**

Бұл мақалада алғаш рет атмосфералық қысымда, 273 К температурадан төменгі температураларда пайда болатын поликристаллмұздың 1h түрінің 230K, 190K, 170K температураларда $(15-195) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ қысым аралығында тығыздығының, онда тарайтын құма, көлденең толқындардың жылдамдықтары мен орташа квадраттық жылдамдықтары және жан-жақты сығылу модулі, Грюнайзен параметрінің қысымға тәуелділігі тәжірибелік өлшеулер мен теориялық есептеулер арқылы зерттелді. Тәжірибелік зерттеулер жүргізу үшін жоғары $(0-25) \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ қысым және төменгі (90–250) К температура аралығында үлгінің көлемінің өзгерісі мен онда тарайтын серпімді толқындардың жылдамдықтарын өлшейтін қондырғы жинастырылды. Зерттелетін үлгі орналасқан поршен-цилиндр типті үш қабатты камераның бөлшектері термоөңделген инструментальді болаттардан құрастырылды. Ішкі қабаты Х12М (HRC=58÷60), екінші қабаты Р18 (HRC=60÷62), сыртқы қабаты Х12М (HRC=48÷50) болаттардан тұрады. Камераның беріктілігін арттыру мақсатында қабаттар бір-біріне қыздырылып күшпен кигізілді. Жоғарғы қозғалатын және төменгі тыныштықтағы поршендер термоөңделген Р18 (HRC=60÷62) болаттан жасалды. Поршен мен цилиндрдің қабырғасының арасындағы саңылау диаметрі бойынша 0,05 мм құрайды. Жоғарғы қысымды камерадағы поршендерді нығыздау мақсатында қорғасын және мыс сақиналармен термоөңделген Р18 (HRC=58÷60) болаттан жасалған қорғаныс сақинасын қолдандық. Жоғарғы қысымда жұмыс істейтін камераны азот буымен салқындату мақсатында бір-біріне қыздырылып кигізілген ішкі цилиндрінде бұрандамен ойылған

арнасы бар екі дюралюминиден жасалған цилиндрді пайдаландық. Камера және азоттың буы өтетін құбыр жылуоқшаулағыш шыны текстолит және пенопласт материалдарымен қапталды. Камераның сыртқы қабатқа берілетін азоттың буын алу. 40 литрлік дьюардың ішінде орналасқан сұйық азотты қыздыру арқылы іске асырылды. 1h поликристалл мұз күйіндегі серпімді құма және көлденең толқындардың жылдамдықтарын арнайы жинастырған ультрадыбысты импульсті қондырғының көмегімен өлшенді. Әртүрлі температураларда 1h мұз күйінің тығыздығының онда тарайтын құма, көлденең толқын жылдамдықтарының, орташа квадраттық жылдамдығының және жан-жақты сақталу модулі мен Грюнайзен параметрінің қысым артқанда сызықты тәуелділіктен ұлғаятынын анықтадық.

Кілтті сөздер: температура, қысым, сығылу модулі, Грюнайзен параметрі.

Кіріспе

Қалыпты қысыммен төменгі 273К температураларда кристалданатын мұздың 1h күйі ежелден пайда болған табиғи материалға жатқанымен, оның жоғары қысыммен төменгі температуралардағы физикалық қасиеттері мен фазалық диаграммасы толық зерттелмеген. Мысалы, мұздың Р-Т координатасындағы фазалық диаграммасында [1; 2; 3; 4].

1h мұз күйінің басқа фазалармен шекаралары 240К температурамен 1,5 кбар қысымға дейін анықталған. Ал, 240 температурадан төменгі температуралармен 1,5 кбар қысымнан жоғары қысымдарда шекарасы анықталмай экстраполяцияланған үзік сызықтармен көрсетілген. Қазіргі таңда табиғи және жасанды түрде алынатын мұз күйінің термодинамикалық, серпімділік қасиеттерін зерттеу ғылымының өзекті мәселелеріне жатады. Себебі планетамыздың оннан бір бөлігін мұз алып жатқандықтан, климатпен экологияға үлкен ықпал етеді. Сонымен қатар Антарктида, Греландия және бір-біріне жақын арктикалық аралдарда қалыңдығы 5000 м мұздақтарда қатты күйде тұшы судың үлкен қоры анықталып отыр. Мұздың қабаттарында қысым мен температураның әсерінен мұздың фазалық диаграммасындағы күйлер пайда болуы мүмкін. Мұз күйіндегі тұшы су қабатының қалыңдығы мен оның мұздық бетінен қанша тереңдікте жатқанын анықтауымыз үшін оларда тарайтын акустикалық толқындардың жылдамдықтарын білуіміз қажет. Мақалада зерттеулерден алынған мұз күйін сипаттайтын физикалық параметрлер ғалымдар мен инженерлердің өзекті қолданбалы мәселелерді шешулеріне мүмкіндік туғызады. Соңғы жылдары баспадан шыққан ғылыми мақалаларды талдаулар үлкен емес

төменгі температурамен қысым аралығында теңіз және мұхит суларының физикалық және механикалық қасиеттеріне арналған мақалаларда Юнг және ығысу модульдері атмосфералық қысымда (253–268) К температура аралығында зерттеліп, деформацияның кернеулікке тәуелділігі сызықты екендігі дәлелденген [5; 6; 7; 8]. Ал тұщы суға 1,5 кбар қысымнан жоғары қысымда, 240 К температурадан төменгі температураларда 1 h мұз күйінің серпімділік қасиеттерін зерттеуге арналып жазылған мақалаларды таба алмадық. Сондықтан біз мұздың фазалық диаграммасында 240 К температурадан төмен, 1,5кбар қысымнан жоғары аймақты алып жатқан 1 h мұз түрінің изотермиялық үдерістердегі серпімділік қасиеттерін зерттеп, оны сипаттайтын параметрлердің қысымға тәуелділігін анықтадық [9].

Материалдар мен әдістері

Тәжірибелік зерттеу жұмыстары 3000 МПа қысымға дейін (90–250) К температура аралығында жұмыс істейтін құрылғыда [10] жүргізілді. Зерттелетін үлгі ретінде екі рет дистилляцияланған судан кристалданған мұздың 1h күйін қолдадық. Үлгідегі қысымды біртектіге жақындату және оның камераның қабырғасымен үйкеліс күшін кеміту мақсатында биіктігі 15 мм, диаметрі 12,35 мм қабырғасы жұқа, сырты графикпен жалатылған фторопластан жасалған цилиндрдің ішіне құйылған суды қатыру арқылы іске асырылды. Кристалданған поликристалл мұзда ақауларды болдырмас үшін сықымштың көмегімен 3 рет 0,5 МПа қысымға дейін сығып қайта атмосфералық қысымға жібергенде бастапқы көлемді қабылдайтындығын бақылап отырдық. 1h мұз түрінің температурасы мен қысымы оның ішінде орналасқан градуировкаланған мыс-константан термо-жұбының, ал қысым қалайы (Sn) мен галлий (Ga) электр кедергілерін, үлгінің көлемінің өзгерісі сызықты ілгерлемелі қозғалысты электр импульстріне айналдыратын түрлендіргіш арқылы автоматты түрде өлшенді [10; 11].

Орын ауыстыруды өлшейтін түрлендіргішті калибровкалау жоғары қысымды камераның сыртында орналасқан микрометрлік бурандамен жабдықталған құрылғының көмегімен жүзеге асырдық. Калибрлейтін құрылғының микрометрлік бұрандасының жүйелі түрде жіберетін қателігі $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ мм тең. Салыстырмалы қателігі 0,005 % құрайды. Термиялық ұлғаю коэффициентінің P18 маркалы болат үшін енгізетін қателігі $\pm 0,3 \cdot 10^{-5}$ 1/град.

Үлгінің жоғарғы қысымдағы көлемінің өзгерісі есептелгенде поршеньдердің деформацияларының шамалары ескеріледі. Зерттеліп отырған 1h мұз түрінің температурасы ± 10 С дәлелділікпен өлшенді. Үлгідегі ультрадыбыс толқындарының жылдамдықтарының 230 К, 190 К, 170 К температуралардағы қысымға тәуелділігі анықтау үшін резонанстық жиілігі 10 МГц пьезоэлементтен, генератордан, күшейткіштен, осциллографтан тұратын жүйені қолдандық [12]. Серпімді толқынды шығаратын көзбен қабылдағыштың рөлін кварцтан жасалған бір пьезоэлемент атқарды. Толқынның жоғарғы жылжитын поршеннің

табанынан шағылып кешігіп келу уақытын осциллограф экранындағы электр импульстерін бетесіру арқылы өлшедік. Жан-жақты сығылу модулі P-V, V-T қисықтарын дифференциалдап есептедік [13].

Серпімді толқындардың орташа квадраттың жылдамдығы мен Грюнайзен параметрлерін есептеу үшін төмендегі формулаларды пайдаландық [14; 15].

$$\langle v \rangle_{kv}^2 = \frac{v_{||}^2 + 2v_{\perp}^2}{3} \quad (1)$$

мұндағы, $v_{||}$ кума, ал $v_{\perp}$ көлденең толқындардың жылдамдықтары

$$\gamma = \frac{3}{2} \left(\frac{K}{\rho \cdot \langle v_{kv}^2 \rangle} \right) \quad (2)$$

Мұндағы, K-жан-жақты сығылу модулі, ρ -тығыздығы, $\langle v_{kv}^2 \rangle$ -толқынның таралу бағытына тәуелсіз орташа квадраттық жылдамдық.

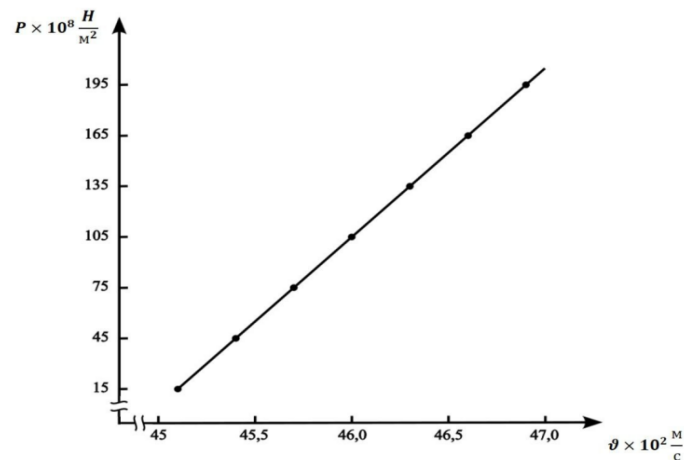
Нәтижелер және талқылу

кестеде изотермиялық үдерістерде 1h мұз күйінің тығыздығының, онда тарайтын кума, көлденең толқын жылдамдықтарының, орташа квадраттық жылдамдықтарының және жан-жақты сығылу модулі мен Грюнайзен параметрінің қысымға тәуелділіктері келтірілген.

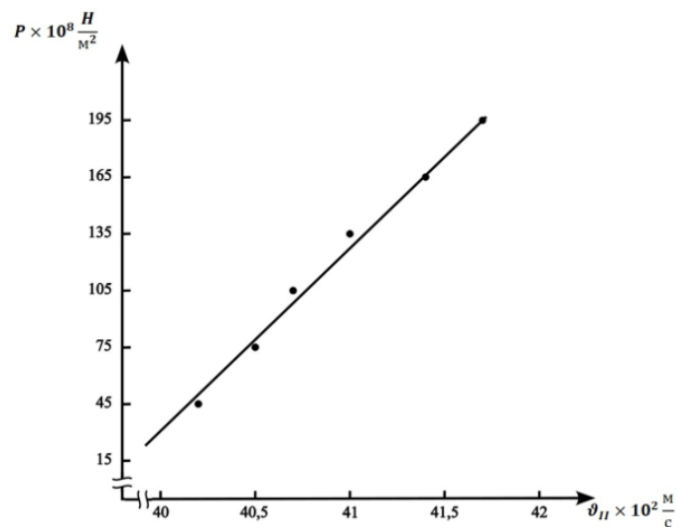
1-кесте – Тәуелділіктері: $\rho = \rho(p)_T$, $v_{||} = v_{||}(p)_T$, $\langle v_{kv}^2 \rangle = \langle v_{kv}^2 \rangle (p)_T$, $K = K(p)_T$, $\gamma = \gamma(p)_T$

фаза	T, К	$\rho \times 10^3 \frac{H}{M^2}$	$\rho \times 10^3 \frac{kz}{M^3}$	$v_{ } \times 10^3 \frac{M}{c}$	$v_{\perp} \times 10^3 \frac{M}{c}$	$\langle v_{kv}^2 \rangle \times 10^6 \frac{M^2}{c^2}$	$K \times 10^7 \frac{H}{M^2}$	$\gamma \times 10^{-3}$
1h	230	15	0,918	4,510	3,990	17,55	24	7,47
		45	0,929	4,541	4,022	17,75	26	7,94
		75	0,937	4,573	4,051	17,89	29	9,50
		105	0,947	4,604	4,079	18,25	34	10,50
		135	0,953	4,633	4,109	18,36	38	11,50
		165	0,960	4,665	4,141	18,42	43	12,25
		195	0,968	4,698	4,173	18,65	50	13,84
	190	15	0,925	5,537	4,987	26,72	30	6,05
		45	0,927	5,573	5,022	27,14	33	6,55
		75	0,931	5,610	5,058	27,49	40	7,81
		105	0,936	5,648	5,095	27,86	45	8,62
		135	0,940	5,684	5,130	28,29	50	9,40
		165	0,945	5,721	5,166	28,75	53	9,78
		195	0,949	5,757	5,200	29,40	56	10,16
	170	15	0,926	6,042	5,457	31,96	33	5,57
		45	0,929	6,082	5,496	32,41	38	5,64
		75	0,934	6,124	5,537	32,87	43	7,00
		105	0,938	6,166	5,578	33,32	50	7,99
		135	0,943	6,208	5,619	33,79	56	8,78
		165	0,945	6,251	5,661	34,37	60	9,23
		195	0,947	6,292	5,700	34,84	65	9,85

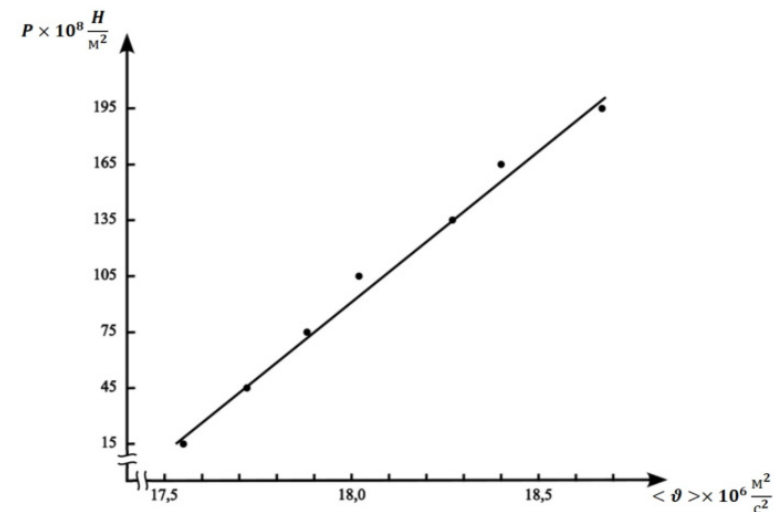
1-15 – суреттерде 1h мұз күйінің серпімділік қасиеттерін сипаттайтын параметрлердің 230 К, 190 К, 170 К температураларындағы қысымға тәуелділігін графиктері тұрғызылып көрсетілген.



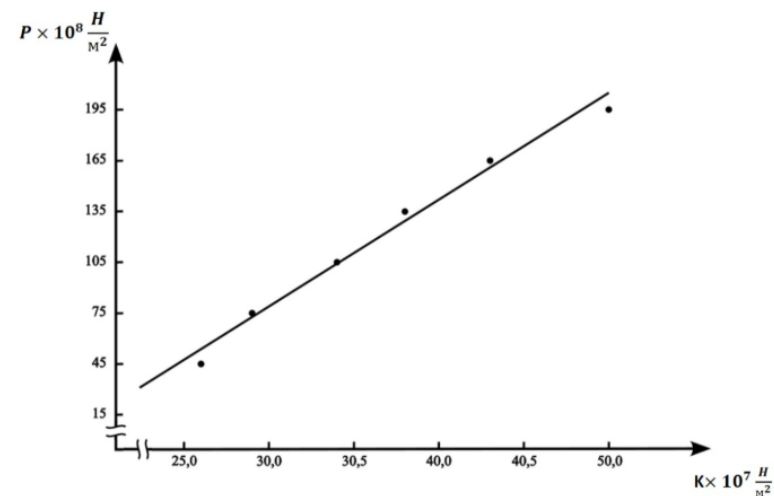
1-сурет – 1h мұз күйінде 230К температурада тарайтын кума толқын жылдамдығының қысымға тәуелділігі.



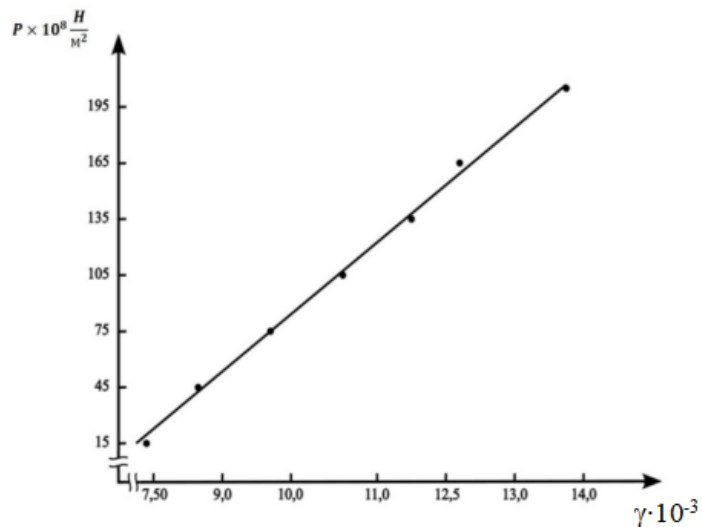
2-сурет – 1h мұз күйінде 230К температурада тарайтын кума көлденең толқын жылдамдығының қысымға тәуелділігі.



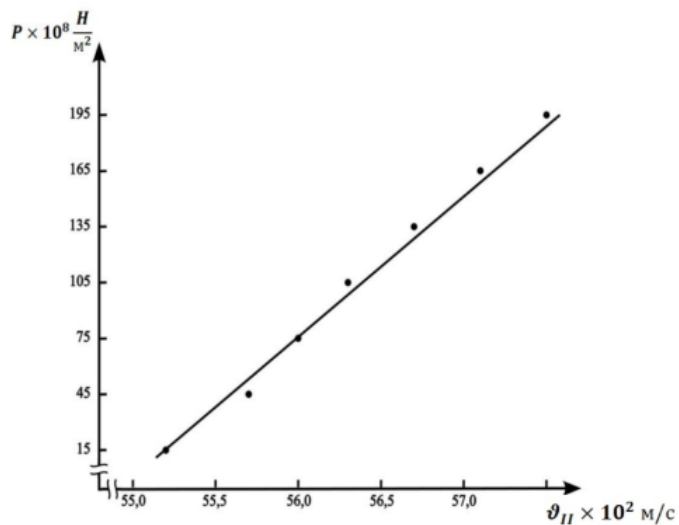
3-сурет – 1h мұз күйінде 230К температурада тарайтын серпімді толқынның орташа квадраттық жылдамдығының қысымға тәуелділігі.



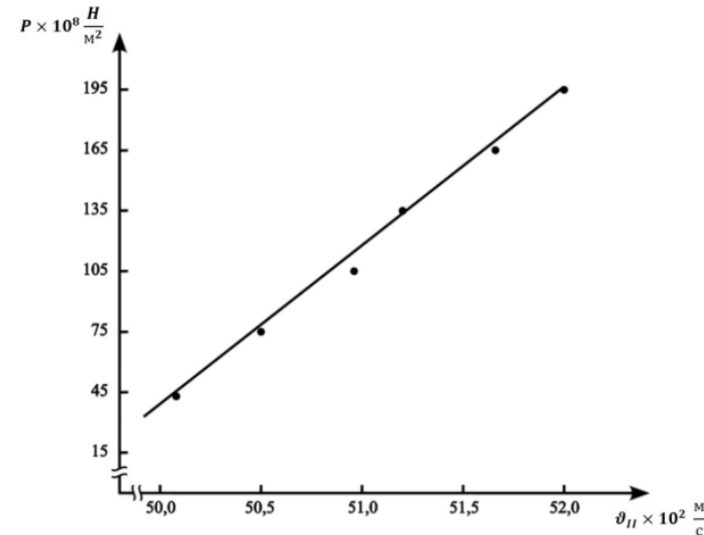
4-сурет – 1h мұз күйінде 230К температурада жан-жақты сығылу модулінің қысымға тәуелділігі.



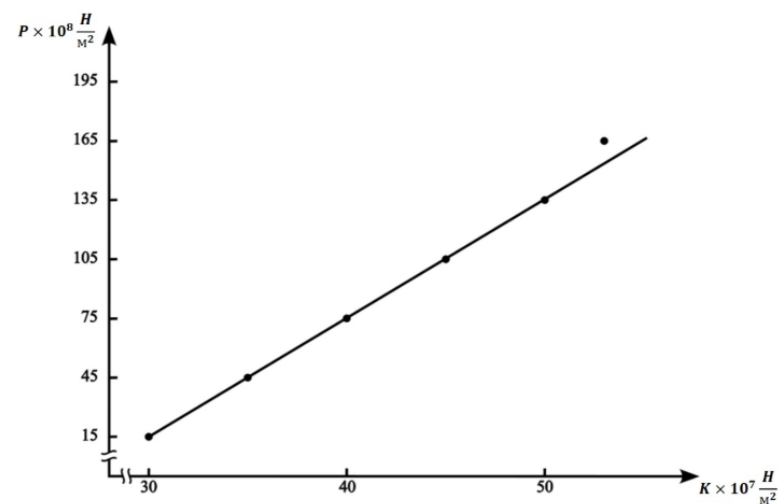
5-сурет – Іh мұз күйін сипаттайтын Грюнайзен параметрінің 230К температурада қысымға тәуелділігі



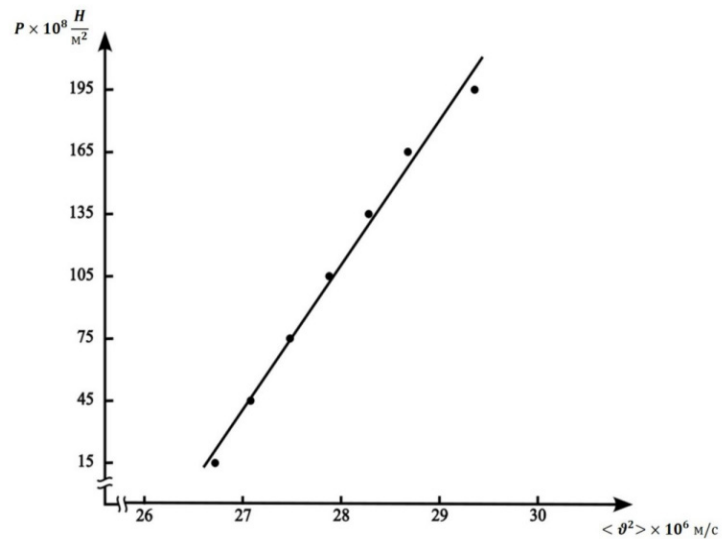
6-сурет – Іh мұз күйінде 190К температурада тарайтын кума толқын жылдамдығының қысымға тәуелділігі.



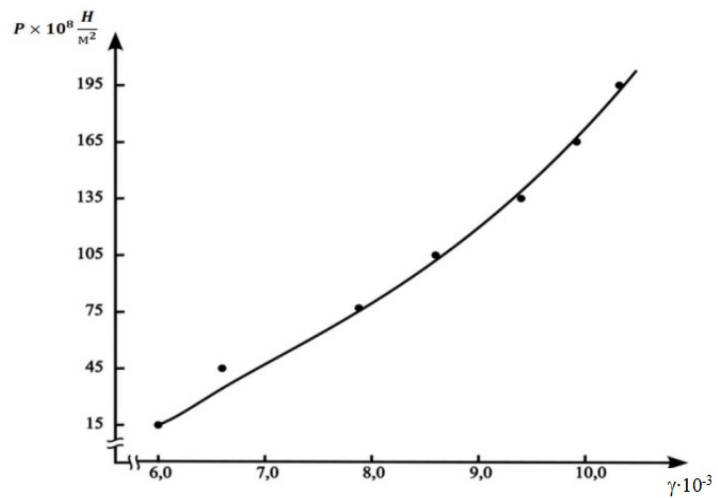
7-сурет. Іh мұз күйінде 190К температурада тарайтын көлденең толқын жылдамдығының қысымға тәуелділігі.



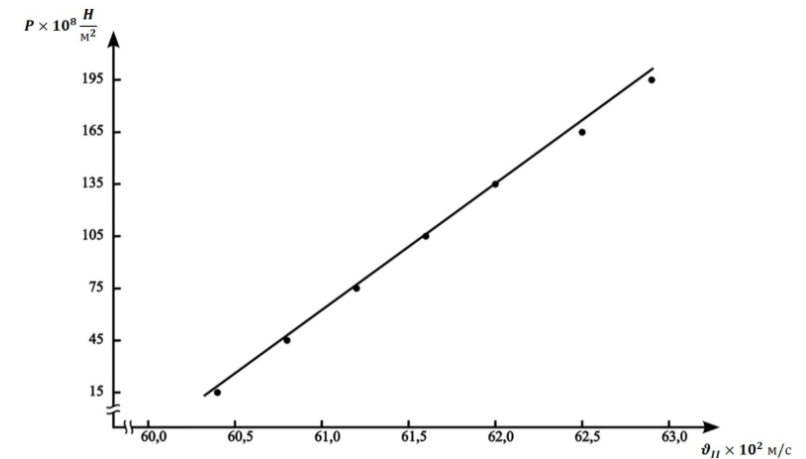
8-сурет – Іh мұз күйінің 190К температурадағы жан-жақты сығылу модулінің қысымға тәуелділігі



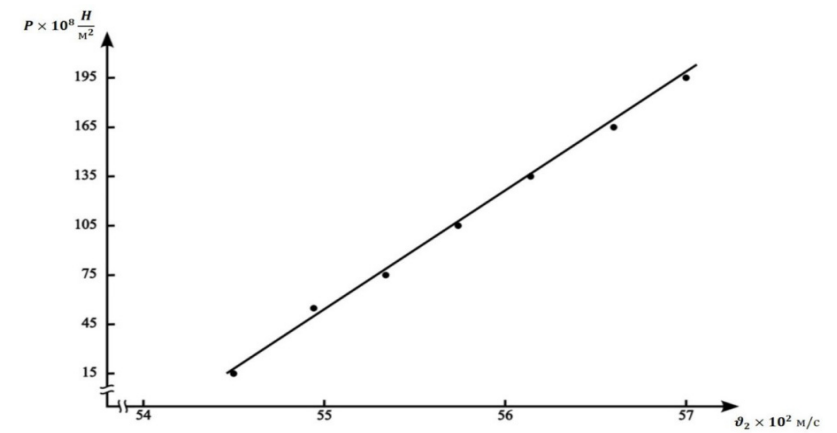
9-сурет – 1h мұз күйінде 190К температурада тарайтын серпімді толқынның орташа квадраттық жылдамдығының квадратының қысымға тәуелділігі.



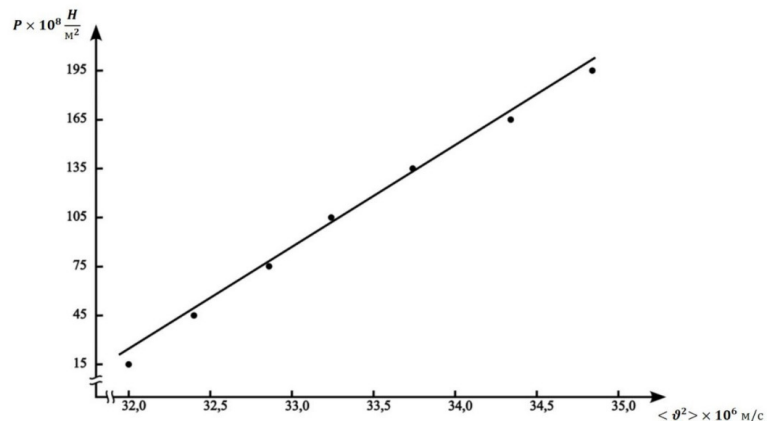
10-сурет – 1h мұз күйін сипаттайтын Грюнайзен параметрлерінің 230К температурада қысымға тәуелділігі.



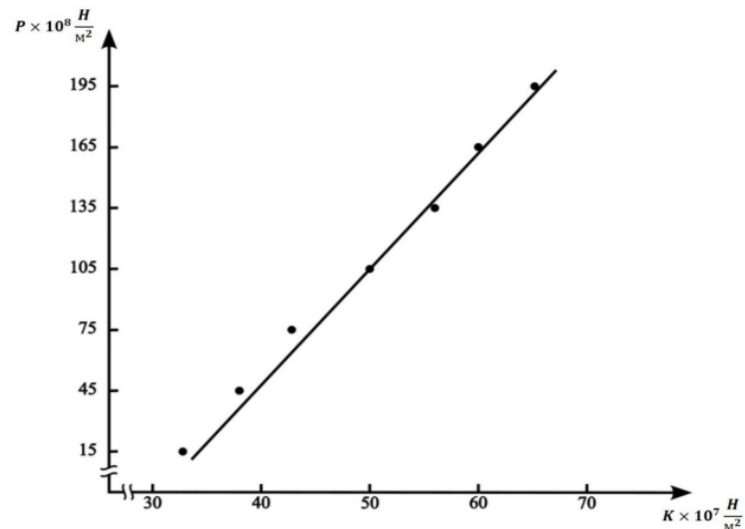
11-сурет – 1h мұз күйінде тарайтын қума толқын жылдамдығының қысымға тәуелділігі.



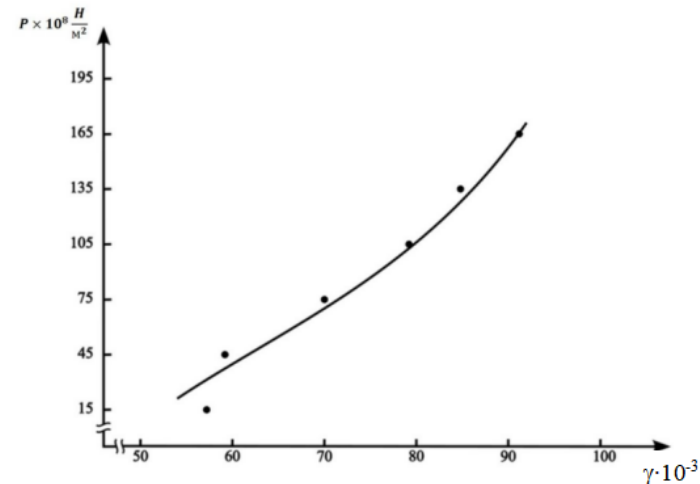
12-сурет – 1h мұз күйінде тарайтын көлденең толқын жылдамдығының қысымға тәуелділігі.



13-сурет – 1h мұз күйінде 170 К температурада тарайтын толқынның орташа квадраттың жылдамдығының квадратының қысымға тәуелділігі.



14-сурет – 1h мұз күйінің 170 К температурада жан-жақты сығылу модулінің қысымға тәуелділігі.



15-сурет – 1h мұз күйін сипаттайтын Грюнайзен параметрлерінің қысымға тәуелділігі.

Қатты денелердегі серпімді толқынның әр түрлі температураларындағы қысымға тәуелділігін зерттеу тербелістігі бөлшектердің орташа энергиясын анықтауға мүмкіндік туғызады. 1h мұз түрі поликристалл болғандықтан, оны изотропты дене деп алып, жан-жақты сығылу модуліне, тығыздық пен орташа квадраттық жылдамдығына тәуелді формуланы [2] пайдаланып есептедік.

Грюнайзен параметрі зерттеліп отырған заттың көлемінің өзгерісінің бөлшектердің тербеліс қасиеттеріне әсерін сипаттайды. Сондықтан денелердегі серпімді толқындардың орташа квадраттық жылдамдықтары мен Грюнайзен параметрлерінің изотермиялық үдерістерде қысымға тәуелділігін анықтаудың теориялық және практикалық маңыздылығы зор. Келтірілген графиктерден 1h мұз түрін сипаттайтын параметрлер ($v_{||}$, $v_{\perp}$, $\langle v^2 \rangle$, K , γ) қысым артқанда сызықты тәуелділікпен өсетіндігін көреміз. Тәжірибелік өлшеулер мен теориялық есептеулерден алынған нәтижелер физикалық заңдарына сәйкес. Зерттеу барысында аномальді үдерістерді байқамадық.

Қорытынды

Алғаш рет 1h поликристалл мұз түрінің 170 К, 190 К, 203 К температураларда тығыздығының, онда тарайтын қума, көлденең толқын жылдамдықтары мен орташа квадраттық жылдамдықтың және жанжақты сығылу модулінің, Грюнайзен параметрлерінің қысымға тәуелділігін анықтадық.

Тәжірибелік өлшеулер мен теориялық есептеулерден алынған нәтижелер планетамыздың қалыңдығы 5000 метрге жететін Антрактидада, Гренландияда және арктикалық аралдарда, Күн жүйесіндегі мұз тауларының қабаттарындағы қатты күйдегі тұщы су қорларына барлаулар жасауға көмек тигізеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Klug, D. D., Handa, Y. H., Tse, J. S., Whalley, E.** Transformation of ice VIII to amorphous ice by ‘melting’ at low temperature [Transformation of ice VIII to amorphous ice by “melting” at low temperature] // Journal of Chemical Physics. – 1989. – Vol. 90, No. 4. – P. 2390–2392. – [Электронды ресурс] – <https://pubs.aip.org/aip/jcp/article-abstract/90/4/2390/463617/Transformation-of-ice-VIII-to-amorphous-ice-by?redirectedFrom=fulltext>

2 **Уолли, Е.** Проблемы структуры льда [Текст] // Физика льда. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1973. – С. 151. Обзор докладов международного симпозиума по физике льда. [Электронды ресурс]. – <https://search.worldcat.org/title/4088600>

3 **Попова, С. В., Бенделиани, Н. А.** Высокие давления [Текст]. – Москва: Наука, 1974. – С. 163. [Electronic resource]. – https://www.studmed.ru/popova-sv-bendeliani-na-vysokie-davleniya_a771a531aa3.html

4 **Hobbs, P. V.** Ice Physics. – Oxford: Clarendon Press, 1974. – P. 837 (61). [Electronic resource]. – https://books.google.kz/books?id=2o8JAQAIAAJ&redir_esc=y

5 **Марченко, А. В., Карумен Е. Б., Чистяков, П. В.** Экспериментальное определение упругих характеристик морского ледяного покрова [Текст] // Вестник газовой науки. – 2020. – ВАН. – С. ССВУ 141–27. [Electronic resource]. – <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-uprugih-harakteristik-morskogo-ledyanogo-pokrova>

6 **Johnston, M. E.** Strength-Temperature Relationships for First-year, Second-year and Multi-year Sea Ice [Strength-temperature relationships for different types of sea ice] // Proceedings of the Twenty-ninth International Ocean and Polar Engineering Conference. – Honolulu, USA, 2019. – P. 707–714. [Electronic resource]. – <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=821af9b4-dbeb-4b12-b2d2-7ab186b90536>

7 **Kazulina, M.** Full-scale flexural strength of sea ice and freshwater ice in Spitsbergen Fjords and North-West Barents Sea [Full-scale bending strength of sea and freshwater ice in Arctic regions] // Applied Ocean Research. – 2019. – Vol. 90. – Art. 101853. [Electronic resource]. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141118718307004?via%3Dihub>

8 **Мамонтов, А. У.** Определение давления динамического разрушения льда на основе предельной модели материала [Текст] // Вестник инженерной

школы ДФУ. – Владивосток, 2019. – 1(61). – С. 28–33. [Electronic resource] – https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/1-38/?utm_source=chatgpt.com

9 **Bizhigitov, T., Sembiyeva, A.** Study the diagram of the thermodynamic state of ice at high pressure and low temperature in the P–T coordinate [Thermodynamic state diagram of ice under high pressure and low temperature in P–T coordinates] // Journal of Advanced Research in Dynamic Control Systems. – 2019. – Vol. 11, No. 6. – P. 1–5. [Electronic resource]. – https://eurekamag.com/research/103/275/103275431.php?utm_source=chatgpt.com

10 **Бижигитов, Т., Кушербаева, М. Р.** Измерение давления, температуры и объемных изменений в камере высокого давления при низких температурах и высоких давлениях [Текст] // Научный журнал. Механика и технологии. – 2017. – № 1. – С. 167–171. [Electronic resource]. – https://rmebrk.kz/journals/4181/74487.pdf?utm_source=chatgpt.com

11 **Bizhigitov, T., Sembiyeva, A.** Installation of Automatic Conversions and Registrations on Digital Printing Devices of Slowly Varying Interconnected Values of Pressure and Displacement [Текст] // Science and World. International Scientific Journal. – 2018. – № 4(56), Vol. 1. – P. 8–11. [Electronic resource]. – https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_4_56_april_vol_i.pdf?utm_source=chatgpt.com

12 **Bizhigitov, T., Zhumadilov, E.** Study of dependence of Young’s modulus, shear modulus and ultrasonic wave propagation of VL ice modification on pressure at constant temperature [Dependence of the Young’s modulus, shear modulus, and ultrasonic wave propagation in the ice VI phase on pressure at constant temperature] // Bulletin of L. N. Gumilyov Eurasian National University. Physics, Astronomy Series. – 2020. – No. 4(133). – P. 73–78. [Electronic resource]. – <https://bulphysast.enu.kz/index.php/physast/article/view/119>

13 **Sirota, N. N., Bizhigitov, T.** Polymorphic transitions of ice at a pressure up to 2500 MPa in the temperature range 90–300 K [Polymorphic transformations of ice at pressures up to 2500 MPa in the temperature range of 90–300 K] // Cryogenics Research and Technology. – 1988. – Vol. 23, No. 5. – P. 595–603. [Electronic resource]. – https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/9783112485460-003/html?utm_source=chatgpt.com

14 **Беломестных, В. Н.** Акустический параметр Грюнайзена твердых тел [Текст] // Письма в ЖЭТФ. – 2004. – Т. 30. – С. 14–19. [Electronic resource]. – <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/11301>

15 **Леонтьев, К. Л.** О связи упругих и тепловых свойств веществ [Текст] // Акустический журнал. – 1981. – Т. 27, Вып. 4. – С. 554–561. [Electronic resource]. – https://akzh.ru/pdf/1981_4_554-561.pdf

REFERENCES

- 1 **Klug, D. D., Handa, Y. H., Tse, J.S., Whalley, E.** Transformation of ice VIII to amorphous ice by ‘melting’ at low temperature [Transformation of ice VIII to amorphous ice by “melting” at low temperature] // Journal of Chemical Physics. – 1989. – Vol. 90, No. 4. – P. 2390–2392. [Electronic resource]. – <https://pubs.aip.org/aip/jcp/article-abstract/90/4/2390/463617/Transformation-of-ice-VIII-to-amorphous-ice-by?redirectedFrom=fulltext>
- 2 **Uolli, E.** Problemy` struktury` l`da [Ice structure problems] // Fizika l`da. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. – Pp. 151. Obzor dokladov mezhdunarodnogo simpoziuma po fizike l`da. [Electronic resource]. – <https://search.worldcat.org/title/4088600>
- 3 **Popova, S. V., Bendeliani, N. A.** Vy`sokie davleniya [High pressure]. – Moscow : Nauka, 1974. – Pp. 163. [Electronic resource]. – https://www.studmed.ru/popova-sv-bendeliani-na-vysokie-davleniya_a771a531aa3.html
- 4 **Hobbs, P. V.** Ice Physics. – Oxford : Clarendon Press, 1974. – Pp. 837 (61). [Electronic resource] – https://books.google.kz/books?id=2o8JAQAAIAAJ&redir_esc=y
- 5 **Marchenko, A. V., Karumen E. B., Chistyakov, P. V.** E`ksperimental`noe opredelenie uprugix karakteristik morskogo ledyanogo pokrova [Experimental determination of elastic characteristics of sea ice cover] // Vestnik gazovoj nauki. – 2020. – VAK. – Pp. CCBY 141–27. [Electronic resource]. – <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-uprugih-harakteristik-morskogo-ledyanogo-pokrova>
- 6 **Johnston, M. E.** Strength-Temperature Relationships for First-year, Second-year and Multi-year Sea Ice [Strength-temperature relationships for different types of sea ice] // Proceedings of the Twenty-ninth International Ocean and Polar Engineering Conference. – Honolulu, USA, 2019. – P. 707–714. [Electronic resource]. – <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=821af9b4-dbeb-4b12-b2d2-7ab186b90536>
- 7 **Kazulina, M.** Full-scale flexural strength of sea ice and freshwater ice in Spitsbergen Fjords and North-West Barents Sea [Full-scale bending strength of sea and freshwater ice in Arctic regions] // Applied Ocean Research. – 2019. – Vol. 90. – Art. 101853. [Electronic resource]. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141118718307004?via%3Dihub>
- 8 **Mamontov, A. U.** Opredelenie davleniya dinamicheskogo razrusheniya l`da na osnove predel`noj modeli materiala [Determination of the dynamic ice failure pressure based on the material limit model] // Vestnik inzhenernoj shkoly` DFU. – Vladivostok, 2019. – 1(61). – P. 28–33. [Electronic resource]. – https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/1-38/?utm_source=chatgpt.com

- 9 **Bizhigitov, T.; Sembiyeva, A.** Study the diagram of the thermodynamic state of ice at high pressure and low temperature in the P–T coordinate [Thermodynamic state diagram of ice under high pressure and low temperature in P–T coordinates] // Journal of Advanced Research in Dynamic Control Systems. – 2019. – Vol. 11, No. 6. – P. 1–5. [Electronic resource]. – https://eurekamag.com/research/103/275/103275431.php?utm_source=chatgpt.com
- 10 **Bizhigitov, T., Kusherbaeva, M. R.** Izmerenie davleniya, temperatury` i ob`emny`x izmenenij v kamere vy`sokogo davleniya pri nizkix temperaturax i vy`sokix davleniyax [Measurement of pressure, temperature and volumetric changes in a high-pressure chamber at low temperatures and high pressures] // Scientific journal: Mechanics and Technology. – 2017. – No. 1. – Pp. 167–171. [Electronic resource]. – https://rmebrk.kz/journals/4181/74487.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 11 **Bizhigitov, T., Sembiyeva A.** Installation of Automatic Conversions and Registrations on Digital Printing Devices of Slowly Varying Interconnected Values of Pressure and Displacement [Текст] // Science and World. International Scientific Journal. – 2018. – № 4(56), Vol. 1. – P. 8–11. [Electronic resource]. – https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_4_56_april_vol_i.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 12 **Bizhigitov, T., Zhumadilov, E.** Study of dependence of Young’s modulus, shear modulus and ultrasonic wave propagation of VL ice modification on pressure at constant temperature [Dependence of the Young’s modulus, shear modulus, and ultrasonic wave propagation in the ice VI phase on pressure at constant temperature] // Bulletin of L. N. Gumilyov Eurasian National University. Physics, Astronomy Series. – 2020. – No. 4(133). – P. 73–78. [Electronic resource]. – <https://bulphysast.enu.kz/index.php/physast/article/view/119>
- 13 **Sirota, N. N., Bizhigitov, T.** Polymorphic transitions of ice at a pressure up to 2500 MPa in the temperature range 90–300 K [Polymorphic transformations of ice at pressures up to 2500 MPa in the temperature range of 90–300 K] // Cryogenics Research and Technology. – 1988. – Vol. 23, No. 5. – P. 595–603. [Electronic resource]. – https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/9783112485460-003/html?utm_source=chatgpt.com
- 14 **Belomestny`x, V. N.** Akusticheskij parametr Gryunajzena tverdy`x tel [Acoustic Grüneisen parameter of solids] // Pis`ma v ZhE`TF. – 2004. – Vol. 30. – Pp. 14–19. [Electronic resource]. – <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/11301>
- 15 **Leont`ev, K. L.** O svyazi uprugix i teplovy`x svojstv veshhestv [On the relationship between elastic and thermal properties of substances] // Akusticheskij zhurnal. – 1981. – Vol. 27, No. 4. – P. 554–561. [Electronic resource]. – https://akzh.ru/pdf/1981_4_554-561.pdf

25.03.26 ж. баспаға түсті.
04.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
06.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Т. Бижигитов¹, *Г. Х. Оразымбетова²

^{1,2}Таразский университет имени М. Х. Дулати,

Республика Казахстан, г. Тараз.

Поступило в редакцию 25.03.26.

Поступило с исправлениями 04.06.26.

Принято в печать 06.09.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОДУЛЯ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ЛЬДА 1h ОТ ДАВЛЕНИЯ

В научной статье впервые при атмосферном давлении и температурах ниже 273 К исследованы зависимости от давления плотности поликристаллического льда модификации 1h, образующегося при этих условиях, а также скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн, их среднеквадратичной скорости, всестороннего модуля сжатия и параметра Грюнайзена в температурном интервале 230 К, 190 К и 170 К и диапазоне давлений $(15-195) \times 10^5$ Н/м². Исследования выполнены на основе экспериментальных измерений и теоретических расчётов. Для проведения экспериментальных исследований была собрана установка, позволяющая измерять изменение объёма образца и скорости распространения в нём упругих волн в диапазоне высоких давлений $(0-25) \times 10^8$ Н/м² и низких температур (90–250) К. Детали трёхслойной камеры поршень-цилиндрического типа, в которой размещался исследуемый образец, были изготовлены из термообработанных инструментальных сталей. Внутренний слой выполнен из стали X12M (HRC = 58–60), второй слой – из стали P18 (HRC = 60–62), внешний слой – из стали X12M (HRC = 48–50). С целью повышения прочности камеры её слои были посажены друг на друга методом горячей посадки. Верхний подвижный и нижний неподвижный поршни изготовлены из термообработанной стали P18 (HRC = 60–62). Зазор между поршнем и стенкой цилиндра составляет 0,05 мм по диаметру. Для герметизации поршней в камере высокого давления использовались свинцовые и медные кольца, а также защитное кольцо из термообработанной стали P18

(HRC = 58–60). Для охлаждения камеры высокого давления парами азота применялась система из двух дюралюминиевых цилиндров, внутренний из которых имел нарезанный винтовой канал; цилиндры были соединены методом горячей посадки. Камера и трубопровод для подачи азотного пара были теплоизолированы стеклотекстолитом и пенопластом. Подача азотного пара к внешнему слою камеры осуществлялась за счёт нагрева жидкого азота, находящегося в 40-литровом дьюаре. Скорости распространения продольных и поперечных упругих волн в поликристаллическом льде 1h измерялись с помощью специально разработанной ультразвуковой импульсной установки. Установлено, что с увеличением давления при различных температурах плотность льда 1h, скорости продольных и поперечных волн, их среднеквадратичная скорость, а также всесторонний модуль сжатия и параметр Грюнайзена возрастают по линейному закону.

Ключевые слова: температура, давление, модуль сжатия, параметр Грюнайзена.

Т. Bizhigitov¹, *G. Orazymbetova²

^{1,2}M. H. Dulati Taraz University,

Republic of Kazakhstan, Taraz.

Received 25.03.26.

Received in revised form 04.06.26.

Accepted for publication 06.09.26.

INVESTIGATION OF THE PRESSURE DEPENDENCE OF THE BULK COMPRESSION MODULUS OF POLYCRYSTALLINE ICE 1h MODIFICATION

In this scientific study, for the first time at atmospheric pressure and temperatures below 273 K, the pressure dependence of the density of polycrystalline Ice 1h, forming under these conditions, as well as the velocities of longitudinal and transverse elastic waves, their root-mean-square velocities, the bulk modulus, and the Grüneisen parameter were investigated in the temperature range of 230 K, 190 K, and 170 K and the pressure range of $(15-195) \times 10^5$ N/m². The study was carried out based on experimental measurements and theoretical calculations. For the experimental investigations, a setup was assembled that allows measurement of the sample's volume changes and the propagation velocities of elastic waves within it at high pressures $(0-25) \times 10^8$ N/m²

and low temperatures (90–250) K. The components of the three-layer piston-cylinder type chamber, in which the sample was placed, were made of thermally treated tool steels. The inner layer was made of steel X12M (HRC = 58–60), the middle layer of steel R18 (HRC = 60–62), and the outer layer of steel X12M (HRC = 48–50). To increase the chamber's strength, the layers were assembled using a hot-fitting method. The upper movable and lower stationary pistons were made of thermally treated steel R18 (HRC = 60–62). The gap between the piston and the cylinder wall was 0.05 mm in diameter. To seal the pistons in the high-pressure chamber, lead and copper rings, as well as a protective ring made of thermally treated steel R18 (HRC = 58–60), were used. For cooling the high-pressure chamber with nitrogen vapor, a system of two duralumin cylinders was used, the inner one having a threaded channel; the cylinders were assembled by hot fitting. The chamber and the pipeline for nitrogen vapor supply were thermally insulated with fiberglass laminate and foam. Nitrogen vapor was supplied to the chamber's outer layer by heating liquid nitrogen placed in a 40-liter Dewar. The velocities of longitudinal and transverse elastic waves in polycrystalline Ice Ih were measured using a specially designed ultrasonic pulse system. It was established that with increasing pressure at various temperatures, the density of Ice Ih, the velocities of longitudinal and transverse waves, their root-mean-square velocities, as well as the bulk modulus and the Grüneisen parameter, increase linearly.

Keywords: temperature, pressure, bulk modulus, Grüneisen parameter.

МРНТИ 29.19.16, 29.19.13

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/87-104>

М. К. Даутбеков¹, *А. Мұрал², Л. Г. Сулюбаева³

^{1,2}ТОО «PlasmaScience»,

Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;

³Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, Казахстан, г. Усть-Каменогорск.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0203-6050>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1924-1459>

*e-mail: aibolm02@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА ПОРОШКА Cr_3C_2 -NiCr НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF

В работе исследовано влияние фракционного состава порошка Cr_3C_2 -NiCr и расстояния напыления на структуру, пористость и твердость покрытий, полученных методом высокоскоростного газопламенного напыления HVOF на подложке из стали 12 X 1 МФ. Для исследования были подготовлены пять образцов: В1 фракция порошка 0–20 мкм при расстоянии 300 мм, В2 – 20–30 мкм при 300 мм, В3 – 32–40 мкм при 300 мм, В4 – 32–40 мкм при 250 мм и В5 – 32–40 мкм при 200 мм. Микроструктуру покрытий изучали методом сканирующей электронной микроскопии, пористость определяли по SEM-изображениям с использованием программы ImageJ, элементное распределение оценивали методом EDS-картирования, а твердость измеряли с применением системы инструментального индентирования FISCHERScope HM2000 в соответствии со стандартом DIN EN ISO 14577-1. Установлено, что увеличение фракции порошка при расстоянии 300 мм способствует росту толщины покрытия, однако может сопровождаться повышением пористости. Наибольшая толщина покрытия была получена для образца В5 и составила $253,14 \pm 8,63$ мкм, однако его пористость достигала 6,569 %. Минимальная пористость 2,909 % и наиболее высокая твердость были выявлены у образца В4: $\text{HM} = 8063,2 \pm 619,5 \text{ N/mm}^2$, $\text{HV} = 1251,5 \pm 107,1$.

Полученные результаты показывают, что оптимальным среди исследованных режимов является напыление порошка фракции 32-40 мкм при расстоянии 250 мм, обеспечивающее формирование более плотного и равномерного покрытия Cr_3C_2 -NiCr.

Ключевые слова: Cr_3C_2 -NiCr; HVOF; фракция порошка; сталь 12X1МФ; газотермическое напыление; SEM; пористость; твердость.

Введение

В настоящее время повышение долговечности деталей машин и оборудования, работающих в условиях интенсивного изнашивания, коррозионного воздействия, эрозии и повышенных температур, является одной из актуальных задач современного материаловедения и инженерии поверхности. Во многих отраслях промышленности, включая машиностроение, энергетику, нефтегазовый сектор, транспорт, металлургию и авиационно-космическую технику, рабочие поверхности деталей подвергаются одновременному воздействию механических нагрузок, абразивных частиц, агрессивных сред и циклических температурных изменений. В таких условиях применение объемных дорогостоящих материалов не всегда является экономически целесообразным, поэтому особое внимание уделяется разработке защитных покрытий, способных обеспечить высокую твердость, износостойкость, коррозионную стойкость и термическую стабильность поверхности при сохранении прочностных свойств основы [1; 2; 3].

Одним из наиболее эффективных методов формирования износостойких покрытий является высокоскоростное газопламенное напыление HVOF. Данный метод характеризуется высокой скоростью частиц, сравнительно умеренной температурой газового потока и возможностью получения плотных покрытий с низкой пористостью, хорошей адгезией к подложке и минимальным содержанием оксидных включений [4; 5]. В отличие от традиционных методов термического напыления, HVOF позволяет снизить перегрев порошковых частиц и уменьшить степень разложения карбидной фазы, что особенно важно при нанесении карбидсодержащих композиционных покрытий. Благодаря сочетанию высокой кинетической энергии частиц и контролируемого теплового воздействия данный метод широко применяется для получения покрытий на основе WC-Co, WC-CoCr, Cr_3C_2 -NiCr и других керамико-металлических систем [6; 7; 8].

Среди карбидных материалов особый интерес представляют композиционные покрытия Cr_3C_2 -NiCr. Их структура обычно состоит из твердых частиц карбида хрома Cr_3C_2 , равномерно распределенных

в металлической связке NiCr. Карбидная фаза обеспечивает высокую твердость, сопротивление абразивному и эрозионному износу, тогда как никель-хромовая матрица повышает вязкость, адгезию, коррозионную стойкость и устойчивость к окислению. Благодаря такому сочетанию свойств покрытия Cr_3C_2 -NiCr рассматриваются как перспективные защитные материалы для деталей, работающих при трении в условиях сульфидсодержащих растворов, высокотемпературного окисления и горячей коррозии [9]. Несмотря на высокий уровень изученности покрытий Cr_3C_2 -NiCr, их свойства в значительной степени зависят не только от состава порошка и параметров напыления, но и от характеристик исходного порошкового материала. К числу наиболее важных характеристик относятся форма частиц, гранулометрический состав, плотность, степень агломерации, распределение карбидной фазы и состояние металлической связки. Особенно важным фактором является фракционный состав порошка, поскольку размер частиц определяет их нагрев, ускорение, плавление, деформацию при ударе о подложку и формирование ламеллярной структуры покрытия [10; 11; 13].

При HVOF-напылении мелкие частицы порошка, как правило, быстрее нагреваются и легче ускоряются в газовом потоке. Это может способствовать формированию более плотной структуры покрытия и снижению количества крупных дефектов. Однако чрезмерно мелкая фракция может быть склонна к перегреву, окислению, частичному растворению карбидной фазы и декарбюризации, что приводит к изменению фазового состава и снижению стабильности Cr_3C_2 . В свою очередь, крупные частицы обладают большей массой и могут сохранять высокую кинетическую энергию, но при недостаточном нагреве они не полностью деформируются при ударе о поверхность. Это может приводить к появлению неп полностью расплавленных частиц, повышенной пористости, неоднородности структуры и снижению адгезионной прочности покрытия [14].

Таким образом, фракция порошка является одним из ключевых факторов, определяющих микроструктуру и эксплуатационные характеристики HVOF-покрытий Cr_3C_2 -NiCr. Изменение размера частиц может влиять на толщину покрытия, шероховатость поверхности, пористость, микротвердость, распределение карбидной фазы, содержание оксидов, остаточные напряжения и износостойкость. При этом оптимальная фракция должна обеспечивать достаточный нагрев и ускорение частиц без чрезмерного разложения карбида хрома и без образования большого количества дефектов в покрытии [15].

На основании вышеизложенного целью настоящей работы является исследование влияний фракционного состава порошка Cr_3C_2 -NiCr и расстояние напыления на структуру, микротвердость покрытий, полученных

методом HVOF. Для достижения данной цели предполагается провести сравнительный анализ покрытий, нанесенных из порошков различной фракции, с использованием методов сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, измерения микротвердости, оценки пористости и трибологических испытаний. Такой подход позволит определить оптимальную фракцию порошка, обеспечивающую формирование плотного, однородного и износостойкого покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$.

Научная значимость работы заключается в установлении взаимосвязи между размером частиц исходного порошка и структурно-механическими характеристиками HVOF-покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$. Практическая значимость исследования состоит в возможности оптимизации выбора порошкового материала для получения покрытий с повышенной долговечностью, что может быть использовано при защите деталей, работающих в условиях абразивного износа, эрозии, коррозии и высокотемпературного воздействия.

Материалы и методы

В качестве материала подложки использовали жаропрочную низколегированную сталь 12Х1МФ, которая применяется для деталей, работающих при повышенных температурах и механических нагрузках. Химический состав стали 12Х1МФ представлен в таблице 1. Основными легирующими элементами данной стали являются хром, молибден и ванадий, которые способствуют повышению жаропрочности, термической стабильности и сопротивления окислению.

Таблица 1 – Химический состав стали 12Х1МФ, масс. %

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	S	P	Fe
Содержание, масс. %	0,08-0,15	0,17-0,37	0,40-0,70	0,90-1,20	0,25-0,35	0,15-0,30	≤0,30	≤0,20	≤0,025	≤0,030	основа

Перед нанесением покрытий поверхность образцов подвергали механической подготовке. Шлифование выполняли последовательно абразивными бумагами с зернистостью от P120 до P2500, постепенно уменьшая размер абразивного зерна для получения ровной и однородной поверхности. После шлифования проводили полировку до достижения требуемого качества поверхности. Затем образцы подвергали пескоструйной обработке для формирования необходимой шероховатости и подготовки поверхности к последующему нанесению покрытия.

В качестве напыляемого материала использовали композиционный порошок $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ различного фракционного состава. Покрытия на основе $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ представляют собой карбидно-металлическую систему, в которой карбид хрома Cr_3C_2 обеспечивает высокую твердость

и износостойкость, а металлическая связка NiCr способствует повышению вязкости, адгезии и стойкости к окислению. Для оценки влияния размера частиц порошка и расстояния напыления были подготовлены пять образцов, обозначенные как В1-В5.

Образцы В1-В3 были получены при одинаковом расстоянии напыления 300 мм, но с различной фракцией порошка: 0-20, 0-32 и 32-40 мкм. Образцы В4 и В5 были напылены из порошка фракции 32-40 мкм при меньших расстояниях напыления – 250 и 200 мм соответственно. Такое распределение образцов позволило оценить влияние фракционного состава порошка и дистанции напыления на формирование структуры HVOF-покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$.

Таблица 2 – Условия получения HVOF-покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$

Обозначение образца	Фракция порошка, мкм	Расстояние напыления, мм
В1	0-20	300
В2	20-32	300
В3	32-40	300
В4	32-40	250
В5	32-40	200

Нанесение покрытий осуществляли методом высокоскоростного газопламенного напыления HVOF. Данный метод основан на ускорении частиц порошка в высокоскоростном газовом потоке с последующим их ударом о поверхность подложки. При столкновении с поверхностью частицы деформируются, уплотняются и формируют слоистую структуру покрытия. Напыление проводилось роботизированным способом, что позволило обеспечить воспроизводимость процесса и поддерживать одинаковые технологические параметры для всех образцов, такие как скорость подачи порошка, скорость перемещения робота, время напыления и режим работы оборудования. Для всех образцов использовали одинаковую систему покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$. Основными изменяемыми параметрами являлись только фракция порошка и расстояние напыления. В процессе HVOF-напыления важно обеспечить достаточный нагрев и ускорение порошковых частиц. Мелкие частицы порошка быстрее нагреваются и легче ускоряются в газовом потоке, что может способствовать формированию более плотного покрытия. Однако при чрезмерном нагреве мелких частиц возможно частичное окисление или разложение карбидной фазы. Более крупные частицы, наоборот, могут сохранять высокую кинетическую энергию, но при недостаточном нагреве хуже деформируются при ударе

о подложку. Поэтому исследование влияния фракции порошка является важным этапом при выборе оптимальных условий формирования покрытия.

После напыления полученные образцы исследовали по поперечным сечениям покрытий. Для подготовки поперечных шлифов образцы разрезали, последовательно шлифовали и полировали до получения ровной поверхности. Микроструктуру поперечных сечений изучали методом сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа SEM TESCAN VEGA (Tescan, Brno, Czech Republic). Полученные SEM-изображения позволили оценить толщину покрытия, плотность структуры, наличие пор, трещин, нерасплавленных частиц и качество сцепления покрытия с подложкой.

Пористость покрытий определяли по SEM-изображениям поперечных сечений с использованием программного обеспечения ImageJ. Для анализа выбирали несколько участков каждого покрытия. Изображения обрабатывали путем выделения пористых областей и последующего расчета их площади относительно общей площади анализируемого участка. Значение пористости выражали в процентах. Такой подход позволил количественно сравнить плотность покрытий, полученных при различных фракциях порошка и расстояниях напыления.

Твердость покрытий измеряли с использованием системы инструментального индентирования FISCHERSCOPE HM2000 (Helmut Fischer GmbH, Sindelfingen, Germany) в соответствии со стандартом DIN EN ISO 14577-1. Измерения проводили на поперечном сечении покрытий. Для каждого образца выполняли несколько измерений в различных участках покрытия, после чего рассчитывали среднее значение твердости. Полученные результаты использовали для оценки влияния фракционного состава порошка и расстояния напыления на механические свойства HVOF-покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены SEM-изображения поперечных сечений HVOF-покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, нанесенных на сталь 12X1МФ при различных фракциях порошка и расстояниях напыления. Анализ поперечных сечений позволяет оценить особенности формирования покрытия, его толщину, плотность, наличие пор, дефектов, нерасплавленных частиц и качество сцепления с подложкой.

SEM-изображения показывают, что фракционный состав порошка и расстояние напыления оказывают заметное влияние на формирование структуры покрытий. Для всех образцов характерна слоистая структура, типичная для покрытий, полученных методом высокоскоростного газопламенного напыления. Такая структура формируется в результате

последовательного удара, деформации и уплотнения частиц порошка на поверхности подложки.

Образец В1, полученный из порошка фракции 0-20 мкм при расстоянии 300 мм, характеризуется наименьшей толщиной покрытия. В поперечном сечении наблюдается тонкий слой покрытия с отдельными неоднородными участками. Это может быть связано с тем, что мелкие частицы быстрее нагреваются и ускоряются в газовом потоке, однако при расстоянии 300 мм часть частиц может терять кинетическую энергию до достижения поверхности подложки. В результате снижается эффективность осаждения и формируется более тонкое покрытие.

В образце В2, полученном из порошка фракции 20–32 мкм при том же расстоянии 300 мм, покрытие выглядит более выраженным и сплошным по сравнению с В1. Увеличение размера частиц способствует более эффективному переносу материала на поверхность подложки и формированию более толстого слоя. При этом структура покрытия остается относительно плотной, без выраженного увеличения пористости.

Для образца В3, полученного из порошка фракции 32–40 мкм при расстоянии 300 мм, наблюдается увеличение толщины покрытия, однако структура становится более неоднородной. В покрытии заметны пористые и дефектные участки. Это может быть связано с тем, что более крупные частицы при данном расстоянии напыления не всегда полностью прогреваются и деформируются при ударе о поверхность подложки. В результате покрытие становится более толстым, но менее плотным.

Сравнение образцов В3, В4 и В5 позволяет оценить влияние расстояния напыления при одинаковой фракции порошка 32–40 мкм. Образец В4, полученный при расстоянии 250 мм, характеризуется более равномерной и плотной структурой. В его поперечном сечении наблюдается достаточно однородное покрытие с меньшим количеством выраженных дефектных зон. Это указывает на то, что расстояние 250 мм обеспечивает более благоприятное сочетание температуры и скорости частиц, что способствует их лучшей деформации и уплотнению при формировании покрытия.

Образец В5, полученный при расстоянии 200 мм, имеет значительно большую толщину покрытия. Однако в его структуре наблюдаются пористые области и неоднородные участки. Это показывает, что уменьшение расстояния напыления до 200 мм приводит к интенсивному осаждению частиц, но не всегда обеспечивает улучшение качества покрытия. При слишком малой дистанции частицы могут достигать поверхности с высокой температурой и скоростью, что может способствовать формированию внутренних напряжений и дефектов.

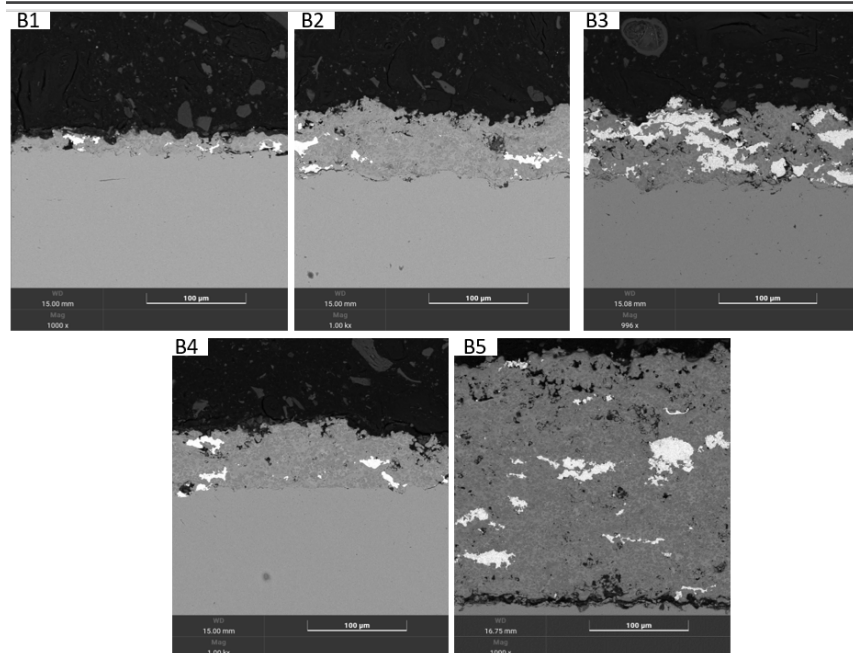


Рисунок-1-SEM-изображения поперечных сечений
HVOF-покрытий Cr_3C_2 -NiCr

На рисунке 2 представлены результаты определения толщины и пористости HVOF-покрытий Cr_3C_2 -NiCr. Толщину измеряли по SEM-изображениям поперечных сечений в трех участках каждого образца, а пористость определяли по бинарным изображениям в программе ImageJ.

Минимальная средняя толщина покрытия зафиксирована у образца B1 – $19,18 \pm 0,88$ мкм, при пористости 3,047 %. Это может быть связано с использованием мелкой фракции порошка 20 мкм при расстоянии напыления 300 мм, когда частицы частично теряют энергию до достижения поверхности подложки.

При увеличении фракции порошка до 20–32 мкм у образца B2 толщина возрастает до $69,09 \pm 11,71$ мкм, а пористость составляет 3,206 %. Это показывает, что данная фракция обеспечивает более эффективное формирование покрытия без заметного роста пористости.

У образца B3, полученного из порошка фракции 32–40 мкм при расстоянии 300 мм, толщина составляет $78,83 \pm 11,19$ мкм, однако пористость увеличивается до 7,709 %. Это может быть связано с недостаточным

прогревом или деформацией более крупных частиц, что приводит к образованию пор и дефектов.

Сравнение образцов B3–B5 показывает влияние расстояния напыления при одинаковой фракции порошка 32–40 мкм. При уменьшении расстояния до 250 мм у образца B4 толщина составляет $67,33 \pm 2,24$ мкм, а пористость снижается до минимального значения – 2,909 %. Кроме того, данный образец характеризуется наиболее равномерной толщиной покрытия.

При дальнейшем уменьшении расстояния до 200 мм у образца B5 толщина резко возрастает до $253,14 \pm 8,63$ мкм, однако пористость также увеличивается до 6,569 %. Это указывает на то, что высокая толщина покрытия не всегда соответствует его лучшему качеству.

Таким образом, анализ толщины и пористости подтверждает результаты SEM-исследования. Наиболее оптимальным режимом является образец B4, полученный из порошка фракции 32–40 мкм при расстоянии напыления 250 мм, так как он характеризуется минимальной пористостью, равномерной толщиной и более плотной микроструктурой покрытия Cr_3C_2 -NiCr на стали 12X1МФ.

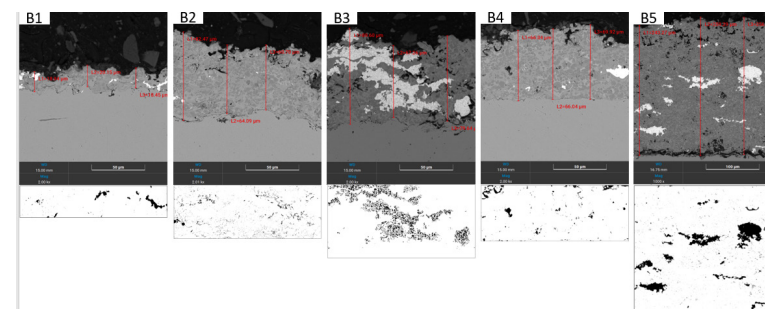


Рисунок-2 – Определение толщины и пористости
HVOF-покрытий Cr_3C_2 -NiCr для образцов B1-B5.

Таблица 3 – Толщина и пористость HVOF-покрытий Cr_3C_2 -NiCr

Образец	Средняя толщина, мкм	Пористость, %
B1	$19,18 \pm 0,88$	3,047
B2	$69,09 \pm 11,71$	3,206
B3	$78,83 \pm 11,19$	7,709
B4	$67,33 \pm 2,24$	2,909
B5	$253,14 \pm 8,63$	6,569

На рисунке 3 представлены карты распределения элементов в поперечных сечениях покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ для образцов B1-B5. По данным элементного картирования видно, что Fe преимущественно локализован в области подложки, что позволяет четко определить границу между сталью 12Х1МФ и нанесенным покрытием. В зоне покрытия интенсивность Fe значительно ниже, что подтверждает формирование отдельного напыленного слоя.

Распределение Cr наблюдается по всей толщине покрытий и соответствует составу карбидной фазы Cr_3C_2 . Для образцов B2, B4 и B5 также хорошо выражено распределение Ni, связанное с металлической связкой NiCr. Совместное присутствие Cr и Ni в зоне покрытия подтверждает формирование композиционного слоя $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$.

В образцах B1 и B2 покрытие имеет сравнительно небольшую толщину, при этом Cr распределен преимущественно в верхней зоне. В образце B3 наблюдается более неоднородное распределение элементов, что согласуется с SEM-изображениями и повышенной пористостью. Локальные участки, обогащенные отдельными элементами, могут указывать на неравномерное расплавление и уплотнение частиц порошка при расстоянии напыления 300 мм.

В образце B4 распределение Cr и Ni является более равномерным по толщине покрытия. Это согласуется с минимальной пористостью и более однородной структурой, выявленной при SEM-анализе. Следовательно, расстояние напыления 250 мм при фракции порошка 32-40 мкм способствует более стабильному формированию покрытия и равномерному распределению основных элементов.

Для образца B5 характерно формирование наиболее толстого покрытия, однако элементные карты показывают наличие неоднородных участков. Это согласуется с повышенной пористостью и дефектными зонами, выявленными ранее. Несмотря на интенсивное осаждение материала при расстоянии 200 мм, структура покрытия остается менее однородной по сравнению с B4.

На картах распределения также наблюдаются O, C, Si и W. Наличие кислорода может быть связано с частичным окислением частиц в процессе HVOF-напыления. Углерод относится к карбидной составляющей покрытия, однако его количественная оценка методом EDS может быть менее точной. Локальные участки Si и W могут быть связаны с особенностями исходного порошка, подготовкой поверхности или технологическими загрязнениями.

Таким образом, EDS-картирование подтверждает формирование покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ на поверхности стали 12Х1МФ и показывает различие в однородности элементного распределения в зависимости от режима напыления. Наиболее равномерное распределение основных элементов и более плотная структура наблюдаются у образца B4, что согласуется с результатами SEM-анализа, измерения толщины и расчета пористости.

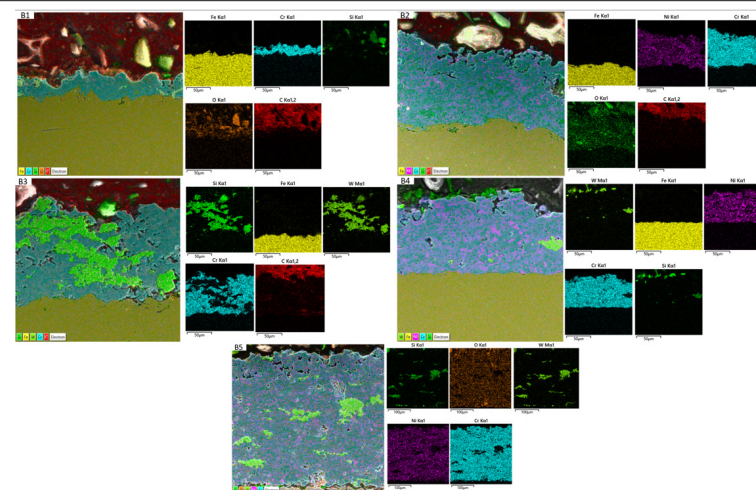


Рисунок-3-EDS-картирование распределения элементов в поперечных сечениях HVOF-покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ для образцов B1–B5.

Для оценки механических свойств покрытий было проведено инструментальное индентирование. На рисунке 4 представлены кривые «нагрузка-глубина внедрения» для образцов B1-B5, а в таблице 4 приведены значения твердости Martens (HM), параметра $\text{Eit}/(1-\nu^2)$ и твердости по Виккерсу (HV).

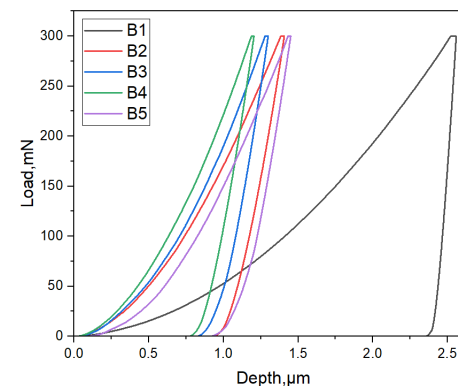


Рисунок-4 – Кривые «нагрузка-глубина внедрения» для HVOF-покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ образцов B1–B5.

Таблица-4-Результаты инструментального индентирования HVOF-покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$

Образец	НМ, N/mm ²	Eit/1-v ² , а	HV
B1	1759±104.8	211.3±1.3	198.7±12.7
B2	6122.7±1850.7	183.1±45.0	928.0±334.8
B3	7150.6±1796.2	216.3±38.8	1094±330.5
B4	8063.2±619.5	239.1±21.1	1251.5±107.1
B5	5447.7±278.0	171.9±6.7	809.6±60.1

Согласно полученным данным, наименьшие значения твердости наблюдаются у образца B1: НМ составляет $1759 \pm 104,8 \text{ N/mm}^2$, а HV - $198,7 \pm 12,7$. На кривой нагружения для данного образца фиксируется наибольшая глубина проникновения индентора, что указывает на низкое сопротивление пластической деформации. Это может быть связано с малой толщиной покрытия и менее плотной структурой.

Для образцов B2 и B3 наблюдается заметное увеличение твердости. Значения НМ составляют $6122,7 \pm 1850,7$ и $7150,6 \pm 1796,2 \text{ N/mm}^2$, а HV - $928,0 \pm 334,8$ и $1094 \pm 330,5$ соответственно. На кривых «нагрузка–глубина внедрения» это проявляется уменьшением глубины проникновения индентора. Однако для B3 ранее была установлена повышенная пористость, что указывает на неоднородность структуры покрытия.

Наибольшие значения твердости получены для образца B4: НМ - $8063,2 \pm 619,5 \text{ N/mm}^2$, Eit/(1-v²) - $239,1 \pm 21,1$, HV - $1251,5 \pm 107,1$. Данный образец характеризуется одной из наименьших глубин внедрения, что свидетельствует о высоком сопротивлении деформации. Эти результаты согласуются с SEM-анализом и данными по пористости, согласно которым B4 имеет наиболее плотную и равномерную структуру.

У образца B5 твердость снижается по сравнению с B4: НМ составляет $5447,7 \pm 278,0 \text{ N/mm}^2$, Eit/(1-v²) - $171,9 \pm 6,7$, HV - $809,6 \pm 60,1$. Несмотря на значительную толщину покрытия, его механические свойства ниже, что связано с повышенной пористостью и структурной неоднородностью. Следовательно, увеличение толщины покрытия не всегда приводит к повышению твердости.

Сопоставление полученных результатов показало, что наилучшее сочетание свойств наблюдается у образца B4, полученного из порошка фракции 32–40 мкм при расстоянии напыления 250 мм. Для него характерны высокая твердость, минимальная пористость и более однородная микроструктура. Образцы B3 и B5 также имеют сравнительно высокие значения твердости, однако их качество ограничивается повышенной

пористостью, тогда как B1 демонстрирует минимальные показатели из-за малой толщины и менее плотной структуры покрытия.

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP226683418)

Выводы

В работе проведено исследование HVOF-покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, нанесенных на сталь 12X1МФ с использованием порошков различной фракции и разных расстояний напыления. Были изучены микроструктура поперечных сечений, толщина покрытий, пористость, элементное распределение и твердость покрытий.

SEM-анализ показал, что фракционный состав порошка и расстояние напыления существенно влияют на формирование структуры покрытий. Образец B1, полученный из порошка фракции 0–20 мкм при расстоянии 300 мм, характеризовался наименьшей толщиной покрытия - $19,18 \pm 0,88$ мкм. При увеличении фракции порошка до 20–32 мкм и 32–40 мкм при том же расстоянии напыления толщина покрытий возрастала до $69,09 \pm 11,71$ мкм для B2 и $78,83 \pm 11,19$ мкм для B3.

Установлено, что увеличение фракции порошка при расстоянии 300 мм способствует росту толщины покрытия, однако для образца B3 это сопровождалось увеличением пористости до 7,709 %, что является максимальным значением среди исследованных образцов. Это указывает на менее равномерное формирование покрытия при использовании фракции 32-40 мкм на расстоянии 300 мм.

Сравнение образцов B3, B4 и B5 показало значительное влияние расстояния напыления при одинаковой фракции порошка 32–40 мкм. При уменьшении расстояния до 250 мм образец B4 показал наиболее благоприятные характеристики: средняя толщина составила $67,33 \pm 2,24$ мкм, а пористость снизилась до 2,909 %. Данный образец также характеризовался более равномерной микроструктурой и меньшим количеством дефектных участков.

Образец B5, полученный при расстоянии 200 мм, имел наибольшую толщину покрытия - $253,14 \pm 8,63$ мкм. Однако пористость данного покрытия составила 6,569 %, что указывает на наличие структурной неоднородности и дефектных зон. Следовательно, увеличение толщины покрытия не всегда приводит к улучшению его качества.

EDS-картирование подтвердило формирование покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ на поверхности стали 12X1МФ. Распределение Fe было преимущественно сосредоточено в области подложки, тогда как Cr и Ni локализовались в зоне покрытия. Наиболее равномерное распределение основных элементов

наблюдалось у образца В4, что согласуется с результатами SEM-анализа и оценки пористости.

Результаты инструментального индентирования показали, что наибольшие значения твердости были получены для образца В4: $H_M = 8063,2 \pm 619,5$ N/mm², $E_{it}/(1-\nu^2) = 239,1 \pm 21,1$, $H_V = 1251,5 \pm 107,1$. Минимальная твердость наблюдалась у образца В1, что связано с малой толщиной и менее развитой структурой покрытия. Образец В5, несмотря на максимальную толщину, имел более низкие значения твердости по сравнению с В4, что объясняется повышенной пористостью и неоднородностью структуры.

На основании полученных результатов можно заключить, что наиболее оптимальным среди исследованных режимов является образец В4, полученный из порошка Cr₃C₂-NiCr фракции 32–40 мкм при расстоянии напыления 250 мм. Данный режим обеспечивает сочетание минимальной пористости, высокой твердости, равномерной толщины и более плотной микроструктуры покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Seitov, B.** Review of physical and mechanical properties, morphology, and phase structure in Cr₃C₂-NiCr composite coatings sprayed by HVOF method / B. Seitov, S. Kurbanbekov, D. Baltabayeva [et al.] // Coatings. – 2025. – Vol. 15, no. 4. – Art. 479. – <https://doi.org/10.3390/coatings15040479>

2 **Kurbanbekov, S.** Research on the structural-phase and physical-mechanical characteristics of the Cr₃C₂-NiCr composite coating deposited by the HVOF method on E110 zirconium alloy / S. Kurbanbekov, B. Rakhadilov, D. Kakimzhanov [et al.] // Coatings. – 2024. – Vol. 14, no. 8. – Art. 1030. – <https://doi.org/10.3390/coatings14081030>

3 **Eßler, J.** Impact of hBN content on the tribological behavior and thermal diffusivity of HVOF-sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings / J. Eßler, D. Woelk, I. D. Utu, G. Marginean // Materials. – 2024. – Vol. 17, no. 22. – Art. 5470. – <https://doi.org/10.3390/ma17225470>

4 **Ksiazek, M.** An HVOF-sprayed (Cr₃C₂-NiCr + Co) composite coating on ductile cast iron: microstructure, mechanical properties, and scratch resistance / M. Ksiazek, K. Łyp-Wrońska // Materials. – 2024. – Vol. 17, no. 7. – Art. 1484. – <https://doi.org/10.3390/ma17071484>

5 **Lauzuardy, J.** Microstructure characteristics of Cr₃C₂-NiCr coatings deposited with the high-velocity oxy-fuel thermal-spray technique / J. Lauzuardy, E. A. Basuki, E. Martides [et al.] // Materials and Technology. – 2024. – Vol. 58, no. 2. – P. 137–145. – <https://doi.org/10.17222/mit.2023.869>

6 **Oliveira, R. D. P.** Influence of pre-milling of Cr₃C₂-NiCr spray powder on the fatigue life of HVOF-sprayed coating on ASTM A516 steel substrate / R. D. P. Oliveira, G. R. Cogo, B. L. Nascimento [et al.] // Materials. – 2023. – Vol. 16, no. 4. – Art. 1593. – <https://doi.org/10.3390/ma16041593>

7 **Sauceda, S.** Effect of HVOF processing parameters on Cr₃C₂-NiCr hard coatings deposited on AISI 4140 steel / S. Sauceda, S. Lascano, J. Núñez [et al.] // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2023. – Vol. 39. – Art. 101342. – <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2023.101342>

8 **Chauhan, H. R.** Role of micro- and nano-CeO₂ reinforcements on characteristics and tribological performance of HVOF-sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings / H. R. Chauhan, S. Saladi, S. Variya [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Vol. 467. – Art. 129684. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129684>

9 **Ozkan, D.** Structural characteristics and wear, oxidation, hot corrosion behaviors of HVOF-sprayed Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings / D. Ozkan // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Vol. 457. – Art. 129319. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129319>

10 **Eßler, J.** Influence of added hBN on the properties of cermet coatings based on Cr₃C₂-NiCr : doctoral dissertation / J. Eßler ; scientific supervisor I. D. Uțu ; Universitatea Politehnica Timișoara, Departamentul Ingineria Materialelor și Fabricației. – Timișoara, 2025.

11 **Irfan.** Laser re-melting of modified multimodal Cr₃C₂-NiCr coatings by HVOF: effect on the microstructure and anticorrosion properties / Irfan, M. Hu, L. Meng, C. Shi // Reviews on Advanced Materials Science. – 2023. – Vol. 62, no. 1. – Art. 20230127.

12 **Shi, C.** Deposition mechanisms and characteristics of nano-modified multimodal Cr₃C₂-NiCr coatings sprayed by HVOF / C. Shi, S. Liu, Irfan [et al.] // Reviews on Advanced Materials Science. – 2022. – Vol. 61, no. 1. – P. 526–538.

13 **He, B.** Comparative study of HVOF Cr₃C₂-NiCr coating with different bonding layer on the interactive behavior of fatigue and corrosion / B. He, L. Zhang, X. Yun [et al.] // Coatings. – 2022. – Vol. 12, no. 3. – Art. 307. – <https://doi.org/10.3390/coatings12030307>

14 **Mahade, S.** Investigating load-dependent wear behavior and degradation mechanisms in Cr₃C₂-NiCr coatings deposited by HVAF and HVOF / S. Mahade, A. Mulone, S. Björklund, U. Klement, S. Joshi // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 4595–4609. – <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.088>

15 **Wang, K.** Long-term corrosion behavior of HVOF-sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings in sulfide-containing 3.5 wt.% NaCl solution / K. Wang, S.

Hong, Z. Wei [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 3122–3132. – <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.131>

Поступило в редакцию 04.05.26.
Поступило с исправлениями 06.05.26.
Принято в печать 04.06.26.

М. К. Даутбеков¹, *А. Мұрал², Л. Г. Сулубаева³

^{1,2}ЖШС «PlasmaScience»,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

³Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

17.02.26 ж. баспаға түсті.

19.03.26 ж. түзетулерімен түсті.

04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

CR₃C₂-NICR ҰНТАҒЫНЫҢ ФРАКЦИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫНЫҢ HVOF ӘДІСІМЕН ӨНДІРІЛГЕН ЖАБЫНДАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Мақалада Cr₃C₂-NiCr ұнтағының фракциялық құрамы мен бұрку қашықтығының 12 Kh 1 MF болат негізге жоғары жылыдамдықты оттегі-жалын бұрку (HVOF) арқылы алынған жабындардың құрылымына, кеуектілігіне және қаттылығына әсерін зерттейді. Зерттеуге бес үлгі дайындалды: 300 мм бұрку қашықтығында 0–20 мкм ұнтақ фракциясы бар B1, 300 мм-де 20–30 мкм B2, 300 мм-де 32–40 мкм B3, 250 мм-де 32–40 мкм B4 және 200 мм-де 32–40 мкм B5. Жабынның микроқұрылымы сканерлеуші электронды микроскопияны қолдану арқылы зерттелді, кеуектілік ImageJ бағдарламалық жасақтамасын пайдаланып SEM кескіндерінен анықталды, элементтердің таралуы EDS картаға түсіру арқылы бағаланды, ал қаттылық DIN EN ISO 14577-1 стандартына сәйкес FISCHERSCOPE HM2000 аспаптық шегініс жүйесі арқылы өлшенді. 300 мм қашықтықта ұнтақ фракциясының ұлғаюы жабын қалыңдығының ұлғаюына ықпал ететіні, бірақ кеуектіліктің ұлғаюымен қатар жүруі мүмкін екені анықталды. Ең үлкен жабын қалыңдығы B5 үлгісі үшін алынды және 253,14 ± 8,63 мкм құрады, бірақ оның кеуектілігі 6,569 %-ға жетті. B4 үлгісінде ең аз кеуектілік 2,909 % және ең жоғары қаттылық

табылды: $HM = 8063,2 \pm 619,5 \text{ Н/мм}^2$, $HV = 1251,5 \pm 107,1$. Алынған нәтижелер зерттелген режимдердің ішінде 250 мм аралықта 32–40 мкм ұнтақ фракциясымен бұрку оңтайлы екенін көрсетеді, бұл тығыздық және біркелкі Cr₃C₂-NiCr жабынының түзілуін қамтамасыз етеді.

Кілтті сөздер: Cr₃C₂-NiCr; HVOF; ұнтақ фракциясы; 12 Kh 1 MF болат; термиялық бұрку; SEM; кеуектілік; қаттылық.

М. К. Dautbekov¹, *А. Mural², L. G. Sulubaeva³

^{1,2}PlasmaScience LLP,

Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;

³Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,

Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.

Received 04.05.26.

Received in revised form 06.05.26.

Accepted for publication 04.06.26.

THE EFFECT OF THE FRACTIONAL COMPOSITION OF CR₃C₂-NICR POWDER ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COATINGS DEPOSITED BY THE HVOF METHOD

This study investigates the effect of the particle size distribution of the Cr₃C₂-NiCr powder and the spraying distance on the structure, porosity, and hardness of coatings deposited by high-velocity oxygen fuel (HVOF) spraying onto a 12X1MF steel substrate. Five samples were prepared for the study: B1 with a powder particle size of 0–20 μm at a distance of 300 mm, B2 with 20–30 μm at 300 mm, B3 with 32–40 μm at 300 mm, B4: 32–40 μm at 250 mm, and B5: 32–40 μm at 200 mm. The microstructure of the coatings was examined using scanning electron microscopy (SEM); porosity was determined from SEM images using ImageJ software; elemental distribution was assessed by EDS mapping, and hardness was measured using the FISCHERSCOPE HM2000 instrumental indentation system in accordance with DIN EN ISO 14577-1. It was found that increasing the powder fraction at a distance of 300 mm contributes to an increase in coating thickness but may be accompanied by an increase in porosity. The greatest coating thickness was obtained for sample B5 and amounted to 253.14 ± 8.63 μm; however, its porosity reached 6.569 %. The lowest porosity (2.909 %) and the highest hardness were observed

in sample B4: $HM = 8063.2 \pm 619.5 \text{ N/mm}^2$, $HV = 1251.5 \pm 107.1$. The results show that the optimal process among those studied is the spraying of 32–40 μm powder at a distance of 250 mm, which ensures the formation of a denser and more uniform Cr_3C_2 -NiCr coating.

Keywords: Cr_3C_2 -NiCr; HVOF, powder fraction; 12 X 1 MΦ steel, gas-thermal spraying, SEM, porosity, hardness.

SRSTI 41.29.25

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/105-116>

**K. K. Yerzhanov¹, *A. M. Sergazina², G. B. Baurzhan³,
P. Yu. Tsyba⁴, M. V. Simakin⁵**

^{1,2,3,4}L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;

⁵Sh. Ualikhanov Kokshetau University,
Republic of Kazakhstan, Kokshetau.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0732-2080>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9040-113X>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8410-6640>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4928-0392>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7732-4300>

*e-mail: almirasabyrovna@gmail.com

DYNAMICS OF ROTATING AND MAGNETIZED PARTICLES IN THE SPACE-TIME OF MODIFIED BLACK HOLES

The paper studies the dynamics of rotating and magnetized particles in the spacetime of modified black holes within the framework of a combined model of $f(R)$ -gravity with k -essence as a source of dark energy. The motion of particles with spin and magnetic moment is described by the Matisson–Papapetrou–Dixon equations in the background of a generalized spherically symmetric metric containing additional modification parameters. Analytical expressions are obtained for the effective potential, the conditions for the existence and stability of circular orbits, as well as the radius of the inner stable circular orbit (ISCR). It is shown that an increase in the parameters of gravity modification and the parameter b of magnetic interaction leads to a noticeable increase in the radius of the ISCR and a change in the profile of the effective potential. Special attention is paid to the collision energy of two particles in the center of mass. It is established that in the modified metric, as well as in the classical Schwarzschild metric, the collision energy can be arbitrarily large near the horizon for certain kinematic configurations of the trajectories. The results have direct application to the modeling of accretion processes and high-energy phenomena around neutron stars, intermediate-mass and supermassive black holes, as well as to the testing

of alternative theories of gravity using future gravitational-wave and astrometric observations.

Keywords: modified black holes, effective potential, magnetized particles, orbital stability, Lagrangian.

Introduction

The study of particle motion in the vicinity of black holes is key to understanding physical processes in extreme gravitational fields. In recent years, there has been increased interest in modified gravity theories that extend Einstein's classical equations and allow for the effects of general relativity. The modified metrics, which include additional parameters, can simulate the effects of dark energy, quantum effects, and matter.

Studying the motion of particles around black holes remains an important task of modern astrophysics. Spacetimes with a modified metric allow us to study deviations from the general theory of relativity, taking into account additional physical effects.

The dynamics of rotating and magnetized particles is becoming important, since spin and electromagnetic interactions affect the trajectory of particles and the conditions of their stability. The analysis of such processes is necessary to interpret observations related to accretion disks and particle collisions near compact objects. This article aims at a systematic study of these effects within the framework of a modified metric using the equation the Matisson-Papapetrou-Dixon.

Modified metric Space-time is described by a metric:

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + \frac{1}{f(r)}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (1)$$

where the form of the metric is a generalization of the classical Schwarzschild metric.

The motion of particles, taking into account spin and magnetic interaction, is described by the Matisson-Papapetrou-Dixon equations:

$$\frac{Dp^\mu}{d\tau} + \frac{1}{2}R^\mu_{\nu\alpha\beta}u^\nu S^{\alpha\beta} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{DS^{\mu\nu}}{d\tau} - p^\mu u^\nu + p^\nu u^\mu = 0 \quad (3)$$

where p^μ – four momentum particles, $S^{\alpha\beta}$ – the spin tensor, u^ν – four-speed, $R^\mu_{\nu\alpha\beta}$ – the Riemann curvature tensor.

The k -essence component has the property that it behaves as a negative pressure component only after achieving equality of matter radiation, so that it can exceed the density of matter and cause cosmic acceleration only after matter has dominated the universe for some period, approximately in the current epoch. And, of course, human evolution is associated with the dominance of matter, because the formation of planets, stars, galaxies and large-scale structures occurs only during this period. Another property of the k -essence is that, due to the dynamic behavior of the attractor, cosmic evolution is insensitive to initial conditions. The action in the modified theory of gravity $F(R)$ is given by the expression:

$$S = \frac{1}{2k^2} \int d^4x \sqrt{-g} F(R) + S_m \quad (4)$$

at the same time $k^2 = 8\pi G$, a g – metric, S_m – the action of ordinary matter. k -essence – this is a scalar field ϕ , whose kinetic interaction is described by the function $P(X, \phi)$, $X = -\frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi$

In this case, the action for k -essence looks like

$$S_\phi = \int d^4x \sqrt{-g} P(X, \phi) \quad (5)$$

This approach allows you to create models with a variety of kinetics and dynamics of the scalar field. The complete theory combines modified gravity and k -essence in the form of an equation

$$S = \frac{1}{2k^2} \int d^4x \sqrt{-g} F(R) + \int d^4x \sqrt{-g} P(X, \phi) + S_m \quad (6)$$

From the variation of this action by metric and by scalar field, the equation of motion is obtained, which describe the joint dynamics of gravity and k -essence.

In $F(R)$ models with k -essence, it is possible to reproduce the evolution corresponding to the observed acceleration, while avoiding the stability problems inherent in individual models. The non-trivial kinetics of k -essence helps to stabilize the accelerated expansion phase, reducing the likelihood of singularities. k -essence serves as a candidate for the role of dark energy with a dynamic equation of state, and the combination with $F(R)$ expands the possibilities. At the same time, modified theories of gravity $F(R)$ with the inclusion of k -essence represent a promising direction in modern cosmology.

They allow us to describe the accelerated expansion of the universe and at the same time offer a framework for investigating fundamental issues of cosmic dynamics.

Consider the equation where the action:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2k^2} f(R) \pm X \pm \frac{1}{2} f_1 X^m \right] \quad (7)$$

here m – some positive number, and the signs they lead to different theories.

$$-\frac{1}{2}(f - FR) - \frac{k^2}{2} G_{,X}(X) \dot{\phi}^2 - 3HF = \dot{3}FH^2 \quad (8)$$

$$\ddot{F} - H\dot{F} + 2HF - \frac{k^2}{2} G_{,X}(X) \dot{\phi} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{a^3} \frac{d}{dt} (a^3 G_{,X}(X) \dot{\phi}) = 0 \quad (10)$$

$F(R)$, $G(X)$ and $G_{,X}(X)$ denote:

$$F = \frac{\partial f}{\partial R} \quad (11)$$

$$G(X) = \pm X \pm \frac{1}{2} f_1 X^m \quad (12)$$

$$G_{,X} = \frac{\partial G}{\partial X} \quad (13)$$

In addition, since the scalar field depends solely on cosmic time, the k -essence X field is $X = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2$ [1; 2; 3].

Materials and methods

In k -essence, the same role of “repeller from the center” is played by the potential $V(\phi)$ itself or by nonlinear kinetics, which also turn into a barrier growing to $r \rightarrow 0$ in spherical symmetry. Therefore, we again draw an effective potential, but now the bump is made not by the orbital momentum, but by the field itself.

The effective potential is the real potential the centrifugal term. It turns a complex three-dimensional problem with conserved angular momentum into a simple one-dimensional problem with radius r . It is very convenient for analyzing orbits, bound states, scattering, and the energy spectrum. If the equation is written in this form $\alpha V_{eff}^2 + \delta V_{eff} + \gamma = 0$, then the effective potential for particle motion is determined by the formula:

$$V_{eff} = -\frac{\delta}{2\alpha} + \sqrt{\frac{\delta^2 - 4\alpha\gamma}{4\alpha}} \quad (14)$$

where $\alpha = 4(r^2 - s^2(K_1 + \frac{2M}{r} + K_3 r^2))$, $\rho = (2r - s^2(K_1 + \frac{2M}{r^2} + 2K_3 r))^2$, $\delta = 4sJ(2(K_1 + \frac{2M}{r} + K_3 r^2) - r(K_1 + \frac{2M}{r^2} + 2K_3 r))$, $\gamma = (K_1 + \frac{2M}{r^2} + K_3 r^2)(2r - s^2(K_1 + \frac{2M}{r^2} + 2K_3 r))^2 (1 - \beta \sqrt{K_1 + \frac{2M}{r^2} + K_3 r^2})^2 - J^2 [4(K_1 + \frac{2M}{r^2} + K_3 r^2) - (s \times$

$K_1 + \frac{2M}{r^2} + 2K_3 r)^2]$. Here S – particle spin, $\beta = \frac{\mu B_0}{m}$ – the magnetic interaction parameter, J – the angular momentum of the particle.

These are all expressions coming out of the function $f(r) = K_1 + \frac{2M}{r} + K_3 r^2$ then K_1 – dimensionless parameter, M, r, s – have the dimension of length, K_3 has a dimension of 1 per length squared, alpha coefficient is a dimensionally correct form $\alpha = 4(r^2 - s^2(K_1 + \frac{2M}{r} + K_3 r^2))$. Checking the same dimension (length squared) means that the expression is consistent. If the expression for is based on the derivative $f'(r) = \frac{df}{dr} = -\frac{2M}{r^2} + 2K_3 r$ then the correct form is $\rho = (2r - s^2 f'(r))^2 = (2r - s^2(-\frac{2M}{r^2} + 2K_3 r))^2$ equivalent to $\rho = (2r - s^2(K_1 + \frac{2M}{r^2} + 2K_3 r))^2$.

Results and discussion

Stable circular orbits

The analysis showed that the parameters K_1, K_2, K_3 significantly affect the stability of circular orbits: Magnetic interaction β makes a significant impact on the parameters of the orbits. The radial velocity is zero $\frac{dr}{dt} = 0$, $V_{eff} = E$. Where E – particle energy [4].

When there is no radial acceleration, the equations take the following form: $\frac{d^2 r}{d\tau^2}, \frac{dV_{eff}}{dr} = 0$.

For a particle in a axisymmetric metric (such as a black hole), the radial motion equation is usually written as $\dot{r}^2 + V_{eff}(r) = 0$ or equivalently $\dot{r}^2 = E^2 - V_{eff}(r)$ where E – particle energy at infinity (motion constant), $V_{eff}(r)$ – an effective potential that depends on the metric, spin, magnetic parameter, and angular momentum.

The study of particle collision processes in gravitational fields is an important task in the general theory of relativity and its modifications. Special attention is paid to calculating the collision energy of two particles near black holes and other compact objects, as this allows us to understand the possibilities of generating high-energy things and their impact on astrophysical processes. Let two particles move in a gravitational field described by some metric $g_{\mu\nu}$. Let's denote the four speeds of these particles u_1^μ and u_2^μ accordingly. Collision energy E_{ct} in the center of mass system for two particles with masses m_1 and m_2 set by the formula: $E_{ct}^2 = -g_{\mu\nu}(p_1^\mu + p_2^\mu)(p_1^\nu + p_2^\nu)$, where $p_i^\mu = m_i u_i^\mu$ – four pulse i – the particles. Substituting, we get: $E_{ct}^2 = m_1^2 + m_2^2 - 2m_1 m_2 g_{\mu\nu} u_1^\mu u_2^\nu$.

In the case of identical masses $m_1 = m_2 = m$ the expression is simplified

The collision energy of two particles in the space of the modified metric is described as: $E_{ct}^2 = 2m^2(1 - g_{\mu\nu} u_1^\mu u_2^\nu)$. Where $u_1^\mu u_2^\nu$ – four particle velocities. The scalar product of four speeds plays a key role here, depending on the geometry of space-time. The energy of the center of mass of two colliding particles, in the

Schwarzschild metric, can be indefinitely large [5]. For this process, one particle must move along a white-hole geodesic, and the other must move towards it along a black-hole geodesic. This is possible if a model of gravitational collapse is considered. In the model of gravitational collapse, the Vaidya metric is used, which results in the formation of a naked singularity and the question of particle collisions near the boundaries of collapsing matter. We consider the energy of the center of mass of the colliding particles. One particle flies along a geodesic starting at a bare singularity, while the other falls onto a collapsing substance. We show that the energy of the center of mass is unlimited if the collision occurs in the vicinity of the conformal Killing horizon [6; 7; 8; 9; 10].

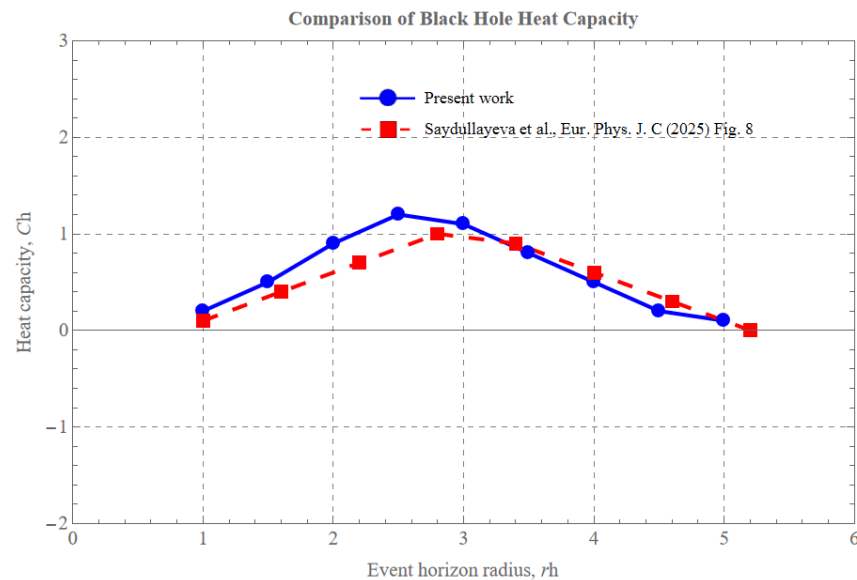


Figure 1 – Comparison of the black hole heat capacity obtained in the present work with the results of Saydullayeva et al.(2025)

The heat capacity is plotted as a function of the event horizon radius. Both models exhibit a similar evolution, characterized by an increase of the heat capacity at small radius, a maximum near , and a subsequent decrease at large radius.

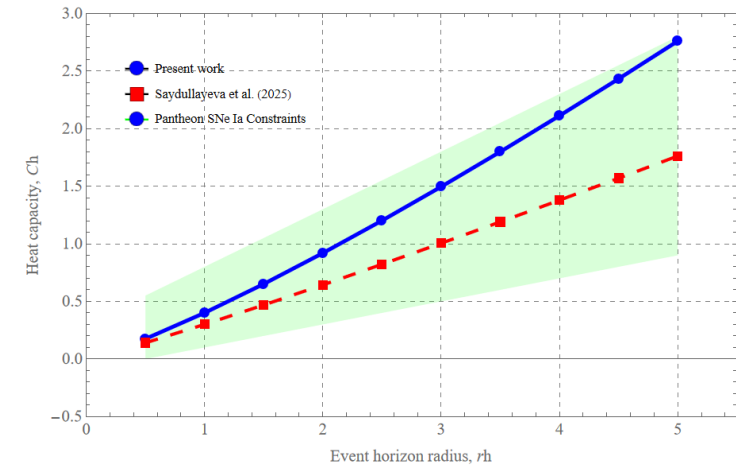


Figure 2 – Comparison of black hole heat capacity with observational constraints from the Pantheon SNe Ia sample.

The blue curve denotes the present results, the red dashed curve corresponds to Saydullayeva et al. (2025) (<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14780-z>), and the shaded green region represents the range allowed by Pantheon SNe Ia observations. The theoretical predictions remain within the observationally acceptable region throughout the considered interval.

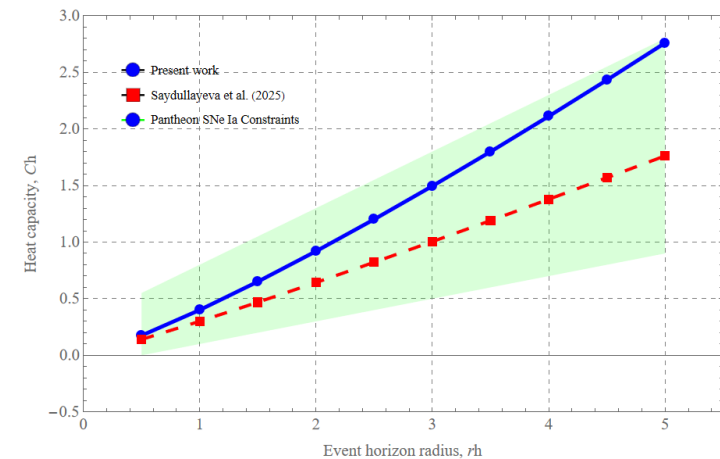


Figure 3 – Heat capacity of the black hole and consistency with Pantheon SNe Ia observational constraints

The predicted heat-capacity evolution is compared with previous theoretical results and the observational confidence region derived from Pantheon SNE Ia data. The agreement indicates that the model is compatible with current cosmological observations.

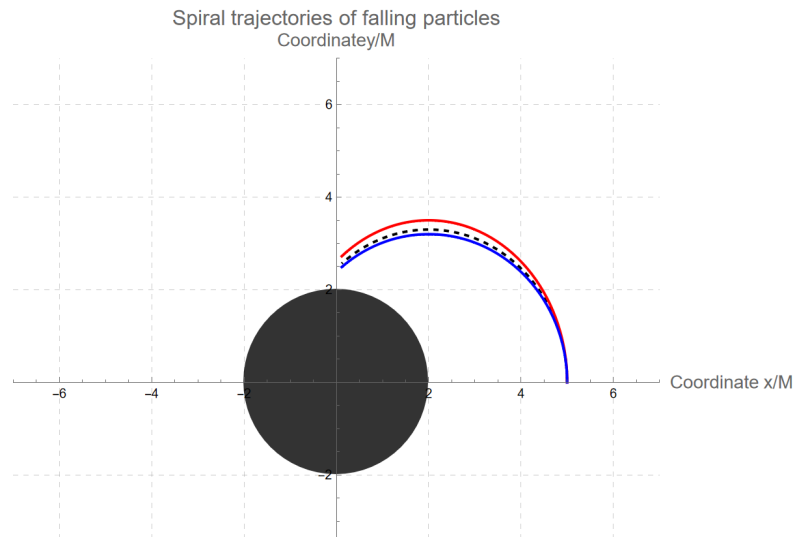


Figure 4 – Spiral fall trajectories. The red line Acceleration of fall, the blue line Slow fall and the Dotted line (Schwarschild)

Definition in the Mattison-Papitrou-Dixon equation: $s = \sqrt{\frac{1}{2} S^{\alpha\beta} S_{\alpha\beta}}^m$ (representing the specific spin of the particle per unit of mass). Behavior in trajectory plots (Figure 4). For a spinless particle ($s = 0$), the motion follows a standard Schwarzschild by the dashed line) Non-zero spin values ($s > 0$) or ($s < 0$) induce shifts in the infall trajectory due to the spin-curvature coupling term $R^\mu_{\nu\alpha\beta} u S^{\alpha\beta}$.

Particle Angular Momentum (L): A conserved quantity associated with the azimuthal motion $\frac{d\phi}{d\tau}$, which directly dictates the impact parameter of the infalling particle. Black hole spin /angular momentum ($a = J/M$): determines the event horizon $r_h = M + \sqrt{M^2 - a^2}$, as well as the locations of the heat capacity peaks C_h (refer to Figure 1-4).

Magnetic Interaction Parameters (qB or γ): Quantifies the interaction between the particle's charge q (or its intrinsic magnetic moment) and external magnetic field B surrounding the black hole.

Conclusion

In this paper, the motion of rotating and magnetized particles in space-time with a modified metric is considered. The Mattison-Papitrou-Dixon equation is presented, which describes the motion of particles taking into account spin and magnetic interaction. The k -essence is considered, which causes cosmic acceleration of motion. We have studied the concept of effective potential. The necessary equations were given for the clarity of the study. The collisions of particles in the form of graphs were clearly shown. The main results are that we have found that the parameters K_1, K_2, K_3 have a significant effect on the stability of orbits and particle dynamics. It was determined that the magnetic interaction enhances the displacement of circular orbits. The results obtained are applicable to studying the interactions of astrophysical objects such as neutron stars and black holes.

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant no. AP23489289)

REFERENCES

- 1 Nojiri, S., Odintsov, S. D., Oikonomou, V. K. Modified Gravity Theories // Physics Reports. – 2017. – Vol. 692. – P. 1–104. – <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.06.001>.
- 2 Sotiriou, T. P., Faraoni, V. $f(R)$ Theories of Gravity // Reviews of Modern Physics. – 2010. – Vol. 82, No. 1. – P. 451–497. – <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.451>.
- 3 Perivolaropoulos, L., Skara, F. Challenges for Modified Gravity // International Journal of Modern Physics D. – 2021. – Vol. 30, No. 14. – Art. 2130007. – <https://doi.org/10.1142/S0218271821300072>.
- 4 Mathisson, M. Neue Mechanik materieller Systeme // Acta Physica Polonica. – 1937. – Vol. 6. – P. 163–200.
- 5 Yerzhanov, K. K., Meirbekov, B., Baurzhan, G., Myrzakulov, R. Cosmological Solutions of $F(R, T)$ Gravity Model with K -Essence // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1391, No. 1. – Art. 012163. – <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1391/1/012163>.
- 6 Yerzhanov, K. K., Baurzhan, G., Altaybaeva, A., Myrzakulov, R. Inflation from the Symmetry of the Generalized Cosmological Model // Symmetry. – 2021. – Vol. 13, No. 12. – Art. 2254. – <https://doi.org/10.3390/sym13122254>.
- 7 Dixon, W. G. Dynamics of Extended Bodies in General Relativity. I. Momentum and Angular Momentum // Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences. – 1970. – Vol. 314, No. 1519. – P. 499–527. – <https://doi.org/10.1098/rspa.1970.0020>.

8 Myrzakulov, R. F(T) Gravity and K-Essence // General Relativity and Gravitation. – 2012. – Vol. 44, No. 12. – P. 3059–3080. – <https://doi.org/10.1007/s10714-012-1439-z>.

9 Capozziello, S., De Laurentis M. Extended Theories of Gravity // Physics Reports. – 2011. – Vol. 509, No. 4–5. – P. 167–321. – <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2011.09.003>.

10 Harko, T., Lobo, F. S. N., Nojiri, S., Odintsov, S. D. f(R,T) gravity // Physical Review D. – 2011. – Vol. 84, No. 2. – Art. 024020. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.84.024020>.

Received 20.08.26.

Received in revised form 01.09.26.

Accepted for publication 11.09.26.

К. К. Ержанов¹, *А. М. Сергазина², Г. Б. Бауыржан³,
П. Ю. Цыба⁴, М. В. Симакин⁵
^{1,2,3,4}Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
⁵Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті,
Қазақстан Республикасы, Көкшетау қ.
20.08.26 ж. баспаға түсті.
01.09.26 ж. түзетулерімен түсті.
11.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ҚАРА ТЕСІКТЕРДІҢ КЕҢІСТІК-УАҚЫТЫНДАҒЫ АЙНАЛМАЛЫ ЖӘНЕ МАГНИТТЕЛГЕН БӨЛШЕКТЕРДІҢ ДИНАМИКАСЫ

Мақалада қараңғы энергия көзі ретінде k -мәні бар $f(R)$ -ауырлық күшінің біріктірілген моделінің бөлігі ретінде өзгертілген қара тесіктердің кеңістіктегі айналатын және магниттелген бөліктерінің динамикасы зерттеледі. Спині мен магниттік моменті бар бөліктердің қозғалысы қосымша модификация параметрлерін қамтитын жалтыланған сфералық симметрия негізінде Матиссон-Папаетру-Диксон теңдеулерімен сипатталады. Айналымы орбиталардың тиімді потенциалы, өмір сүру жағдайлары мен тұрақтылығы, сондай-ақ ішкі тұрақты айналымы орбитаның радиусы (VRCO) үшін аналитикалық өрнектер алынды. Гравитациялық модификация параметрлері мен

магниттік өзара әрекеттесудің b параметрінің жоғарылауы $iscr$ радиусының айтарлықтай өсуіне және тиімді потенциал профилінің өзгеруіне әкелетіні көрсетілген. Масса орталығындағы екі бөліктегі соқтығысу энергиясына ерекше назар аударылады. Өзгертілген метрикада, классикалық Шварцшильд метрикасындағыдай, көкжиекке жақын соқтығысу энергиясы белгілі бір кинематикалық траектория конфигурацияларында қалағаныңызша үлкен болуы мүмкін екендігі анықталды. Алынған нәтижелер нейтрондық жұлдыздардың, орташа массалық қара саңылаулардың және супермассивті қара саңылаулардың айналасындағы жоғары энергиялы аккреция процестері мен құбылыстарын модельдеуге және болашақ гравитациялық-толқындық және астрометриялық бақылауларды қолдана отырып, ауырлық күшінің балама теорияларын тексеруге тікелей қатысты.

Кілтті сөздер: модификацияланған қара тесіктер, тиімді потенциал, магниттелген бөліктер, орбиталық тұрақтылық, лагранжиан.

К. К. Ержанов¹, *А. М. Сергазина², Г. Б. Бауыржан³,
П. Ю. Цыба⁴, М. В. Симакин⁵
^{1,2,3,4}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;
⁵Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова,
Республика Казахстан, г. Кокшетау.
Поступило в редакцию 20.08.26.
Поступило с исправлениями 01.09.26.
Принято в печать 11.09.26.

ДИНАМИКА ВРАЩАЮЩИХСЯ И НАМАГНИЧЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПРОСТРАНСТВЕ-ВРЕМЕНИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧЁРНЫХ ДЫР

В статье исследуется динамика вращающихся и намагниченных частиц в пространстве-времени модифицированных черных дыр в рамках комбинированной модели $f(R)$ -гравитации с k -эссенцией в качестве источника темной энергии. Движение частиц со спином и магнитным моментом описывается уравнениями Матиссона–Папаетру–Диксона на основе обобщенной сферически-симметричной метрики, содержащей дополнительные параметры модификации. Получены аналитические выражения для

FTAMP 59.29.29 29.19.33

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/117-127>

***А. Б. Искакова¹, А. Ж. Жумабеков², Ж. А. Аубакирова³,
Б. Ш. Исимова⁴, Ш. С. Зейтова⁵**

^{1,2,3,4,5}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2142-8949>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2360-3747>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8314-8627>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2868-1231>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1880-6737>

*e-mail: anar_is@mail.ru

PZT-5H ПЬЕЗОКЕРАМИКАЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТІҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ҚОЛДАНБАЛЫ БАҒДАРЛАМАНЫҢ КӨМЕГІМЕН ЗЕРТТЕУ

Мақалада PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезокерамикалық материал негізіндегі пьезоэлектрлік элементтің жүйеліктік сипаттамаларының моделі келтіріледі. Жоғары пьезоэлектрлік коэффициент пен электромеханикалық сипаттамаларының тұрақты болуына байланысты қарастырылып отырған пьезоэлемент пьезоэлектрлік актюаторларды, датчиктерді, ультрадыбыстық түрлендіргіштер мен басқа да құрылғыларды жасауда кеңінен қолданылады.

Зерттеу жұмысының мақсаты PZT-5H пьезокерамикалық элементінің жүйеліктік сипаттамаларын бағдарламалық ортада модельдеу және оның жүйеліктік сипаттамаларын талдау болып табылады.

Модельдеу PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезокерамикалық материалдың анықтамалық параметрлері негізінде Electronic Workbench бағдарламалық ортасында орындалды. Зерттеу барысында пьезоэлементтің амплитуда-жүйеліктік және фаза-жүйеліктік сипаттамалары алынды. Эквиваленттік жүйе параметрлерінің өзгерісі жүйеліктік сипаттамалардың формасына және резонанстық максимумдардың орнына әсері талданды.

Зерттеу барысында алынған нәтижелер PZT-5H негізіндегі пьезоэлектрлік элементтің жүйеліктік сипаттамаларын зерттеуге

эффективного потенциала, условий существования и стабильности круговых орбит, а также радиуса внутренней стабильной круговой орбиты (ВРКО). Показано, что увеличение параметров гравитационной модификации и параметра магнитного взаимодействия приводит к заметному увеличению радиуса ISCR и изменению эффективного потенциала. Особое внимание уделено энергии столкновения двух частиц в центре масс. Установлено, что в модифицированной метрике, как и в классической метрике Шварцшильда, энергия столкновения вблизи горизонта может быть сколь угодно большой при определенных кинематических конфигурациях траекторий. Полученные результаты имеют непосредственное отношение к моделированию процессов аккреции и явлений высоких энергий вокруг нейтронных звезд, черных дыр средней массы и сверхмассивных черных дыр, а также к проверке альтернативных теорий гравитации с использованием будущих гравитационно-волновых и астрометрических наблюдений.

Ключевые слова: модифицированные черные дыры, эффективный потенциал, намагниченные частицы, орбитальная устойчивость, Лагранжиан.

мүмкіндік береді және түрлі типтегі пьезокерамикалық материалдарға салыстырмалы түрдегі талдау жүргізуге негіз бола алады. PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезокерамикалық материалдың параметрлері негізінде Electronic Workbench бағдарламалық ортасында алынған модель түрлі қолданыстағы пьезоэлементтердің диэлектрлік, пьезоэлектрлік және сипаттамаларын зерттеуге, сонымен қатар схемотехникалық талдау мен модельдеу әдістерін жетілдіруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: пьезоэлемент, амплитуда-жиіліктік сипаттама, фаза-жиіліктік сипаттама, пьезоэлектрлік коэффициент, электромеханикалық байланыс коэффициенті.

Кіріспе

Қазіргі таңда пьезокерамика PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) ультрадыбыстық түрлендіргіштерді, пьезоэлектрлік актюаторларды, энергияны жинақтау құрылғыларын және MEMS-құрылғыларын жасауда жиі қолданылатын материалдардың бірі болып табылады. Қорғасынсыз пьезоматериалдарды зерттеу жұмыстары қарқынды дамуына қарамастан [1; 2], PZT-5H элемент жоғары d_{33} пьезоэлектрлік коэффициентке, сонымен қатар жоғары K_{31} электромеханикалық байланыс коэффициентіне ие болуына байланысты алдыңғы қатардағы орнын сақтап отыр [3; 4].

Жоғары деңгейдегі қоздыруларда PZT-5H элементінің қасиеттерін зерттеу өзекті мәселелердің бірі ретінде қарастырылады. Атап өтетін болсақ, төмен сигналдарда өлшенген материалдың сипаттамалары қуатты ультрадыбыстық түрлендіргіштерді жобалауда жоғары дәлдікті қамтамасыз ету үшін температуралық және қуаттық эффектілерді бөлу әдісі қолданылады [5].

Осы бағыттағы іргелі зерттеулер PZT пьезокерамикалардың микроқұрылымдары мен функционалдық қасиеттері арасындағы байланысты зерттеуге арналған [6].

Зерттеу жұмысының мақсаты – PZT-5H пьезокерамикалық элементінің электрлік сипаттамаларын Electronic Workbench ортасында модельдеу және оның жиіліктік сипаттамаларын талдау.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу объектісі ретінде PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезокерамикасы алынды. Пластина тәріздес пьезокерамиканың электромеханикалық сипаттамалары [7, б. 20]; [8]:

- 1) салыстырмалы диэлектрлік өтімділік – $K^T = \frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_0} = 3200$;
- 2) электромеханикалық байланыс коэффициенті – $K_{31} = 0,37$;
- 3) Юнг модулі – $Y_{11} = 6,2 \cdot 10^{10} \frac{H}{M^2}$;
- 4) тығыздығы $\rho = 7,4 \cdot 10^3 \frac{KГ}{M^3}$;

5) сапалылық – $Q_m = 65$;

6) ұзындығы – $l_1 = 6 \cdot 10^{-3} M$;

7) ені – $l_2 = 8 \cdot 10^{-3} M$;

8) биіктігі – $l_3 = 2 \cdot 10^{-3} M$.

Модельдеу PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезокерамикалық материалдың анықтамалық параметрлері негізінде Electronic Workbench бағдарламалық ортасында орындалды.

Нәтижелер және талқылау

Пьезокерамикалық материалдың сипаттамаларына сүйене отырып, резонанстық сипаттамаларды анықтау мақсатында келесі есептеулерді жүргіземіз [9, б. 171]; [10].

Пьезоэлементтің жиіліктік сипаттамаларын есептеу үшін Баттерворт-ван Дайк моделі негізіндегі эквиваленттік сұлбамен берілген тізбектің параметрлерін анықтау қажет. Пьезоэлементтің меншікті сыйымдылығын келесі формула бойынша анықтауға болады:

$$C_m = \frac{K^T \cdot \varepsilon_0 \cdot l_1 \cdot l_2}{l_3} \cdot (1 - K_{31}^2).$$

Пластина тәріздес PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезокермиканың электромеханикалық сипаттамалары мәндерін (1) формулаға қойып, пьезоэлементтің меншікті сыйымдылығын есептейміз:

$$C_m = \frac{3200 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot (1 - 0,37^2) = 5,063 \cdot 10^{-10} \Phi. \quad (1)$$

Пластина тәріздес пьезоэлементтің меншікті резонанстық жиілігі оның механикалық сипаттамалары арқылы есептелінеді:

$$\omega_0 = \frac{1,58}{l_3} \cdot \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho}} = \frac{1,58}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot \sqrt{\frac{6,2 \cdot 10^{10}}{7,4 \cdot 10^3}} = 2,3 \cdot 10^6 \frac{rad}{c}. \quad (2)$$

Электромеханикалық жүйенің резонанстық жиілігі электромеханикалық байланыс коэффициентін ескере отырып есептейміз:

$$\omega_p = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - k_{31}^2}} = \frac{2,3 \cdot 10^6}{\sqrt{1 - 0,37^2}} = 2,5 \cdot 10^6 \frac{rad}{c}. \quad (3)$$

Өткізу жолағының енін сапалылықты ескере отырып, келесі түрде есептейміз:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_p}{Q_m} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \text{ рад/с}}{65} = 0,0385. \quad (4)$$

Сызықтық жиілікті есептейміз:

$$\nu = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14} = 0,4 \cdot 10^6 \text{ Гц}. \quad (5)$$

Тізбекті тербелмелі контурдың индуктивтілігін есептейміз:

$$L_{\text{нз}} = \frac{1}{\nu_p^2 \cdot C_{\text{нз}}} = \frac{1}{(0,4 \cdot 10^6)^2 \cdot 5,063 \cdot 10^{-10}} = 0,012 \text{ Гн}. \quad (6)$$

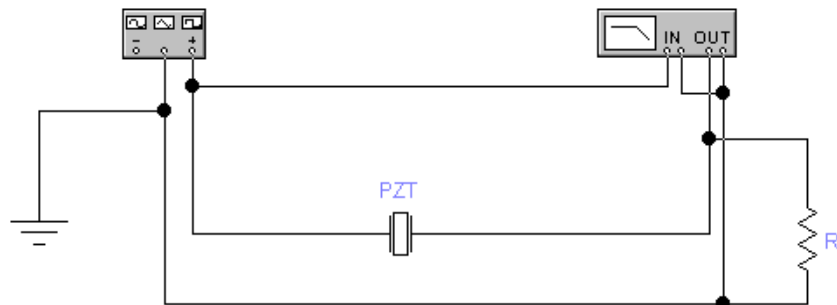
Эквивалентті электрлік сыйымдылық резонанс шартына сәйкес келесідей есептеледі:

$$C = \frac{1}{\omega_p^2 \cdot L} = \frac{1}{(2,5 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,012} = 13,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}. \quad (7)$$

Баттерворт-ван Дайк моделі [11] негізіндегі эквиваленттік сұлбамен берілген тізбектің кедергісін беріктік формуласы арқылы анықтаймыз:

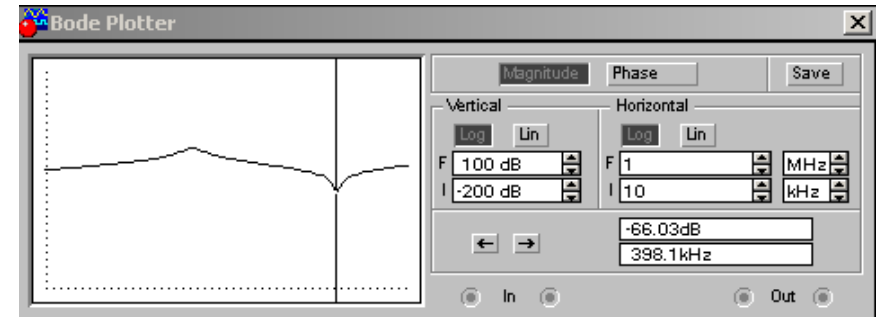
$$R = \frac{\omega_p \cdot L}{Q_m} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 0,012}{65} = 461,5 \text{ Ом}. \quad (8)$$

(1–3) және (5–8) өрнектерімен алынған мәндер негізінде PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезоэлементінің амплитуда-жиіліктік сипаттамалары 1-суретте келтірілген сұлбаға сәйкес Electronic Workbench ортасында алынады.



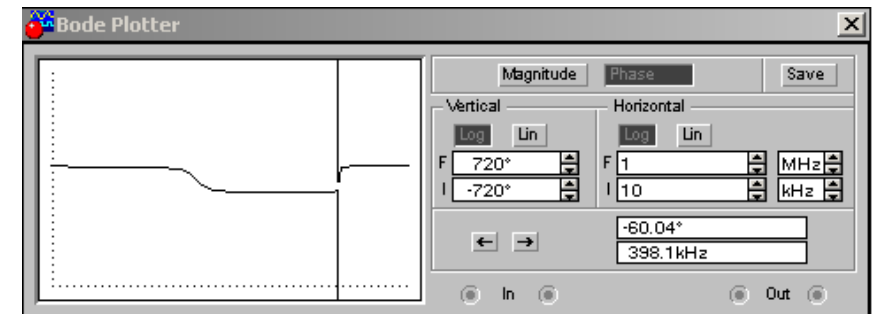
1-сурет – PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезоэлементінің сипаттамасын алудың эквиваленттік сұлбасы

Electronic Workbench ортасында алынған PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезоэлементінің амплитуда-жиіліктік сипаттамалары 2-суретте келтірілген.



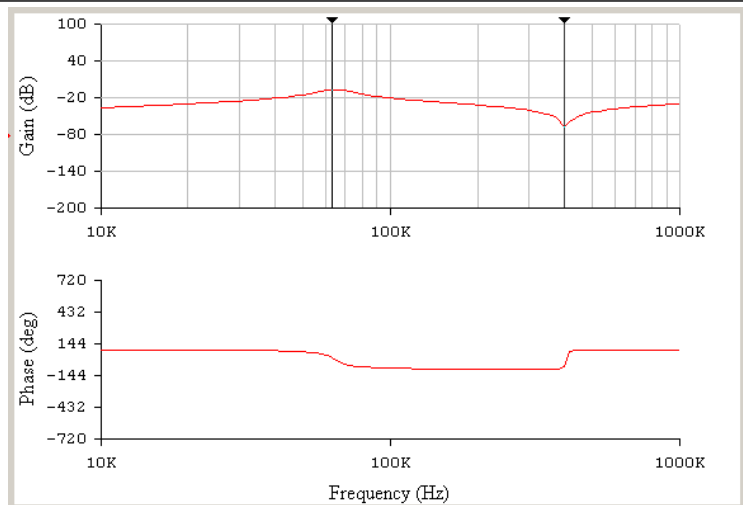
2-сурет – PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезоэлементінің АЖС

Есептеулер мен компьютерлік модельдеу кезінде алынған резонанстық жиіліктердің мәндерін салыстыратын болсақ, есептелген мәндер мен Electronic Workbench ортасында алынған модельдеу нәтижелерінің мәндеріне жақын екендігіне көз жеткізуге болады. Ал PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезоэлементінің фаза-жиіліктік сипаттамасы 3-суретте берілген.



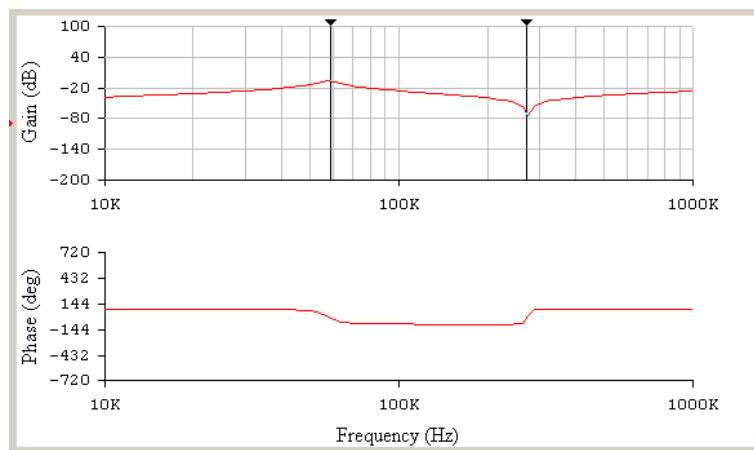
3-сурет – PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезоэлементінің ФЖС

Сонымен қатар, PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезоэлементінің АЖС мен ФЖС 4-суретте берілген графиктік дисплейден де көруге болады.



4-сурет – PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезоэлементінің АЖС және ФЖС

Егер PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезоэлементінің өлшемдерін 15–20 % өзгертетін болсақ, 5-суретте көріп отырғанымыздай, жиіліктік сипаттамалардың графиктерінен жүйедегі өзгерісті байқауға болады.



5-сурет – PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) пьезоэлементінің АЖС және ФЖС

Қорытынды

Electronic Workbench бағдарламалық ортасында PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) негізіндегі пьезоэлектрлік элементтен тұратын жүйені модельдеу нәтижесінде пьезоэлементтің амплитуда-жиіліктік және фаза-жиіліктік сипаттамалары алынды. Алынған нәтижелерге сәйкес:

- PZT-5H пьезоэлементінің геометриялық параметрлерін өзгерткенде (біздің жағдайда биіктігін арттырғанда), резонанстық жиілік кемиді;
- ұсынылған мәліметтер негізінде дайындап шығарылатын пьезоэлементтердің резонанстық және антирезонанстық жиіліктерін, өткізу жолақтарының енін анықтауға мүмкіндік береді;
- алынған нәтижелер түрлі типтегі пьезокерамикалық материалдарға салыстырмалы түрдегі талдау жүргізуге негіз бола алады;
- Electronic Workbench бағдарламалық ортасында алынған модель түрлі қолданыстағы пьезоэлементтердің диэлектрлік, пьезоэлектрлік сипаттамаларын зерттеуде, сонымен қатар схемотехникалық талдау мен модельдеу әдістерін жетілдіруде қолданылуы мүмкін;
- алынған зерттеулер түрлі кластар арасындағы, мысалы, PZT-5H пен PZT-5A пьезокерамикалары арасындағы айырмашылықтардың себептерін терең түсінуге мүмкіндік береді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Юрасов, Ю. И., Назаренко, А. В., Вербенко, И. А. Прогназирование свойств бессвинцовых пьезокерамик и модификация конструкции вибродатчиков на основе свинцесодержащих композиций [Мәтін] // Наука юга России. – 2017. – № 4(13). – С. 23–31.

Mendes, M. C., Martins, E. A., Chernozem, R. V., Custodio, C. C., Surmenev, R. A., Kholkin, A. L., Silva, A. S., Mano, J. F. Osteogenic Differentiation Triggered by Intracellular Magnetoelectric Stimulation of Core–Shell Nanotransducers under Remotely Applied Magnetic Fields [Мәтін] // ACS Nano. – 2025. – Vol. 19. – № 50. – P. 42022–42045. – <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c10509>

2 Pan, X., Wu, Yu., Wang, Yo., Zhou, G., Cai, H. Mechanical energy harvesting based on the piezoelectric materials: Recent advances and future perspectives [Мәтін] // Chemical Engineering Journal. – 2024. – Vol. 497. – P. 1–14.

3 Manvi, M., Swamy, M. Comprehensive simulation study on AlN, ZnO, and PZT-5H piezoelectric materials for microcantilever-based MEMS energy harvesters : Mechanical and electrical insights [Мәтін] // Proc IMechE Part E: J Process Mechanical Engineering. – 2024. – vol. 240, № 4. – P. 1–10. – <https://doi.org/10.1177/09544089241290635>

4 Xue, W., Wang, X., Zhu, Yu., Luo, Ch. Studies on the High-Power Piezoelectric Property Measurement Methods and Decoupling the Power and Temperature Effects on PZT-5H [Text] // Sensors (Basel). – 2025. – Vol. 25, № 25 – P. 349. – <https://doi.org/10.3390/s25020349>

5 Tang, X., Hu, Z., Koval, V., Baxter, H., Eriksson, M., Whiteley, R., Banerjee, K., Viola, G., Yang, B., Yan, H. Relationships between structure and properties in commercial lead zirconate titanate (PZT) piezoceramics [Мәтін] // Journal of Materiomics. – 2025. – №11. – P. 1–15.

6 Справочник пьезокерамических материалов различных фирм [Мәтін]. – 47 с.

7 Liu, Z., Wu, H., Ren, W., Ye, Z. G. Piezoelectric and ferroelectric materials: Fundamentals, recent progress, and applications [Мәтін] // Comprehensive Inorganic Chemistry III. – 2023. – Vol. 4. – P. 135-171.

8 Шарапов, В. М., Полищук, Е. С., Кошевой, Н.Д., Ишанин, Г. Г., Минаев, И. Г., Совлуков, А. С. Датчики: справочное пособие [Мәтін]. – М.: Теносфера, 2012. – 624 с.

9 Бобцов, А. А., Бойков В. И., Быстров, С.В., Григорьев, В.В., Карев, П. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений [Мәтін]. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 134 с.

10 Steinem, C., Janshoff, A. Piezoelectric Sensors [Мәтін]. – Berlin : Springer, 2007. – 484 p.

REFERENCES

1 Yurasov, Yu. I., Nazarenko, A. V., Verbenko, I. A. Prognazirovanie svojstv bessvincovyh p'ezokeramik i modifikaciya konstrukcii vibrodatchikov na osnove svinesoderashchih kompozicij [Prediction of the Properties of Lead-Free Piezoceramics and Modification of the Construction of Vibration Sensors Based on Lead-Containing Compositions] [Text] // Nauka yuga Rossii. – 2017. – № 4(13). – P. 23–31.

2 Mendes, M. C., Martins, E. A., Chernozem, R. V., Custodio, C. C., Surmenev, R. A., Kholkin, A. L., Silva, A. S., Mano, J. F. Osteogenic Differentiation Triggered by Intracellular Magnetoelectric Stimulation of Core–Shell Nanotransducers under Remotely Applied Magnetic Fields [Text] // ACS Nano. – 2025. – vol. 19, № 50. – P. 42022–42045. – <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c10509>

3 Pan, X., Wu, Yu., Wang, Yo., Zhou, G., Cai., H. Mechanical energy harvesting based on the piezoelectric materials: Recent advances and future perspectives [Text] // Chemical Engineering Journal. – 2024. – Vol. 497. – P. 1–14.

4 Manvi, M., Swamy, M. Comprehensive simulation study on AlN, ZnO, and PZT-5H piezoelectric materials for microcantilever-based MEMS energy

harvesters: Mechanical and electrical insights [Text] // Proc IMechE Part E: J Process Mechanical Engineering. – 2024. – vol. 240, № 4. – P. 1–10. – <https://doi.org/10.1177/09544089241290635>

5 Xue, W., Wang, X., Zhu, Yu., Luo, Ch. Studies on the High-Power Piezoelectric Property Measurement Methods and Decoupling the Power and Temperature Effects on PZT-5H [Text] // Sensors (Basel). – 2025. – vol. 25, № 25. – P. 349. – <https://doi.org/10.3390/s25020349>

6 Tang, X., Hu, Z., Koval, V., Baxter, H., Eriksson, M., Whiteley, R., Banerjee, K., Viola, G., Yang, B., Yan, H. Relationships between structure and properties in commercial lead zirconate titanate (PZT) piezoceramics [Text] // Journal of Materiomics. – 2025. – №11. – P. 1–15.

7 Spravochnik p'ezokeramicheskikh materialov razlichnyh firm [Directory of piezoceramic materials from various companies] [Text]. – 47 p.

8 Liu, Z., Wu, H., Ren, W., Ye, Z. G. Piezoelectric and ferroelectric materials: Fundamentals, recent progress, and applications [Text] // Comprehensive Inorganic Chemistry III. – 2023. – Vol. 4. – P. 135-171.

9 Sharapov, V. M., Polishchuk, E. S., Koshevoj, N.D., Ishanin, G. G., Minaev, I. G., Sovlukov, A. S. Datchiki: spravocnoe posobie [Sensors: A Reference Guide] [Text]. – Moscow : Tenosfera, 2012. – 624 s.

10 Bobcov, A. A., Bojkov V. I., Bystrov, S.V., Grigor'ev, V.V., Karev, P. V. Ispolnitel'nye ustrojstva i sistemy dlya mikroperemeshchenij [Actuators and systems for micro-movements] [Text]. – SPb : Universitet ITMO, 2017. – 134 p.

11 Steinem, C., Janshoff, A. Piezoelectric Sensors [Text]. – Berlin : Springer, 2007. – 484 p.

06.07.26 ж. баспаға түсті.

13.07.26 ж. түзетулерімен түсті.

11.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. Б. Исакова¹, А. Ж. Жумабеков², Ж. А. Аубакирова³,

Б. Ш. Исимова⁴, Ш. С. Зейтова⁵

^{1,2,3,4,5}Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 06.07.26.

Поступило с исправлениями 13.07.26.

Принято в печать 11.09.26.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА PZT-5H С ПОМОЩЬЮ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ

В статье представлена модель частотных характеристик пьезоэлектрического элемента на основе пьезокерамического материала PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI). Благодаря высоким значениям пьезоэлектрического коэффициента и стабильным электромеханическим характеристикам данный материал широко используется в производстве пьезоэлектрических актюаторов, датчиков, ультразвуковых преобразователей и других устройств.

Целью исследования является моделирование электрических характеристик пьезоэлектрического элемента PZT-5H в программной среде и анализ его частотных характеристик.

Моделирование выполнено в программной среде Electronic Workbench на основе справочных данных пьезокерамического материала PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI). В ходе исследования получены амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики пьезоэлектрического элемента. Проведен анализ влияния параметров эквивалентной системы на форму частотных характеристик и положение резонансных максимумов.

Полученные в ходе исследования результаты дают возможность исследовать частотные характеристики пьезоэлектрического элемента на основе PZT-5H и проводить сравнительный анализ различных типов пьезокерамических материалов. Разработанная модель в программной среде Electronic Workbench на основе параметров пьезокерамического материала PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) может быть использована для исследования диэлектрических, пьезоэлектрических и механических характеристик пьезоэлектрических элементов различного назначения, а также для совершенствования методов схемотехнического анализа и моделирования.

Ключевые слова: пьезоэлемент; амплитудно-частотная характеристика; фаза-частотная характеристика; пьезоэлектрический коэффициент; коэффициент электромеханической связи.

*A. B. Iskakova¹, A. Zh. Zhumabekov², Zh. A. Aubakirova³,
B. Sh. Isimova⁴, Sh. S. Zeitova⁵

^{1,2,3,4,5}Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 06.07.26.

Received in revised form 13.07.26.

Accepted for publication 11.09.26.

CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF THE PZT-5H PIEZOCERAMIC ELEMENT USING APPLICATION PROGRAMS

This article presents a model of the frequency characteristics of a piezoelectric element based on PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) piezoceramic material. Due to its high piezoelectric coefficient and stable electromechanical properties, this material is widely used in the production of piezoelectric actuators, sensors, ultrasonic transducers, and other devices.

The aim of this study is to simulate the electrical characteristics of the PZT-5H piezoelectric element in a software environment and analyze its frequency response.

The simulation was performed in the Electronic Workbench software environment using reference data for PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) piezoceramic material. The amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the piezoelectric element were obtained. The influence of equivalent system parameters on the shape of the frequency response and the position of the resonant maxima was analyzed. The results obtained during the study make it possible to investigate the frequency characteristics of a PZT-5H-based piezoelectric element and conduct a comparative analysis of various types of piezoceramic materials. The model developed in the Electronic Workbench environment based on the parameters of the PZT-5H (Channel 5700 Navy Type VI) piezoceramic material can be used to investigate the dielectric, piezoelectric, and mechanical characteristics of piezoelectric elements for various applications, as well as to improve circuit analysis and simulation methods.

Keywords: the piezoelectric element, amplitude-frequency characteristic, phase-frequency characteristic, piezoelectric coefficient, coefficient of electromechanical connection.

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/128-151>

***М. Т. Қаламбай¹, А. Ж. Наурзбаева²,
Т. С. Мухаммединова³, Н. М. Үсіпов⁴, Б. Т. Шукиргалиев⁵**

^{1,2,3,5}Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,

Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.;

^{1,5}В. Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{2,4}Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0570-7270>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6653-2948>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4472-1369>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2512-3280>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4601-7065>

*e-mail: M.Kalambay@hw.ac.uk

NGC 2516 ШОҒЫРЫНЫҢ N-ДЕНЕ МОДЕЛІН НАҚТЫЛАУ ЖӘНЕ ОНДАҒЫ ЖҰЛДЫЗДЫҚ ҚАРА ҚҰРДЫМДАР

Бұл жұмыста Kalambay et al. (2025) зерттеуінде басталған NGC 2516 шашыраңқы жұлдыздар шоғырының N-дене модельдеуі кеңейтілді. Аталған жұмыста шоғырдың Галактикадағы орбитасы қайта қалпына келтіріліп, оның бастапқы параметрлері ϕ i-GRAPe-GPU кодының көмегімен есептелген болатын. Алайда алынған модельде нақты, Gaia деректері негізінде таңдалған шынайы шоғырға қарағанда жүйелі түрде көбірек «бақыланатын» жұлдыз сақталатыны анықталған. Осы жұмыста бастапқы жұлдыздар саны 6500–20000 аралығын, жұлдыз түзілу тиімділігінің бірнеше мәнін, бастапқы жарты масса радиусының 1,5–4,5 пк аралығындағы мәндерін және бірнеше кездейсоқ бастапқы жағдайларды (random кездейсоқ бастапқы жағдайы (seed)) қамтитын модельдердің кеңейтілген торы есептелді.

Сонымен қатар модельдерді жорамал бақылаулар негізінде шоғыр мүшелерін таңдаудың үш деңгейлі сараптамасы енгізілді: (1) масса және көрінерлік жұлдыздық шама бойынша

фотометриялық іріктеу; (2) бірінші іріктеу және меншікті қозғалыстар бойынша кинематикалық іріктеу; (3) параллакс бойынша соған ұқсас орнықты іріктеуді қосатын алдыңғы екі іріктеумен біріктірілген әдіс. Зерттелген модельдер торынан бастапқы жарты масса радиустары 3.6, 3.8 және 4.0 пк және бірдей кездейсоқ бастапқы жағдайы (кездейсоқ бастапқы жағдайы (seed) = 22) бар үш модель анықталды. Бұл модельдерде 3-әдіс бойынша соңғы бақыланатын жұлдыздар саны 2644–2704 аралығында болып, NGC 2516 шоғырында бақылау арқылы анықталған 2690 мүшеге өте жақын нәтиже көрсетті.

Осы модельдердің әрқайсысы өзінің эволюциясы барысында жұлдыздық-массалы үш қара құрдым түзеді. Олардың ішінен соңғы уақыт мезетіндегі үш модельдің әрқайсысында дәл бір қара құрдым ғана шоғыр мүшелерін кинематикалық тұрғыдан іріктеу эллипсінің ішінде қалады. Бұл нәтиже Ma et al. (2026) жұмысының NGC 2516 шоғырында кемінде екі динамикалық байланысқан қара құрдым сақталуы мүмкін деген соңғы қорытындысымен үйлеседі.

Кілтті сөздер: NGC 2516, шашыраңқы жұлдыздар шоғырлары, N-дене модельдеулері, жұлдыздық-массалы қара құрдымдар, шоғыр мүшелерін іріктеу, меншікті қозғалыстар, Gaia.

Кіріспе

Жұлдыз шоғырларының тарихы – олар қалыптасқан Галактика дискісінің тарихының тікелей жазбасы. Шашыраңқы шоғырлар алып молекулалық бұлттардан пайда болады [1] және Галактика жазықтығына жақын жерде туылады әрі сол маңда қалады [2, 3]. Салыстырмалы түрде аз массалы, әлсіз байланысқан жүйелер болғандықтан, шашыраңқы шоғырлардың көпшілігі бірнеше жүз миллион жыл ішінде өріске сіңіп кетеді, бұл оларды өздерінің бақыланатын жасына тікелей сәйкес келетін уақыт масштабында тікелей N-дене модельдеу үшін өте қолайлы нысанаға айналдырады.

Gaia миссиясы жүздеген миллион жұлдыз үшін бұрын-соңды болмаған дәлдіктегі астрометрия (позициялар, меншікті қозғалыстар, параллакс) мен фотометрия деректерін беру арқылы бұл саланы түбегейлі өзгертті [4], бұл Күн маңындағы шашыраңқы шоғырлар, соның ішінде NGC 2516 үшін де сенімді әрі біртекті мүшелік анықтауға мүмкіндік берді [5].

NGC 2516 (Caldwell 96, «Sprinter») – Carina шоқжұлдызындағы жас, оңтүстік шашыраңқы шоғыр, оны 1751–1752 жылдары Abbe Lacaille ашқан, жасы шамамен 120-150 млн жыл аралығында бағаланады [6]. Kalambay et al. (2025) [6] ϕ i-GRAPe-GPU кодын [7] қолданып шоғырдың Галактикалық орбитасын кері уақытта қалпына келтірді және жетпістен

астам N-дене модельдеуінің ішінен Pang et al. (2022) [8] хабарлаған шоғырдың қазіргі уақыттағы Gaia негізіндегі масса функциясын, кумулятивті радиалды профилін және меншікті қозғалыс үлестірімін ең жақсы қайталайтын бастапқы шарттарды анықтау бойынша жұмыстар жасаған. Сол жұмыста модель мен бақылау арасында морфологиялық жағынан жақсы сәйкестік табылды, дегенмен модельде «бақыланатын» жұлдыздардың саны нақты деректегіден жүйелі түрде артық болды – бұл артықшылық нақты, шектелген каталогта өрістегі жұлдыздардан сенімді түрде ажыратылмайтын толысу құйрық жұлдыздарына жатқызылды.

Осы ашық мәселеге соңғы кездегі екі тәуелсіз жұмыс тікелей қатысты. Біріншіден, Ма және басқалар [9] Gaia DR3 меншікті қозғалыстары мен радиалды жылдамдықтарын пайдаланып NGC 2516-ның (тағы сегіз көрші ашық шоғырмен қатар) жылдамдық дисперсиясы профилін талдап, оның меншікті қозғалыс және радиалды жылдамдық дисперсиясы жұлдыз массасымен бірге кемімей, керісінше өсетінін анықтады – бұл екі денелі релаксация арқылы энергия теңбе-теңдігіне ұмтылу кезінде күтілетін үрдіске қарама-қарсы. Бұл белгіні өздерінің N-дене модельдерімен салыстыра отырып, авторлар NGC 2516-да кемінде екі жұлдыздық массалы қара құрдым сақталуы ықтимал деген қорытындыға келді, олар динамикалық әсерлесулер арқылы ауыр жұлдыздарды сыртқа лақтырып, шоғыр өзегін «қыздырады» дейді.

Екіншіден, 2026 жылғы бірнеше жұмыс жаңа Gaia деректері мен арнайы спектроскопияны қолданып NGC 2516-ның құрылымы мен кинематикасы туралы бақылау бейнесін нақтылады. Wright, Jeffries және Whalley (2026) [10] Gaia астрометриясын Gaia-ESO Survey радиалды жылдамдықтарымен біріктіріп, шоғырдың 3D позициялары мен жылдамдықтарын қалпына келтірді, оның қашықтығын 406.3 ү 0.8 пк деп нақтылады және Hunt & Reffert (2024) [3] бойынша шамамен 3500 $M_{\odot}$ масса мен 13.5 пк толысу радиус қабылдады – бұл мәндер Kalambay et al. (2025) [6] жұмысында Pang et al. [8] бойынша қабылданған $M_{cl} = 1973.3 M_{\odot}$ және $r_t = 18.3$ пк мәндерінен айтарлықтай ерекшеленеді, біз бұған төменде талқылау бөлімінде қайта ораламыз. Zhang (2026) [11] жақын шоғырлардың шикі Gaia негізіндегі 3D қайта құрылымдарында болатын күшті көру сәулесі бойынша созылу («Finger-of-God») құбылысын түзейтін Байес деконволюция әдісінің тексеру жағдайы ретінде дәл NGC 2516-ны қолданды, бұл көру сызығы бойынша байқалатын құрылымның едәуір бөлігі физикалық құрылым емес, астрометриялық қателік артефактісі екенін көрсетті – бұл модельделген және бақыланатын 3D шоғыр пішіндерін салыстыруға тікелей қатысты ескерту. Бөлек, Bouma және т.б. (2021) [12] TESS айналу периодтары мен литий мөлшерін пайдаланып NGC 2516 айналасында шамамен 500 пк-ге дейін созылатын (аспанда шамамен 20 градус) шынайы, бірдей жастағы

кинематикалық гало бар екенін растады, яғни Kalambay et al. (2025) [6] жұмысында аталған «артық» популяцияның бір бөлігі таза модельдік немесе іріктеу артефактісі емес, шоғырдың нақты, тек сирек орналасқан жалғасы болуы мүмкін.

Осы нәтижелерге сүйене отырып, бұл жұмыс екі өзара байланысты мақсатты көздейді: (i) N-дене шоғыр моделінің «бақыланатын» мүшелерін іріктеу үшін неғұрлым шынайы, көпдеңгейлі бақылаудай іріктеу процедурасын әзірлеу, бұл [6] жұмысында анықталған жүйелі «артықшылықты» тікелей шешеді; және (ii) шоғырдың бақыланатын радиалды профилін ең жақсы қайталайтын нақты реализацияларды табу үшін NGC 2516 модельдерінің кеңейтілген торын іздеу және осы ең жақсы сәйкес келетін модельдер қанша қара құрдым болжайтынын анықтау.

Материалдар мен әдістері

Модельдеу [6] жұмыстарымен бірдей сандық орнатумен жүргізілді. Жұлдыз орбиталары тікелей N-дене коды phi-GRAPE-GPU-мен [7] сыртқы, Галактика өрісін сипаттайтын үш компонентті өстік симетриялы Пламмер-Кузьмин потенциалы [13] аясында интегралданады [14, 15]. Жұлдыздардың эволюциясы жаңартылған SSE [16] рутиналары арқылы есептеледі. Ал жұлдыздардың бастапқы масса функциясы 0.08–100 $M_{\odot}$ аралығындағы әдеттегі Kroupa (2001) түрінде [17] болса бақыланған шоғырдың масса таралуы қайталанбайтындықтан өзгертілген сынық дәрежелі заңдылық таңдалды:

$$\xi(m)dm \propto m^{-\alpha}, \quad (1)$$

мұнда

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.6 \quad (0.08 \leq m/M_{\odot} < 0.75), \\ \alpha &= 3.1 \quad (0.75 \leq m/M_{\odot} \leq 100). \end{aligned}$$

Мұндай тәсіл NGC 2632 шоғырының моделін тұрғызғанда қолданылған әдіске негізделеді [18]. Жұлдыздық эволюция салдарынан пайда болатын нейтрондық жұлдыздар мен қара құрдымдардың массалары мен тепкі (natal kick) алуы жаңартылған SSE моделіне [16] сәйкес жүреді. Яғни, соңғы аса жаңа модельдеріне сәйкес кейбір жағдайларда жарылыс қабығының ортаға қайта құлауы нәтижесінде тепкі (natal kick) нөлге тең болады.

Модельдер торы

Біз Nk-SFE-rhm(0)-(seed) деп аталатын N-дене модельдер торын есептедік, мұндағы N – бастапқы жұлдыз саны (мыңдықпен), SFE – жұлдыз түзілу тиімділігі (%), rhm(0) – бастапқы жарты масса радиусы (пк), ал кездейсоқ бастапқы жағдайы (seed) – бастапқы реализацияның

кездейсоқ сан генераторының мәні. Top N ~ 6500-20000, SFE = 17-25 %, rhm(0)=1.5-4.5 пк және тұрақты массада бірнеше кездейсоқ бастапқы жағдайы (seed) мәнін қамтиды. Толық модельдер торы 1-кестеде келтірілген, барлығы 18 симуляциядан тұрады. Барлық модельдер [6, 8, 9] жұмыстарында NGC 2516 үшін қабылданған ~123 млн жыл жасына дейін эволюцияланды және бұрын қолданылған астропу [19] негізіндегі жорамал бақылаулар үшін (гелиоцентрлік, экваторлық) координаттарға түрлендірілді.

1-кесте – Модельдер торының толық жиынтығы (N = 18 симуляция)

Модель	N(0)	SFE	rhm, (0)	кездей-соқ бастап-қы жағдайы (seed)	NBH	rtid	rhm	rtid	rhm	Nfinal (3-әдіс)
		%	пк			°	°	пк	пк	
06.5k-25-4.0-11	6393	25	4.0	11	2	2.428	0.857	17.308	6.109	2234
07k-25-4.0-11	6907	25	4.0	11	2	2.455	0.885	17.308	6.235	2243
09k-20-3.0-11	8938	20	3.0	11	2	2.333	0.838	16.793	6.033	2006
10k-20-3.2-11	9927	20	3.2	11	2	2.381	0.872	17.184	6.290	2234
15k-17-2.5-23	14945	17	2.5	23	1	2.111	0.859	15.442	6.277	1657
17k-17-1.5-22	16983	17	1.5	22	1	2.651	0.784	18.625	5.506	2513
17k-17-2.5-11	16949	17	2.5	11	3	2.340	1.008	16.411	7.068	1958
20k-17-2.5-11	19943	17	2.5	11	4	2.712	0.912	19.779	6.648	3207
20k-17-2.5-22	19944	17	2.5	22	3	2.706	0.869	19.614	6.291	3098
20k-17-2.5-33	19943	17	2.5	33	1	2.558	0.955	18.561	6.927	2707
20k-17-3.6-22	19885	17	3.6	22	3	2.541	1.042	18.408	7.543	2704
20k-17-3.8-22	19870	17	3.8	22	3	2.495	1.133	18.127	8.231	2644

20k-17-4.0-11	19853	17	4.0	11	4	2.559	1.174	18.499	8.479	2964
20k-17-4.0-22	19851	17	4.0	22	3	2.473	1.136	17.921	8.230	2698
20k-17-4.0-24	19852	17	4.0	24	4	2.082	1.202	15.050	8.686	1899
20k-17-4.0-44	19852	17	4.0	44	4	2.104	1.088	15.190	7.854	1907
20k-17-4.5-22	19808	17	4.5	22	3	2.312	1.200	16.795	8.717	2352
20k-17-4.5-23	19808	17	4.5	23	1	2.010	1.214	14.331	8.652	1757

Жорамал бақылауды үш деңгейлі іріктеу

Бұл жұмыстың негізгі әдістемелік дамуы – әрбір модельдің соңғы кескінделіміне (снэпшоттарға) ($t \sim 123$ млн жыл) қолданылатын, шынайы Gaia негізіндегі іріктеуге жақындай түсетін үш мүшелік критерийінің тізбегі:

1-әдіс – жарықтығы мен массасына қарай таңдау (фотометриялық әдіс). Алдымен модельдегі барлық жұлдыздардың ішінен біз бақылау арқылы көруге болатын жұлдыздарды ғана қалдырамыз. Ол үшін жұлдыздың массасы кемінде 0.2 Күн массасы болуы және оның көрінерлік жұлдыздық шамасы (m_V) 15-тен кіші болуы керек. Яғни бұл кезеңде біз: «Жұлдызды телескоп арқылы жеткілікті жақсы көруге бола ма?» деген сұраққа жауап береміз.

2-әдіс – меншікті қозғалысы бойынша тексеру (кинематикалық әдіс). Екінші әдіс бірінші әдіске қосылады, яғни алдымен 1-әдістегі фотометриялық шарт орындалуы керек. Содан кейін жұлдыздардың аспандағы қозғалысын – меншікті қозғалыстарын – тексереміз. Шоғырдың орталық бөлігіндегі жұлдыздар негізінде шоғырдың ортақ қозғалысы және оның қалыпты ауытқу шегі анықталады. Ортақ қозғалыс пен ауытқу шегі робасты статистика – медиана және медианалық абсолютті ауытқу (MAD) – арқылы есептеледі: ауытқу шегі $\sigma = 1.4826 \times \text{MAD}$ түрінде анықталады (бұл коэффициент қалыпты үлестірім жағдайында MAD-ты стандартты ауытқуға теңестіреді). Осылайша есептелген орталық ($\mu_{\alpha,0}$, $\mu_{\delta,0}$) пен ($\sigma_{\mu\alpha}$, $\sigma_{\mu\delta}$) мәндері негізінде әрбір жұлдыз мына шартты қанағаттандырса ғана шоғыр мүшесі болып саналады:

$$((\mu_{\alpha} \cos \delta - \mu_{\alpha,0}) / \sigma_{\mu\alpha})^2 + ((\mu_{\delta} - \mu_{\delta,0}) / \sigma_{\mu\delta})^2 < 9 \quad (2)$$

яғни жұлдыздың меншікті қозғалысы шоғырдың ортақ қозғалысынан 3σ шегінде (эллипс ішінде) жатуы керек. Содан кейін барлық

жұлдыздардың қозғалысы осы шекпен салыстырылады. Егер жұлдыздың қозғалысы шоғыр мүшелеріне тән қозғалыстан тым алшақ болса, ол шоғыр мүшесі ретінде есептелмейді.

3-әдіс – алдыңғы екі әдіс пен параллаксты бірге пайдалану (біріктірілген әдіс). Үшінші әдіс – ең қатаң іріктеу. Мұнда 1-әдістің фотометриялық шарты + 2-әдістің меншікті қозғалыс шарты сақталады және оған қосымша жұлдыздың параллаксы тексеріледі. Параллаксы үшін де шоғыр өзегіндегі жұлдыздар негізінде робасты орталық π_0 мен ені $\sigma_\pi = 1.4826 \times \text{MAD}(\pi)$ есептеледі, содан кейін әрбір жұлдыз мына шартты қанағаттандырса ғана мүше болып саналады: $|\pi - \pi_0| < 3\sigma_\pi$. Параллаксы жұлдыздың бізден қашықтығын бағалауға мүмкіндік береді. Сондықтан жұлдыз шоғыр мүшесі болып саналуы үшін ол жарықтығы мен массасы бойынша сәйкес келуі, меншікті қозғалысы шоғыр жұлдыздарына ұқсас болуы және қашықтығы да шоғырмен сәйкес келуі керек.

Осылайша, әрбір келесі әдіс алдыңғы әдіске қойылған талаптарды сақтай отырып, жаңа қосымша шарт енгізеді:



1-сурет

Шоғырдың орталық бөлігіндегі жұлдыздарға қарап, оның қалыпты қозғалысын анықтағанда орташа мән (mean) мен стандартты ауытқу (standard deviation) қолданылмайды. Оның орнына медиана (median) және MAD (median absolute deviation) пайдаланылады.

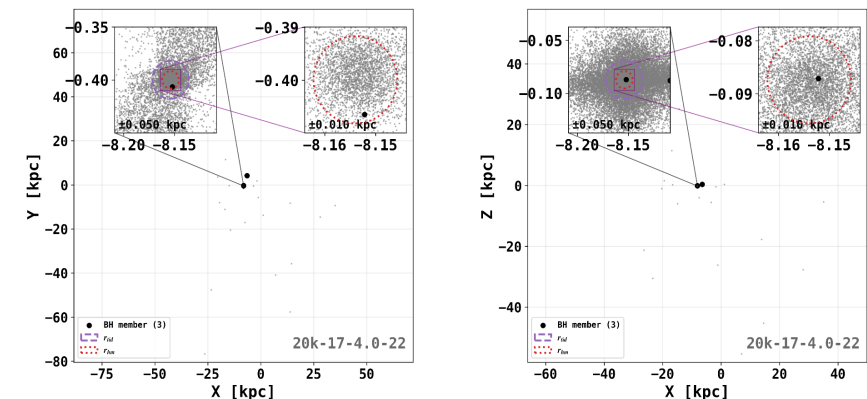
Себебі кейде шоғырдың орталық аймағына кездейсоқ өте жоғары жылдамдықпен қозғалатын нейтрондық жұлдыз немесе қара құрдым түсіп қалуы мүмкін. Мұндай ерекше нысан орташа мәнді қатты ығыстырып жіберуі ықтимал. Ал медиана мен MAD мұндай жекелеген экстремалды нысандарға әлдеқайда төзімді.

Бұл әдіс бақылау астрономиясында қолданылатын шоғыр мүшелерін статистикалық түрде анықтау тәсілдерінің идеясына сәйкес келеді, соның ішінде StarGO алгоритмі [20] және Pang et al. [8] ұсынған тәсілдермен үйлеседі.

Нәтижелер және талқылау

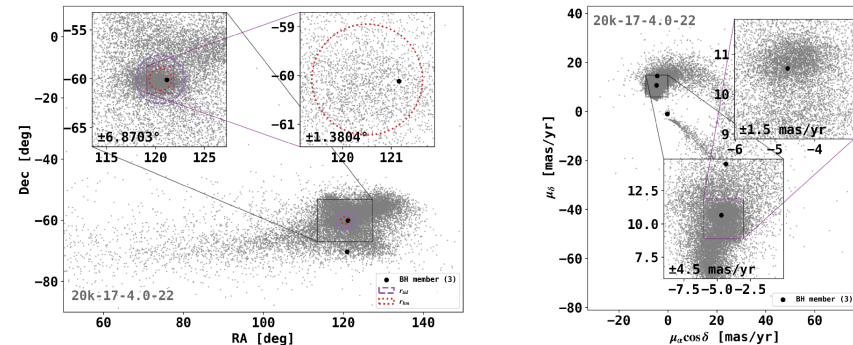
Іріктеу алдындағы ең жақсы сәйкес келетін модельдің қазіргі кездегі кескіні

Іріктеу әдістерінің әсерін сандық тұрғыдан бағалауға кіріспес бұрын (2.3-бөлім), алдымен ең жақсы сәйкес келетін үш модельдің бірі – 20k-17-4.0-22 ($N_{\text{BH}}=3$) моделінің іріктеусіз («шикі») қазіргі кездегі жұлдыздар үлестірімін көрсетеміз. Қалған екі ең жақсы модель – 20k-17-3.6-22 және 20k-17-3.8-22 – үшін алынған үлестірімдер де мұнда көрсетілген модельден көзге көрінерліктей ерекшеленбейді. Сондықтан қысқалық мақсатында олардың суреттері жеке берілмейді, ал тиісті сандық нәтижелер 1 және 2-кестелерде келтірілген.



1-сурет – $t \approx 123$ млн жылдағы 20k-17-4.0-22 моделіндегі жұлдыздардың галактика центріне қатысты X–Y (сол жақ) және X–Z (оң жақ) жазықтықтардағы кеңістіктік таралуы, іріктелуі.

Ішкі панельдерде (± 50 пк және ± 10 пк) шоғырдың ықшам қара құрдымдар өзегі көрсетілген.



2-сурет – Экваторлық координаталардағы (RA, Dec) позициялар (сол жақ, $\pm 2.5^\circ$ көрсету аймағымен) және меншікті қозғалыстардың үлестірімі (оң жақ), іріктеусіз.

1-суретте модельдің $t \approx 123$ млн жылдағы галактикацентрлік X–Y және X–Z жазықтықтарындағы позициялары көрсетілген. Тығыздық центрінің маңындағы ішкі панельдер (± 50 пк және ± 10 пк) үш қара құрдымның біреуінің бірнеше парсек көлеміндегі өте ықшам конфигурацияда сақталатынын көрсетеді. Оның орналасуы бақыланатын шоғырдың кеңістіктік масштабымен салыстырғанда іс жүзінде ажыратылмайды. Ал шоғырдың орталық аймағынан тыс қалған екі қара құрдым галактикацентрлік X және Y координаталары бойынша ондаған килопарсекке дейін алыстаған. Бұл тепкі (natal kick) әсерінің қара құрдымды жұлдыздық шоғырдан жай ғана белгілі бір қашықтыққа ығыстырып қоймай, оны Галактикадағы мүлде басқа орбитаға шығара алатынын көрнекі түрде көрсетеді.

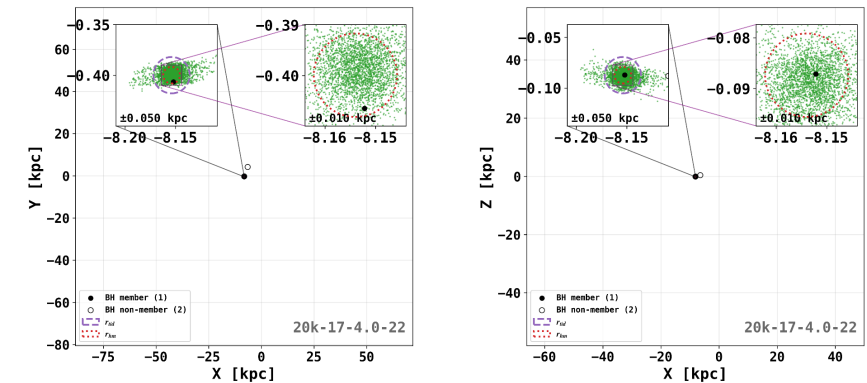
2-суреттің сол жақ панелінде шоғырдың маңындағы $\pm 2.5\sigma$ аймақта тек бір қара құрдымның қалғаны көрінеді, ал қалған екі қара құрдым аспанда шоғырдан ондаған градусқа қашықта орналасқан. Оң жақ панеліде осы нысандардың меншікті қозғалыстарының үлестірімі көрсетілген. Шоғырда сақталған қара құрдым меншікті қозғалыс кеңістігінде тар аймақта шоғырланған, ал шоғырдан лақтырылған екі қара құрдым $\mu_{\alpha \cos \delta}$ және μ_{δ} компоненттері бойынша кең ауқымда таралған. Бұл айырмашылық олардың меншікті қозғалыстарына негізделген шоғыр мүшелігін анықтау әдістері арқылы айқын ажыратылатынын көрсетеді.

Тандалған модель 3-әдіс бойынша іріктелгеннен кейін

3–4-суреттерде сол 20k-17-4.0-22 моделінің меншікті қозғалыстар мен параллаксты біріктіретін 3-әдіс бойынша іріктеуден кейінгі күйі көрсетілген. Осылайша, бұл суреттер модельдің іріктеуге дейінгі және іріктеуден кейінгі күйлерін тікелей салыстыруға мүмкіндік береді. Іріктеуден өткен, яғни

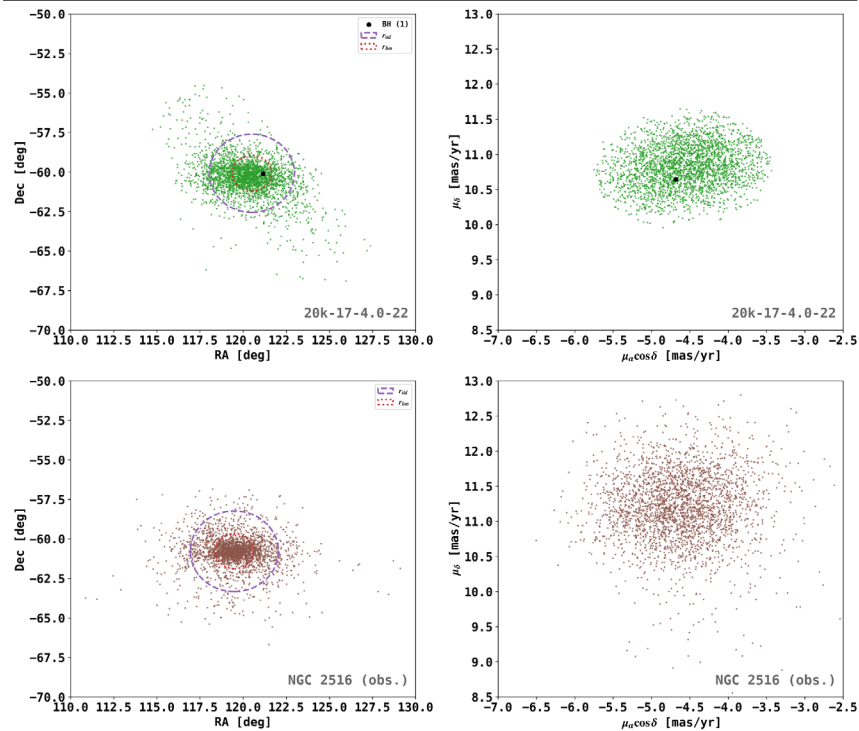
шоғыр мүшелері ретінде анықталған жұлдыздар енді тығыз жасыл өріс түрінде көрсетілген, ал іріктеуден шығарылған, яғни шоғыр мүшелері ретінде қабылданбаған жұлдыздар салынбайды. Іріктеу критерийлеріне сәйкес келмеген ықшам нысандар қуыс (ашық) таңбалармен көрсетілген.

2-кестеде келтірілген нәтижелерге сәйкес, модельдегі үш қара құрдымның тек біреуі ғана (толтырылған дөңгелек) шоғыр мүшесі ретінде іріктеуден өтеді.



3-сурет – 1-суреттегідей, 3-әдіс бойынша іріктеуден кейінгі галактикацентрлік X–Y және X–Z кеңістігіндегі жұлдыздардың таралуы. Сақталған (шоғыр мүшелері) жұлдыздар жасыл түспен, ал іріктеуден шығарылған (шоғыр мүшелері емес) қара құрдымдар қуыс таңбалармен көрсетілген.

3-суреттен 3-әдіс бойынша іріктеуден өткен популяцияның галактикацентрлік X–Y және X–Z кеңістігінде бақыланатын шоғырдың физикалық өлшемдеріне сәйкес келетін ықшам аймақта шоғырланғаны көрінеді. Бұл әсіресе ± 10 пк масштабындағы ішкі панеліде анық байқалады. Ал шоғыр мүшелері ретінде іріктелмеген екі қара құрдым бастапқы кеңістіктік таралуындағы алшақ орналасуын сақтап қалады және шоғырдың ықшам орталық аймағынан тыс қалады. Осылайша, қара құрдымдардың шоғырдан тыс орналасуы тек сурет көрсету шекарасынан тыс қалумен емес, қолданылған мүшелік критерийлері бойынша нақты іріктеуден шығарылуымен сипатталады.



4-сурет – Модельдегі (жоғарғы қатар) 3-әдіс (меншікті қозғалыс пен параллакс бойынша қиылыстырылған іріктеу) арқылы сұрыпталған шоғыр мүшелерінің экваторлық координаталардағы (RA, Dec) орналасуы мен меншікті қозғалыстарының ($\mu_{\alpha \cos \delta}$, μ_{δ}) таралуы, NGC 2516-ның бақылаудан алынған толық каталогымен (төменгі қатар) салыстырылған.

Сол жақ панельдердегі үзік сызықты дөңгелектер сәйкесінше толысу радиусты (r_{tid}) және жарты масса радиусын (r_{hm}) көрсетеді – модель үшін N-дене симуляциясынан есептелген, ал бақылау үшін Pang т.б. (2022) жұмысындағы әдебиеттік мәндер бойынша алынған.

Жоғарғы сол жақ панельдегі қара нүкте – модельдегі, 3-әдіс критерийінен (меншікті қозғалыс пен параллакс шегінен) өткен қара құрдым (BH).

4-суреттің жоғарғы сол жақ панелінен 3-әдіс бойынша сақталған популяцияның аспан жазықтығында шоғырдың толысу радиусы шегінде орналасқаны көрінеді, ал шоғыр мүшелері ретінде іріктелмеген екі қара

құрдым шоғырдан ондаған градус қашықтықта орналасқан. Жоғарғы оң жақ панельде меншікті қозғалыстар бойынша қолданылған іріктеуден кейінгі бейнесі, аталған іріктеу эллипс пішінді, 2 және 3-әдістерде қолданылатын 3σ шекарасын белгілейді. Шоғыр мүшелері ретінде тек осы эллипстің ішіне түсетін және параллакс бойынша белгіленген сәйкес диапазонға жататын нысандар ғана сақталады. Нәтижесінде шоғыр мүшелері тығыз жасыл популяция ретінде көрінеді, ал екі қара құрдым да осы шекарадан тыс орналасып, іріктеуден шығарылады. Бұл нәтиже 2-кестеде келтірілген сандық мәндермен толық сәйкес келеді.

Бақыланатын шоғырмен салыстыру

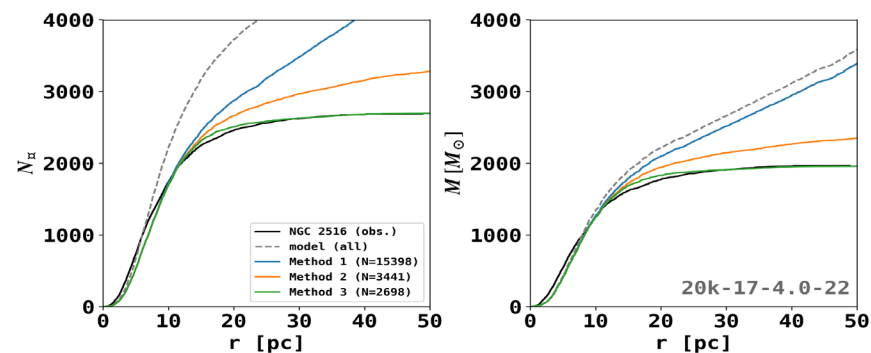
4-суретте (төменгі панель) осы жұмыста пайдаланылған Gaia деректері негізінде анықталған NGC 2516-ның нақты мүшелік каталогының [6, 8] сәйкес көрінісі берілген. Суретте модельдік нәтижелерді көрсету кезінде қолданылған r_{tid} және r_{hm} анықтамалық шеңберлері де көрсетілген. Бұл 4-суреттегі (төменгі панель) бақыланатын шоғырдың кеңістіктік және кинематикалық сипаттамаларын 4-суретте (жоғарғы панель) келтірілген 3-әдіс бойынша іріктелген модель нәтижелерімен тікелей салыстыруға мүмкіндік береді.

4-суреттегі (төменгі панель) сол жақ панелінен нақты шоғырдың аспандағы кеңістіктік таралуы 4-суреттегі (жоғары панель) 3-әдіс бойынша іріктелген модель популяциясымен салыстырғанда да ықшам екені және мүшелердің басым бөлігінің r_{tid} шегінде орналасқаны көрінеді. Оң жақ панельде бақыланған мүшелердің меншікті қозғалыстары $\mu_{\alpha \cos \delta}$ және μ_{δ} бойынша шамамен $(-4.5, 11.1)$ mas/жыл маңында шоғырланған. Олардың шашырауы шамамен $0.5-1$ mas/жыл деңгейінде болып, 4-суреттегі (жоғары панель) көрсетілген сақталған (жасыл) модельдік популяцияның тар әрі біртұтас меншікті қозғалыс таралуымен масштаб жағынан сәйкес келеді. Сонымен қатар бұл таралу 1-суретте көрсетілген шоғырдан лақтырылған қара құрдымдардың кең ауқымды меншікті қозғалыс таралуынан айтарлықтай аз.

Үш іріктеу әдісінің әсері әрбір модель үшін жүйелі түрде есептеліп, нәтижелері NGC 2516-ның Gaia EDR3 деректері негізінде анықталған бақыланатын мүшелік профилімен [6, 8] салыстырылды. Бұл салыстыру кумулятивтік радиалдық жұлдыз саны $N(<r)$ және кумулятивтік радиалдық масса $M(<r)$ профильдері арқылы жүргізілді. Зерттелген модельдердің барлығында 1-әдіс бойынша алынған профиль шоғырдың орталық аймағынан тыс жерде бақыланатын профильден жүйелі түрде жоғары болады. Бұл [6] жұмысында анықталған мәселені сандық тұрғыдан растайды: үлкен тепкі (natal kick) алған нысандар, негізінен нейтрондық жұлдыздар мен қара құрдымдар, физикалық тұрғыдан бақыланатын шоғыр мүшелеріне

жатпаса да, масса және жұлдыздық шама критерийлерін формальды түрде қанағаттандыра алады.

2-әдісті қолданғанда алынған профиль бақыланатын деректерге едәуір жақындайды, себебі меншікті қозғалысы шоғырдың ортақ кинематикалық қасиеттеріне сәйкес келмейтін нысандардың бір бөлігі іріктеуден шығарылады. Ал 3-әдіс бойынша, яғни фотометриялық критерийге қоса меншікті қозғалыс пен параллакс бойынша іріктеу жүргізілгенде, алынған профиль тексерілген модельдердің көпшілігінде бақыланатын қисыққа өте жақын орналасады және одан ауытқуы аз болады немесе іс жүзінде байқалмайды.



5-сурет – 20k-17-4.0-22 моделі үшін кумулятивтік радиалдық жұлдыз саны $N(<r)$ (сол жақ) және кумулятивтік радиалдық масса $M(<r)$ (оң жақ) профильдері. Профильдер NGC 2516-ның бақыланатын профілімен (қара) салыстырылған: 1-әдіс – көк, 2-әдіс – қызғылт сары, 3-әдіс – жасыл; іріктеусіз модель сұр үзік сызықпен көрсетілген.

5-суретте бұл салыстыру 20k-17-4.0-22 моделі үшін көрсетілген. Іріктеусіз модель (сұр үзік сызық) мен 1-әдіс бойынша алынған профиль (көк) шамамен 10 пк-ден үлкен радиустарда бақыланатын профильден (қара) айқын ауытқиды. 2-әдіс бойынша алынған профиль (қызғылт сары) бақыланатын деректерге жақынырақ болғанымен, оларды толық қайталамайды. Ал 3-әдіс бойынша алынған профиль (жасыл) ең үлкен қарастырылған радиусқа дейін бақыланатын қисықпен жақсы сәйкес келеді және үлкен радиустарда шамамен сол асимптоталық мәнге жақындайды. 20k-17-3.6-22 және 20k-17-3.8-22 модельдері үшін алынған сәйкес профильдер де осыған ұқсас сапалық сипат көрсетеді; олардың 3-әдіс бойынша анықталған соңғы бақыланатын жұлдыздар саны 2-кестеде келтірілген.

3-әдісті модельдер торының толық жиынтығына қолдану нәтижесінде біз бір-бірінен тек бастапқы жарты масса радиусы бойынша ерекшеленетін үш модельді – 20k-17-3.6-22, 20k-17-3.8-22 және 20k-17-4.0-22 – анықтадық. Олардың бастапқы жарты масса радиустары сәйкесінше $r_{hm}(0)=3.6, 3.8$ және 4.0 пк құрайды, ал бастапқы жұлдыздар саны $N(0) \approx 19850-19890$, жұлдыз түзілу тиімділігі $SFE = 17\%$ және кездейсоқ бастапқы күй кездейсоқ бастапқы жағдайы (seed) = 22 барлық үш модельде бірдей сақталған. Осы үш модельдің соңғы «бақыланатын» жұлдыздар саны NGC 2516-ның бақылау арқылы анықталған мүшелер санына өте жақын болып шықты (2-кесте).

2-кесте – 3-әдіс іріктеуінен кейін NGC 2516-ның бақыланатын профіліне ең жақсы сай келетін үш модель

Модель	$r_{hm}(0)$ пк	кездейсоқ бастапқы жағдайы (seed)	NBH	N final (3-әдіс)	N NGC 2516 (бақылау)	NBH мүше/ жалпы
20k-17-3.6-22	3.6	22	3	2704	2690	1/3
20k-17-3.8-22	3.8	22	3	2644	2690	1/3
20k-17-4.0-22	4.0	22	3	2698	2690	1/3

Соңғы жорамал бақыланатын жұлдыздар санының нақты мүшелік санынан ауытқуы үш модель үшін 0,3 % (20k-17-4.0-22) пен 1,7 % (20k-17-3.8-22) аралығында болады. Бұл тек фотометриялық критерийді қолданған жағдаймен салыстырғанда айтарлықтай жақсаруды көрсетеді, өйткені фотометриялық іріктеу лақтырылған ықшам қалдықтарды және олармен байланысты кеңістікте шашыраған популяцияларды жүйелі түрде ажыратып, алып тастай алмайды.

Маңыздысы, іріктеу нәтижесінде таңдалған үш модельдің барлығы бірдей $N_{BH} = 3$ қара құрдымның түзілуін болжайды. Тек бастапқы жарты масса радиусы $r_{hm}(0)$ бойынша ерекшеленіп, кездейсоқ бастапқы жағдайы (seed) = 22 тұрақты болып қалатын осы үш тәуелсіз реализациядағы нәтижелердің бірдей болуы модельдің негізгі қорытындысының кездейсоқ бір реализацияға ғана тәуелді еместігін және оның тұрақты сипатқа ие екенін көрсетеді.

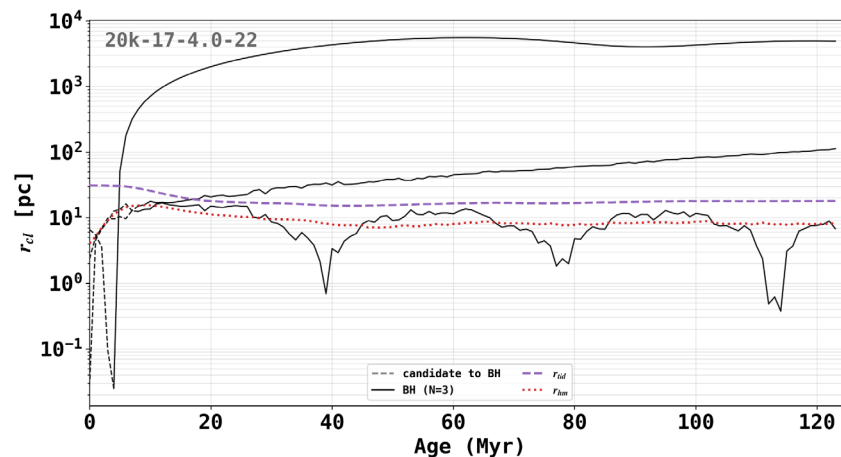
Алайда жоғарыда келтірілген $N_{BH}=3$ саны соңғы модельдік кескіндегі барлық үш қара құрдымды олардың шоғырдың негізгі популяциясымен кинематикалық тұрғыдан әлі де байланысты-болмауына қарамастан есепке алады. Сондықтан қара құрдымдардың шоғыр мүшесі ретінде сақталуын нақты бағалау үшін олардың меншікті қозғалыстары мен параллактары бойынша жеке кинематикалық іріктеу жүргізілді.

Масса және көрінерлік жұлдыздық шама талаптарын қолданбай, тек меншікті қозғалыс пен параллаксқа негізделген 3 σ кинематикалық-геометриялық критерийді ықшам қалдықтар популяциясына қолданғанда, 2-кестеде үш ең жақсы модель үшін көрсетілген неғұрлым нақты нәтиже алынады. Үш модельдің әрқайсысында үш қара құрдымның дәл біреуі ғана 3 σ меншікті қозғалыс–параллакс эллипсінің ішінде қалады.

Бұл нәтиже 3-әдістің қара құрдымдарды жай ғана фотометриялық қасиеттері бойынша емес, олардың шоғырмен кеңістіктік және кинематикалық байланысын ескере отырып ажыратудың маңыздылығын көрсетеді.

Қара құрдымдардың radial эволюциясы

Барлық үш модельдегі ықшам қалдықтардың кинематикасы толық тор бойынша байқалатын үлгіні қайталайды: қара құрдымдар тепкі (natal kick) әсерінен шоғырдың орталық аймағын ~5 млн жыл ішінде тастап кетеді, алайда біреуі 123 млн жылдық толық эволюция бойы шоғырмен динамикалық байланысты күйде қалады.



6-сурет – 20k-17-4.0-22 моделіндегі әрбір қара құрдымның шоғыр центрінен қашықтығы $r_d(t)$, оның түзілу сәтінен $t=123$ млн жылға дейінгі уақыт бойынша эволюциясы. Сонымен қатар уақыт бойынша өзгеретін толысу радиусы $r_{tid}(t)$ (күлгін үзік сызық) және жарты масса радиусы $r_{hm}(t)$ (қызыл нүктелі сызық) көрсетілген.

6-суретте тепкі (natal kick) әсерінен қара құрдымдардың шоғырдан бөліну процесінің уақыт бойынша эволюциясы көрсетілген. Үш қара құрдымның кемінде біреуі аса жаңа жарылыстарынан кейін бірнеше

миллион жыл ішінде шоғыр центрінен қашықтығын бірнеше реттік шамаға арттырып, қысқа уақыт ішінде толысу радиусынан r_{tid} асып кетеді. Бұл оның шоғырмен гравитациялық байланысын тез жоғалтып, одан бөлініп шығатынын көрсетеді.

Тағы бір қара құрдымның эволюциясы өзгеше. Ол бүкіл қарастырылған уақыт аралығында r_{tid} мәнінен төмен немесе оған жақын қашықтықта қалып, шоғырдың орталық бөлігінің өлшемін сипаттайтын r_{hm} радиусымен тығыз байланысты күйде қалады. Осылайша, 2-кестеде көрсетілген бір қара құрдымның шоғыр мүшесі ретінде сақталуы тек $t=123$ млн жылдағы кездейсоқ конфигурация емес, модельдің бүкіл динамикалық эволюциясы барысында қалыптасқан тұрақты жағдай екенін көруге болады.

Бұл жерде қара құрдымдардың түзілу механизмі де маңызды рөл атқарады. Аса жаңа жарылысынан кейін fallback процесі кезінде жарылыс нәтижесінде сыртқа лақтырылған заттың біраз бөлігі қайтадан қара құрдымға құлайды. Егер осы процесс барысында импульс айтарлықтай өзгермесе, импульстің сақталу заңына сәйкес, жаңадан пайда болған қара құрдым бастапқы жұлдыздың қозғалысына жақын жылдамдықпен қозғалып, шоғырдың ішінде сақталуы мүмкін. 6-суретте осындай механизммен пайда болған екі қара құрдымның динамикалық эволюциясы байқалады: олардың біреуі шоғырмен гравитациялық байланысын сақтап, r_{hm} маңында қалады, ал екіншісі бастапқыда шоғырға байланысты болғанымен, уақыт өте келе одан біртіндеп алыстап, r_{tid} шегінен шығады.

Бұл нәтиже қара құрдымның шоғыр мүшесі ретінде сақталуы тек оның түзілу кезінде алынған тепкіге (natal kick) ғана емес, сонымен бірге кейінгі динамикалық эволюциясына және шоғырдың гравитациялық потенциалымен өзара әрекеттесуіне де тәуелді екенін көрсетеді.

Талқылау

NGC 2516-ның бақыланатын профильдерін ең жақсы сипаттайтын үш модельдің барлығында үш жұлдыздық-массалы қара құрдымның түзілуі Ma, Pang et al. (2026) [9] жұмысының NGC 2516 шоғырында кемінде екі қара құрдым сақталуы мүмкін деген қорытындысымен үйлеседі. Бұл екі нәтиже бір-бірін қайталамайды, керісінше, әдістемелік тұрғыдан бірін-бірі толықтырады. [9] жұмысында қара құрдымдар саны жанама түрде бағаланады: бақыланатын жылдамдық дисперсиясының профилі шоғырдың нақты жасынан едәуір үлкен уақытқа дейін эволюцияланған эталондық N-дене моделімен салыстырылады. Мұндай тәсіл олардың моделінде ерте кезеңдегі газдың шығарылу физикасы ескерілмеуінің әсерін белгілі бір деңгейде өтеуге мүмкіндік береді. Ал осы жұмыста қара құрдымдар саны модельдердің бастапқы параметрлерін бақыланатын радиалдық жұлдыз саны мен масса профильдеріне тікелей сәйкестендіру арқылы анықталады және

модельдің жасы жасанды түрде ұлғайтылмайды. Өртүрлі N-дене модельдер жиынтықтарына қолданылған осы екі тәуелсіз әдістің бір-біріне сәйкес келуі NGC 2516-да қазіргі уақытта бір жұлдыздық-массалы қара құрдымнан көбірек нысан болуы ықтималдығын күшейтеді.

Дегенмен бұл нәтижелерді тікелей салыстырғанда белгілі бір ерекшелікті ескеру қажет. [9] жұмысында талданған жылдамдық дисперсиясының белгісі шоғырмен әлі де динамикалық байланыста қалған және шоғырдың орталық бөлігіндегі ауыр жұлдыздармен гравитациялық өзара әрекеттесу нәтижесінде динамикалық қыздыруға қатысатын қара құрдымдарды сипаттайды. Сондықтан бұл көрсеткіш шоғырдың бүкіл эволюциясы барысында түзілген қара құрдымдардың толық санын білдірмейді. 2-кесте үш ең жақсы модельдің әрқайсысында түзілген үш қара құрдымның тек біреуі ғана соңғы уақыт мезетінде шоғырдың 3σ меншікті қозғалыс-параллакс эллипсінің ішінде қалатынын көрсетеді; қалған екеуі динамикалық өзара әрекеттесулер арқылы шоғырдың орталық аймағынан әлдеқашан алыстап кеткен. Осы тұрғыдан алғанда, біздің модельдеріміз әрбір реализация үшін қазіргі уақытта шоғырмен динамикалық байланысын сақтаған шамамен бір қара құрдымды, ал шоғырдың бүкіл эволюциясы барысында жалпы үш қара құрдымның түзілгенін көрсетеді. Бұл екі көрсеткіш те [9] жұмысындағы «кемінде екі» деген бағамен үйлеседі, бірақ олардың физикалық мағынасы бірдей емес. [9] жұмысындағы баға шоғыр тарихы бойында динамикалық байланысын сақтаған қара құрдымдар популяциясына көбірек қатысты болса, біздің $N_{\text{BH}} = 3$ мәніміз модель эволюциясы барысында түзілген қара құрдымдардың жалпы санын сипаттайды. Сондықтан шоғырда түзілген қара құрдымдардың жалпы санын белгілі бір уақыт мезетінде онымен әлі де динамикалық байланыста қалған нысандар санынан ажырату N-дене модельдерінің нәтижелерін жылдамдық дисперсиясына негізделген бақылаулық шектеулермен болашақта салыстыру үшін маңызды.

Осы жерде маңызды бір ескертпе жасаған жөн: біздің 3-әдіс бойынша анықталған «кинематикалық мүшелік» – жұлдыздың меншікті қозғалысы мен параллаксы шоғырдың орташа мәнінен 3σ шегінде жататынын білдіретін таза статистикалық критерий, ал жұлдыздың шоғырмен нақты гравитациялық байланысты (физикалық түрде байланысқан) екенін бақылау деректері арқылы 100 пайыз растау мүмкін емес – мұны тек жоғары ықтималдықпен ғана айтуға болады. Сондықтан біздің нәтиже мен Ma, Pang et al. (2026) [9] жұмысының қорытындысы толық сәйкес келеді деуден гөрі, екеуі бір-бірін толықтырады және бірдей физикалық бейнеге ұқсас көрсеткіш береді деп тұжырымдаған дұрысырақ.

Бақылаулармен ең жақсы сәйкестіктің $r_{\text{hm}}(0) = 3.6\text{--}4.0$ пк аралығында алынуы [6] жұмысында эталондық мән ретінде қабылданған $r_{\text{hm}}(0) = 2.5$ пк

мәнінен айтарлықтай үлкен. Бұл NGC 2516-ның бастапқы конфигурациясы бұрын болжанғаннан гөрі аз дәрежеде орталыктандырылған болуы мүмкін екенін көрсетеді. Бастапқыда кеңірек таралған конфигурациялар ерте динамикалық релаксация барысында жұлдыздарын баяуырақ жоғалтады деген жалпы физикалық түсінікке бұл нәтиже сәйкес келеді. Нәтижесінде шамамен 123 млн жылдық қазіргі кезеңде модельдің бақыланатын мүшелік профилі нақты шоғырдың профилімен жақсырақ сәйкеседі.

Wright, Jeffries және Whalley (2026) [10] ұсынған NGC 2516-ның қайта қаралған параметрлері – 406.3 пк қашықтық, $\sim 3500 M_{\odot}$ масса және 13.5 пк толысу радиусы – тәуелсіз Gaia-ESO/Gaia астрометриялық-спектроскопиялық талдауларына және Hunt & Reffert (2024) каталогына негізделген. Бұл мәндер осы жұмыста және [6] зерттеуінде Pang et al. (2022) [8] негізінде қабылданған $M_{\text{cl}} = 1973.3 M_{\odot}$ және $rt = 18.3$ пк мәндерінен ерекшеленеді. Егер жаңа, шамамен 1.5–1.8 есе жоғары шоғыр массасы расталса, модельдер торының қолайлы аймағы жоғарырақ бастапқы массалар жағына ығысуы мүмкін және бұл арнайы қайта талдауды қажет етеді. Алайда осы жұмысты [6] зерттеуімен тікелей салыстыру және әдістемелік сабақтастықты сақтау мақсатында мұндай қайта талдау қазіргі модельдер торына енгізілген жоқ. Оны болашақ зерттеудің табиғи бағыты ретінде қарастырамыз.

Bouma et al. (2021) [12] анықтаған NGC 2516 айналасындағы шамамен 500 пк масштабындағы, шоғырмен жасы бірдей кинематикалық гало және Zhang (2026) [11] көрсеткен жақын шоғырлардың Gaia деректеріне негізделген шикі 3D қайта құрылымдарындағы көру бағыты бойындағы созылыстың едәуір бөлігі физикалық құрылымнан емес, астрометриялық өлшеу қателерінен туындауы мүмкін деген нәтиже [6] жұмысында анықталған «артық жұлдыздар» мәселесін неғұрлым толық түсіндіруге мүмкіндік береді. Атап айтқанда, модельдегі артық жұлдыздардың белгілі бір бөлігі таза модельдік артефакт болмауы мүмкін: олар шоғырдың шынайы, кеңістікте созылған популяциясының құрамына кіріп, тек масса мен фотометриялық критерийлерге сүйенетін 1-әдіс арқылы галактикалық фоннан ажыратылмауы ықтимал. Бұл өз кезегінде тек фотометриялық іріктеумен шектелмей, шоғырмен бірге қозғалатын және онымен бірдей қашықтықта орналасқан нысандарды анықтау үшін меншікті қозғалыс пен параллаксты біріктіретін іріктеу әдістерінің қажеттілігін көрсетеді.

Бұл жұмыстың негізгі шектеулерінің бірі – модельдік параллактардың шусыз болуы, яғни әрбір модельденген жұлдыздың бақылаушыға дейінгі нақты қашықтығы дәл белгілі деп есептеледі. Ал нақты Gaia деректеріндегі параллактар жұлдыздың қашықтығына және жарықтығына байланысты ақырлы өлшеу қателіктерімен сипатталады. Сондықтан болашақ зерттеулерде жорамал параллактарға бақылаулық шу енгізу маңызды.

Сонымен қатар [10] жұмысы ұсынған NGC 2516-ның қайта қаралған массасы мен толысу радиусын пайдаланып модельдер торын қайта есептеу де осы зерттеудің табиғи жалғасы болып табылады. Дегенмен параллакс өлшеу қателерінің шамасы (Gaia-да NGC 2516 қашықтығында $\sim$ пк деңгейінде) шоғыр радиусымен салыстырғанда шағын болғандықтан, мұндай шуды ескеру түпкі мүшелік санына айтарлықтай өзгеріс әкелмеуі мүмкін; бұл болжамды растау – келешек жұмыстың міндеті.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (AP26102895 гранты).

Қорытынды

N-дене шоғыр модельдері үшін үш деңгейлі бақылаулық мүшелік іріктеу әдісі ұсынылды: фотометриялық (1-әдіс), кинематикалық – меншікті қозғалыстарға негізделген (2-әдіс) және біріктірілген кинематикалық-геометриялық – меншікті қозғалыстар мен паралласты бірге пайдаланатын (3-әдіс). Әрбір келесі әдіс алдыңғы әдістің шарттарын сақтай отырып, қосымша іріктеу критерийін енгізеді. Шоғырдың орталық жұлдыздары негізінде медиана мен MAD-қа сүйенетін статистика қолданылды. Фотометриялық критерийден (1-әдіс) біріктірілген критерийге (3-әдіс) көшу [6] жұмысында анықталған модельдегі «бақыланатын» жұлдыздар санының артық болу мәселесін жүйелі түрде жоюға мүмкіндік берді.

NGC 2516 модельдерінің кеңейтілген торын ($N(0) \approx 6400\text{--}20000$) зерттеу нәтижесінде 3-әдіс бойынша соңғы «бақыланатын» жұлдыздар саны 2644–2704 аралығында болатын үш модель анықталды. Олар бастапқы жарты масса радиустары $r_{\text{hm}}(0)=3.6, 3.8$ және 4.0 пк және кездейсоқ бастапқы жағдайы (seed) = 22 мәнімен сипатталады. Бұл модельдердегі соңғы «бақыланатын» жұлдыздар саны NGC 2516-ның бақылау арқылы анықталған 2690 мүшесіне өте жақын.

Үш модельдің әрқайсысы эволюция барысында үш жұлдыздық-массалы қара құрдым түзеді. Алайда соңғы уақыт мезетінде олардың тек біреуі ғана меншікті қозғалыс пен паралласты біріктіретін кинематикалық-геометриялық мүшелік аймағында қалады. Қара құрдымдардың түзілуі мен олардың шоғырдан кейінгі динамикалық бөлінуін ескергендегі бұл нәтиже Ma, Pang et al. (2026) [9] жұмысында бақылаулық кинематикаға тәуелсіз тәсілмен алынған NGC 2516-да кемінде екі динамикалық байланысқан қара құрдым болуы мүмкін деген қорытындымен жалпы алғанда үйлеседі, бірақ бұл екі бағалаудың физикалық мағынасы бірдей емес екенін атап өткен жөн.

Жалпы алғанда, NGC 2516 мысалында алынған нәтижелер N-дене шоғыр модельдерін Gaia деректерімен салыстыру кезінде бақылаулық

мүшелік іріктеу әдістемесінің маңыздылығы негізгі динамикалық модельдің параметрлерін таңдаумен бірдей деңгейде екенін көрсетеді. Фотометриялық критерийдің өзі шоғырдан динамикалық түрде бөлініп кеткен нысандарды толық ажырата алмайды, ал меншікті қозғалыс пен параллаксты біріктіретін іріктеу нақты бақыланатын мүшелік профилін әлдеқайда жақсы қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Болашақ модельдер торында NGC 2516-ның қайта қаралған параметрлерін [10], сондай-ақ Gaia негізіндегі 3D-қайта құру әдістемесіне қатысты нәтижелерді [11] ескеру қажет.

REFERENCES

- 1 Lada C.J., Lada E.A. Embedded clusters in molecular clouds // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 2003. – Vol. 41, No. 1. – P. 57–115. – <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.011802.094844>
- 2 Kharchenko N.V., Piskunov A.E., Schilbach E., Röser S., Scholz R.-D. Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters // Astronomy & Astrophysics. – 2013. – Vol. 558. – A53. – <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322302>
- 3 Hunt E.L., Reffert S. Improving the open cluster census. III. Using cluster masses, radii, and dynamics to create a cleaned open cluster catalogue // Astronomy & Astrophysics. – 2024. – Vol. 686. – A42. – <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348662>
- 4 Gaia Collaboration, Vallenari A., Brown A.G.A., Prusti T. [et al.]. Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties // Astronomy & Astrophysics. – 2023. – Vol. 674. – A1. – <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243940>
- 5 Pang X., Li Y., Yu Z., Tang S.Y., Dinnbier F., Kroupa P., Pasquato M., Kouwenhoven M.B.N. 3D Morphology of Open Clusters in the Solar Neighborhood with Gaia EDR3: Its Relation to Cluster Dynamics // The Astrophysical Journal. – 2021. – Vol. 912, No. 2. – 162. – <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abeaac>
- 6 Kalambay M.T., Otebay A.B., Nazar A.B., Assilkhan A., Shukirgaliyev B.T. NGC 2516 open star cluster: simulations and mock observations // Herald of the Kazakh-British Technical University. – 2025. – Vol. 2, No. 73. – P. 312–321. – <https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-2-312-321>
- 7 Berczik P., Spurzem R., Zhong S., Wang L., Nitadori K., Hamada T., Veles A. Up to 700k GPU cores, Kepler, and the Exascale future for simulations of star clusters around black holes // Supercomputing, ISC 2013 / ed. by J.M. Kunkel, T. Ludwig, H. W. Meuer. – Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7905. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2013. – P. 13–25. – https://doi.org/10.1007/978-3-642-38750-0_2

8 **Pang X., Tang S.Y., Li Y., Yu Z., Wang L., Li J., Li Y., Wang Y., Wang Y., Zhang T., Pasquato M., Kouwenhoven M.B.N.** 3D morphology of open clusters in the solar neighborhood with Gaia EDR3 II: Hierarchical Star Formation Revealed by Spatial and Kinematic Substructures // *The Astrophysical Journal*. – 2022. – Vol. 931, No. 2. – 156. – <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac674e>

9 **Ma B., Pang X., Banerjee S., Ren P., Kouwenhoven M.B.N.** The velocity dispersion profile of nine open clusters in the solar neighborhood // *The Astrophysical Journal*. – 2026. – Vol. 996. – 112. – <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ae1737>

10 **Wright N. J., Jeffries R. D., Whalley M. A.** 3D rotation of the open cluster NGC 2516 // *arXiv preprint arXiv:2603.04687*. – 2026. – (submitted to *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*). – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.04687>

11 **Zhang S.** Evidence against primordial mass segregation in young open clusters: a Bayesian multiscale analysis of 3881 Gaia DR3 clusters // *The Astronomical Journal*. – 2026. – Vol. 171, No. 4. – 236. – <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ae4906>

12 **Bouma L. G., Curtis J. L., Hartman J. D., Winn J. N., Bakos G. A.** Rotation and lithium confirmation of a 500 parsec halo for the open cluster NGC 2516 // *The Astronomical Journal*. – 2021. – Vol. 162, No. 5. – 197. – <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac18cd>

13 **Miyamoto M., Nagai R.** Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 1975. – Vol. 27, No. 4. – P. 533–543. – <https://doi.org/10.1093/pasj/27.4.533>

14 **Shukirgaliyev B., Otebay A., Sobolenko M., Ishchenko M., Borodina O., Panamarev T., Myrzakul S., Kalambay M., Naurzabayeva A., Abdikamalov E., Polyachenko E., Banerjee S., Berczik P., Spurzem R., Just A.** Bound mass of Dehnen models with a centrally peaked star formation efficiency // *Astronomy & Astrophysics*. – 2021. – Vol. 654. – A53. – <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141299>

15 **Ishchenko M., Masliukh V., Hradov M., Berczik P., Shukirgaliyev B., Omarov C.** Dynamical evolution of the open clusters with different star formation efficiencies and orbital parameters // *Astronomy & Astrophysics*. – 2025. – Vol. 694. – A33. – <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452336>

16 **Kamlah A.W.H., Leveque A., Spurzem R., Arca Sedda M., Askar A., Banerjee S., Berczik P., Giersz M., Hurley J., Belloni D., Kühmichel L., Wang L.** Preparing the next gravitational millio N-body simulations: evolution of single and binary stars in NBODY6++GPU, MOCCA and MCLUSTER // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2022. – Vol. 511, No. 3. – P. 4060–4089. – <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3748>

17 **Kroupa P.** On the variation of the initial mass function // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2001. – Vol. 322, No. 2. – P. 231–246. – <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x>

18 **Weis L., West C., Just A., Berczik P., Ishchenko M., Röser S., Schilbach E., Shukirgaliyev B.** Dynamical model of Praesepe and its tidal tails // *Astronomy & Astrophysics*. – 2025. – Vol. 703. – A47. – <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202451650>

19 **Astropy Collaboration, Price-Whelan A.M., Lim P.L., Earl N. [et al.].** The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package // *The Astrophysical Journal*. – 2022. – Vol. 935, No. 2. – 167. – <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac7c74>

20 **Yuan Z., Chang J., Banerjee P. [et al.].** StarGO: A New Method to Identify the Galactic Origins of Halo Stars // *The Astrophysical Journal*. – 2018. – Vol. 863. – 26. – <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacd0d>

21.08.26 ж. баспаға түсті.

03.09.26 ж. түзетулерімен түсті.

14.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*М. Т. Қаламбай¹, А. Ж. Наурзбаева², Т. С. Мухаммединова³,

Н. М. Усенов⁴, Б. Т. Шукиргалиев⁵

^{1,2,3,5}Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,
Республика Казахстан, г. Актөбе;

^{1,5}Астрофизический институт имени В. Г. Фесенкова,
Республика Казахстан, г. Актөбе;

^{2,4}Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 21.08.26.

Поступило с исправлениями 03.09.26.

Принято в печать 14.09.26.

УТОЧНЕНИЕ N-ТЕЛ МОДЕЛИ СКОПЛЕНИЯ NGC 2516 И ЗВЁЗДНЫЕ ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ В НЁМ

Данная работа продолжает численное моделирование рассеянного звёздного скопления NGC 2516, начатое в Kalambay et al. (2025), где кодом phi-GRAPE-GPU были восстановлены орбита скопления и его начальные параметры, однако модель систематически сохраняла больше «наблюдаемых» звёзд, чем

реальное, отобранное по данным Gaia кластер. В настоящей работе построена расширенная сетка моделей (начальное число звёзд 6500–20000, различная эффективность звездообразования, начальный полумассовый радиус 1.5–4.5 пк, несколько случайных seed, и предложена трёхуровневая процедура имитации наблюдательного отбора: (1) фотометрический отбор по массе и звёздной величине; (2) кинематический отбор по собственным движениям; (3) комбинированный отбор, дополнительно учитывающий параллакс. Среди сетки моделей выделены три (начальный полумассовый радиус 3.6, 3.8 и 4.0 пк, seed = 22), финальное число «наблюдаемых» звёзд которых после Метода 3 (2644–2704) практически совпадает с наблюдаемым числом членов NGC 2516 (2690). В каждой из этих моделей за время эволюции формируется три звёздные чёрные дыры, из которых ровно одна остаётся в пределах кинематического эллипса членства к финальному моменту – картина, согласующаяся с выводом Ma, Pang et al. (2026) о вероятном присутствии в NGC 2516 не менее двух динамически связанных чёрных дыр.

Ключевые слова: NGC 2516, рассеянные звёздные скопления, моделирование N-тел, чёрные дыры звёздных масс, отбор членов скопления, собственные движения, параллакс, Gaia.

*M. T. Kalambay¹, A. Zh. Naurzbayeva², T. S. Mukhammedinova³,

N. M. Ussipov⁴, B. T. Shukirgaliyev⁵

^{1,2,3,5}K. Zhubanov Aktobe Regional University,

Republic of Kazakhstan, Aktobe;

^{1,5}Fesenkov Astrophysical Institute,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{2,4}Al-Farabi Kazakh National University,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 21.08.26.

Received in revised form 03.09.26.

Accepted for publication 14.09.26.

REFINING THE N-BODY MODEL OF NGC 2516 AND ITS STELLAR BLACK HOLES

This paper extends the N-body modelling of the open star cluster NGC 2516 begun in Kalambay et al. (2025), who reconstructed the cluster's Galactic orbit and calibrated its initial parameters with the

phi-GRAPE-GPU code, but found that the resulting model retained systematically more “observable” stars than the real, Gaia-selected cluster. Here we compute an expanded grid of models spanning initial star numbers of 6500–20000, several star-formation efficiencies, initial half-mass radii of 1.5–4.5 pc, and multiple random seeds, and introduce a three-tier mock-observation membership selection: (1) a photometric cut on mass and visible magnitude; (2) a kinematic cut on proper motions; (3) a combined cut that adds an analogous robust selection on parallax. Across the grid we identify three models (initial half-mass radius 3.6, 3.8 and 4.0 pc, seed 22) whose final observable star count under Method 3 (2644–2704) closely matches the observed NGC 2516 membership of 2690. Each of these models forms three stellar-mass black holes over its evolution, of which exactly one remains within the kinematic membership ellipse at the final snapshot in every case – a pattern consistent with the recent finding of Ma, Pang et al. (2026) that NGC 2516 likely retains at least two dynamically coupled black holes.

Keywords: NGC 2516, open star clusters, N-body simulations, stellar-mass black holes, cluster membership selection, proper motions, parallax, Gaia.

**А. Б. Кеңесбеков¹, А. К. Сейтханова², *А. Серікбайқызы³,
М. Б. Баяндинова⁴, Л. С. Каурбаева⁵**

^{1,3,4,5}Д. Серікбаев атындағы Шығыс

Қазақстан Техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

²Ө. Марғұлан атындағы Павлодар

Педагогикалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5630-9467>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8610-5492>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7734-9512>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6699-9097>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6091-1071>

*e-mail: ainura.serikbaikyzy@gmail.com

РЕАКТИВТІ МАГНЕТРОНДЫ ШАШЫРАТУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН TiNO ҚАБЫҚШАЛАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІ

TiNO қабықшалары жоғары биоүйлесімділігі, коррозиялық ортаға тұрақтылығы және жеткілікті механикалық сипаттамалары арқасында жүрек-қан тамырлары стенттері мен өзге де медициналық имплантаттардың беттерін түрлендіруге арналған перспективалы материалдардың қатарына жатады. Зерттеудің негізгі мақсаты – реактивті магнетронды шашырату жағдайында алынған TiNO қабықшаларының құрылымдық, морфологиялық және механикалық сипаттамаларына субстратқа берілетін теріс ығысу кернеуінің ықпалын жан-жақты бағалау. Қабықшалар AISI 316L тот баспайтын болаттан жасалған негіздерге $Ar:N_2:O_2$ газ ортасында 99,99 % тазалықтағы титан нысанасын қолдана отырып, 0-ден –150 В-қа дейінгі теріс ығысу кернеулерінде тұндырылды. Жұмыс барысында тұндыру жылдамдығы, фазалық құрамы, микроқұрылымы, қаттылығы, адгезиялық беріктігі және беттің суланғыштығы зерттелді. XRD нәтижелері теріс ығысу кернеуінің жоғарылауымен TiN фазасының алдымен TiNO оксинитридін, одан кейін TiO_2 анатаза және рутил фазаларына ауысатынын көрсетті. Бұл құбылыс иондық

бомбалау энергиясының қабықшаның кристалдық құрылымы мен фазалық құрамын қалыптастырудағы шешуші әсерін көрсетеді. Қаттылықтың ең жоғары мәні 430 HV, ал адгезиялық беріктіктің критикалық жүктемесі 20–25 Н болып, –50 В режимінде алынған үлгіде тіркелді. Жанасу бұрышының нәтижелері зерттелген барлық қабықшалардың гидрофильді екенін көрсетті. Бұл олардың жасушалардың бетке бекінуіне қолайлы болуы және биомедициналық бағыттағы қолдану мүмкіндігін көрсетеді. Алынған деректер TiNO қабықшаларының қасиеттерін технологиялық параметрлер арқылы реттеу медициналық имплантаттардың пайдалану сенімділігі мен қызмет ету мерзімін арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Кілтті сөздер: TiNO қабықшасы, реактивті магнетронды шашырату, ығысу кернеуі, фазалық құрам, қаттылық.

Кіріспе

Жүрек-қан тамырлары аурулары (ЖҚА) әлемде мезгілсіз өлім мен мүгедектікке әкелетін негізгі себептердің бірі болып табылады [1]. Бұл аурулардың дамуында атеросклероз маңызды орын алады: ол тамыр эндотелийінің зақымдануына және кейіннен тамыр санылауының тарылуына немесе бітелуіне әкеледі [2; 3]. Қазіргі кезде ЖҚА емдеуде дәрілік тәсілдермен қатар қан ағымын қалпына келтіруге және асқынулардың алдын алуға бағытталған тамырішілік құрылғылар, соның ішінде стенттер кеңінен қолданылады. Алғашқы металл стенттер клиникалық тәжірибеге енгізілгеннен кейін олардың биоүйлесімділігін арттыру және стент ішіндегі рестеноз қаупін төмендету мақсатында әртүрлі қорғаныш жабындарын әзірлеуге ерекше назар аударылды [4]. TiNO қабықшаларын имплантат бетіне қалыптастыру үшін термиялық буландыру, доғалық бүрку, магнетронды шашырату, сондай-ақ золь-гель тәрізді химиялық әдістерді қоса алғанда, бірнеше технология қолданылады [5]. Осылардың ішінде магнетронды шашырату басқарылуының ыңғайлылығы мен технологиялық мүмкіндіктеріне байланысты кең тараған әдістердің бірі саналады. Қазіргі уақытта қолданылатын жабынды стенттердің арасында титан оксинитридпен қапталған 316L типті тот баспайтын болаттан жасалған құрылымдар перспективалы клиникалық нәтижелер көрсетуде [6; 7]. Бұған дейінгі зерттеулерде [8; 9] рутилдік құрылымды жүқа TiO_2 қабықшаларының стенттердің бетін модификациялау үшін тиімді екені көрсетілген. Мұндай қабаттар имплантаттан улы металл иондарының бөлінуін шектеуге және бетке фибриногеннің адсорбциялануын азайтуға ықпал етеді. Соңғы жылдары TiO_2 қабықшаларының биоактивтілігін арттыруға арналған зерттеулер көбейіп, олардың қасиеттерін басқару үшін әртүрлі қоспалар

енгізілуде. Солардың ішінде азот ерекше қызығушылық тудырады, өйткені ол қабықшада NOx түріндегі қосылыстардың қалыптасуына жағдай жасап, тромбоциттердің агрегациясын төмендету, тамыр саңылауының кенеюін реттеу және тегіс бұлшықет жасушаларының көбеюін тежеу сияқты физиологиялық процестерге әсер етуі мүмкін [10; 11]. Осы тұрғыдан алғанда титан оксинитридi стент беттерін модификациялауға арналған перспективалы материалдардың бірі болып табылады. TiNO қабықшаларының химиялық тұрақтылығы, төмен цитоуыттылығы және тромб түзілуін шектеу мүмкіндігі олардың клиникалық сипаттамаларын жақсартуға мүмкіндік береді [12; 13]. Сонымен бірге мұндай қабаттардың фибриноген адсорбциясы мен тромбоциттер агрегациясын төмендететіні, сондай-ақ Ni, Cr және Mo иондарының негізден ортаға өтуін тежейтіні анықталған [14].

Кристалды TiNO қабықшаларын термиялық өңдеусіз қалыптастыру үшін импульсті реактивті магнетронды шашырату технологиясы әзірленіп, қазіргі уақытта жетілдіріліп келеді. Бұл тәсіл қабықша өсуін дәл басқаруға, субстраттың шамадан тыс қызуын және қабаттың ластану қаупін азайтуға, сондай-ақ үлкен өлшемді негіздерде біркелкі жабын алуға мүмкіндік береді [15]. Шашырату барысында разряд қуаты, газ қысымы, ток тығыздығы, субстраттың ығысу кернеуі (теріс ығысу потенциалы) және субстрат температурасы сияқты параметрлерді өзгерту плазманың температурасы мен электрондар концентрациясын реттеуге жағдай жасайды. Соның нәтижесінде қабықшаның тұну механизмі мен қалыптасатын құрылымдық ерекшеліктері өзгереді [16].

Әдеби деректер реактивті импульсті магнетронды шашыратуды қажетті қасиеттері бар TiNO қабықшаларын қалыптастырудың тиімді тәсілдерінің бірі ретінде қарастырады [17]. Газ ортасының құрамы, разряд қуаты және субстраттың ығысу кернеуі сияқты технологиялық факторларды басқару O_x/N_y арақатынасы әртүрлі қабаттарды алуға мүмкіндік береді. Бұл параметрлер, өз кезегінде, қабықшалардың морфологиясына, механикалық қасиеттеріне, бет топографиясына және биологиялық сипаттамаларына әсер етеді. Қабаттағы азот мөлшерінің артуы оның тромбогендік қасиеттерінің төмендеуіне ықпал етуі мүмкін. Бірқатар жұмыстарда TiNO жүйелерін алу кезінде субстраттың ығысу кернеуінің басқа тұндыру параметрлерімен өзара әсері қарастырылған [18], бұл жүрек-қан тамырлары имплантаттары үшін маңызды фактор болып табылады.

TiNO қабықшалары биомедициналық және стенттік қолдану бағытында бұрыннан зерттеліп келе жатқанымен, көптеген жарияланымдар негізінен жалпы тұндыру жағдайларын немесе дайын беттердің сипаттамаларын қарастырумен шектеледі. Ал реактивті магнетронды шашырату кезінде субстраттың ығысу кернеуі, қабықша құрылымы және фазалық өзгерістер

арасындағы өзара байланысты жүйелі түрде сипаттайтын зерттеулер әлі де жеткіліксіз. Осыған байланысты бұл жұмыста аталған параметрлердің өзара ықпалын анықтау және TiNO қабықшаларын биомедициналық мақсатта оңтайландыру мәселесіне назар аударылады. Сонымен қатар алынған қабаттардың биологиялық сипаттамаларын технологиялық режимдермен байланыстыратын құрылымдық критерийлер де толық зерттелмеген.

Тұндыру жағдайларын мақсатты түрде өзгерту коррозияға төзімділігі мен биологиялық тұрақтылығы жоғары TiNO қабықшаларын қалыптастыруға мүмкіндік беруі ықтимал [19; 20]. Осы факторлардың ішінде теріс ығысу кернеуі айрықша мәнге ие, себебі ол бетке келетін иондардың энергиясын өзгертіп, қабықшаның өсу кинетикасына және кристалдық реттелуіне әсер етеді. Сондықтан осы зерттеудің мақсаты – қолданылған технологиялық жағдайлар аясында TiNO қабықшаларының микроқұрылымы, морфологиясы және фазалық құрамы арасындағы өзара байланысты анықтау.

Материалдар мен әдістері

Магнетронды шашырату параметрлері

TiNO жұқа қабықшалары жоғары тазалықтағы титан нысанасын (99,99 %) пайдаланып, аргон, азот және оттегіден тұратын Ar:N₂:O₂ қоспасында реактивті магнетронды шашырату әдісімен алынды. Қабықша құрамына және құрылымына газ ағындары мен субстраттың ығысу кернеуінің бірлескен әсерін бағалау үшін аталған параметрлер әртүрлі режимдерде өзгертілді. Негіз материалы ретінде механикалық беріктігі мен коррозияға төзімділігі жоғары AISI 316L тот баспайтын болаты таңдалды. Үлгілердің өлшемі 40 мм × 40 мм × 3 мм болды. Атап өткен жөн, 1-кестеде көрсетілгендей, субстраттың ығысу кернеуімен қатар газ қоспасының шығыны (Ar, N₂, O₂) және тұндыру уақыты да үлгілер арасында өзгертілген, сондықтан алынған нәтижелердегі айырмашылықтарды тек ығысу кернеуінің ғана емес, зерттелген технологиялық режимдердің кешенді әсері ретінде қарастырған жөн.

Тұндыру басталғанға дейін вакуумдық камера 0,2 Па базалық қысымға дейін сорылды. Бұл жағдай қабықшаның тұнуы кезінде сыртқы ластануды және оның қарқынды тотығуын шектеуге мүмкіндік берді. TiNO қабықшалары субстратқа теріс ығысу берілген жағдайда магнетронды шашырату арқылы тұндырылды. Иондық тазалау кезеңінде аргонның шығыны 15 ссм деңгейінде ұсталып, камерадағы жұмыс қысымы 0,2 Па болды. Тазалау 2,5 кВ кернеу және 50–80 мА ток аралығында 20 минут бойы жүргізілді. Негізгі магнетронды шашырату режимдері 1-кестеде келтірілген. 1-кестеде көрсетілген кернеу (U) және ток (I) мәндері бойынша есептелген разряд қуаты барлық режимдер үшін шамамен 900–1010 Вт аралығында болды; ток тұрақты (2 А) деңгейде сақталғандықтан, қуаттың шамалы

өзгерісі негізінен кернеудің ауытқуымен байланысты болды және жеке басқарылатын параметр ретінде қарастырылмады.

1 кесте – TiNO қабықшаларын түндыру кезіндегі магнетронды шашырату параметрлері

Параметрлер	№1_TiNO	№2_TiNO	№3_TiNO	№4_TiNO
Газ қоспасының шығыны (Ar:N ₂ :O ₂), sccm	Ar: 25 N ₂ : 3 O ₂ : 1,5	Ar: 33, N ₂ : 10 O ₂ : 6	Ar: 25 N ₂ : 3 O ₂ : 3	Ar: 26, N ₂ : 10 O ₂ : 6
Газдардың N:O арақатынасы	2	1.6	1	1.6
Субстраттың ығысуы, V	0	-50	-100	-150
Жұмыс қысымы, Pa	0.8–1.0			
Түндыру уақыты, мин	45	180	45	180
Кернеу U:	450–460 В	480–505 В	465–480 В	460–480 В
Ток күші I, A:	2 А			
Нысана материалы	Ti, 99.99%			
Субстрат температурасы, °C	100			
Нысана–субстрат арақашықтығы, мм	30			

Қабаттардың беткі микроқұрылымы мен морфологиясы Vega4 (Tescan, TESCAN VEGA 3 LMH, Брно, Чехия) сканерлеуші электрондық микроскопы (SEM) көмегімен зерттелді. Құрылғыда катод ретінде вольфрам жібі қолданылды. Қабықшалардың элементтік құрамын анықтау үшін Xplore 30 энергия-дисперсиялық рентгендік талдау детекторы (Oxford Instruments plc, Abingdon, Ұлыбритания) пайдаланылды.

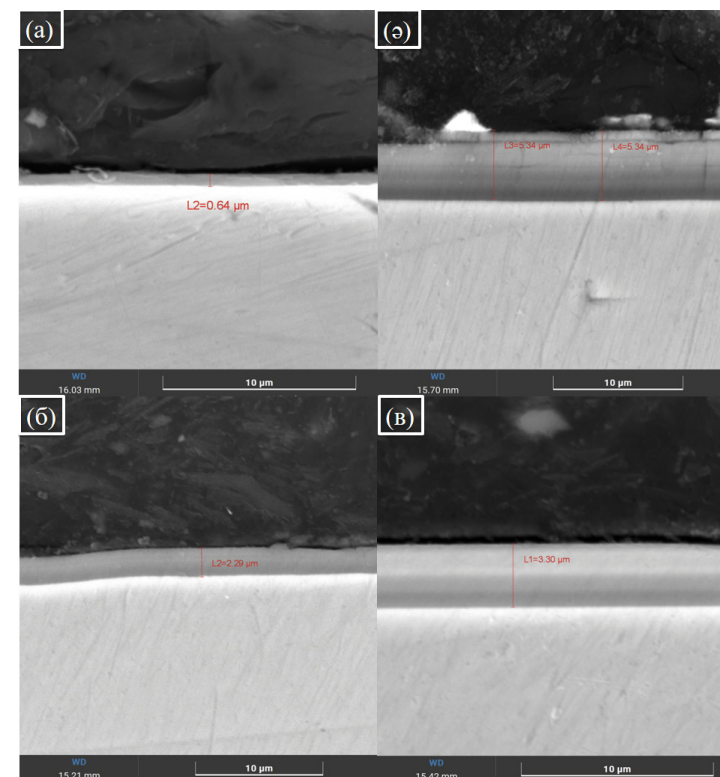
Фазалық құрамды анықтау X'Pert Pro рентгендік дифрактометрінде (Panalytical, Амстердам, Нидерланды) Cu-K α сәулеленуімен жүргізілді. Өлшеу 40 кВ кернеу және 30 мА ток кезінде орындалды. Сканерлеу аралығы $20^\circ < 2\theta < 100^\circ$, қадам мөлшері 0,02°, ал бір нүктеге экспозиция уақыты 1 с болды.

Қаттылық DIN EN ISO 14577-1 талаптарына сәйкес FISCHER-SCOPE HM2000 жүйесінде анықталды. Индентор ретінде төбелік бұрышы 136° болатын төрт қырлы Виккерс алмаз пирамидасы қолданылды. Өлшеу кезінде 2 мН жүктеме беріліп, жүктеу уақыты 10 с, ал жүктемені ұстау уақыты 5 с болды. Осы режимдерде индентордың ену тереңдігі 0,14–0,17 мкм аралығында сақталды. Бұл көрсеткіш зерттелген қабықшалардың 0,64–5,34 мкм

қалыңдығының 10 %-ынан төмен болды; ең жұқа үлгілер үшін ғана 18–23 % мәндер тіркелді. Демек, наноиндентация нәтижелеріне негіз материалының ықпалы шамалы деп қабылданды, бұл «10 % ережесіне» сәйкес келеді.

Нәтижелер және талқылау

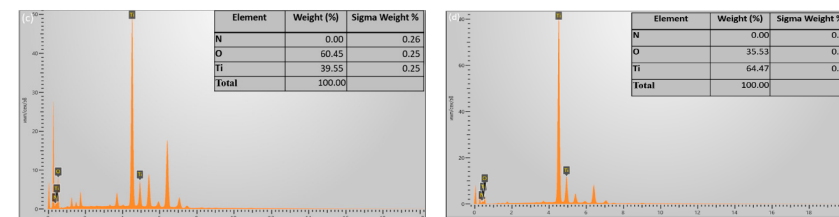
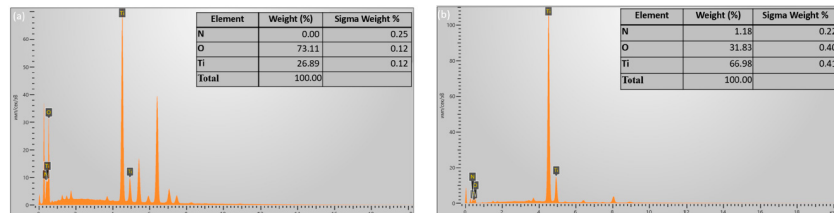
SEM арқылы жүргізілген морфологиялық зерттеу нәтижелері 1-суретте көрсетілгендей, алынған қабықшалардың негізінен тығыз әрі біртекті құрылым түзетінін, қабаттану сызықтарының байқалатынын және деламинация белгілерінің жоқ екенін көрсетті. Субстраттың теріс ығысуын зерттеу оның өсіп келе жатқан қабатқа енетін иондардың энергиясын тікелей өзгертуімен байланысты тандалды. Осы параметр жабынның тығыздығына, кеуектілігіне, кристалдық құрылымына және ішкі кернеулеріне әсер етеді.



1 сурет – Субстраттың әртүрлі теріс ығысу кернеулерінде алынған TiOxNy қабықшаларының көлденең қималары:
(а) – №1_TiNO; (а) – №2_TiNO; (б) – №3_TiNO;
(в) – №4_TiNO) – SEM кескіндері.

Өртүрлі субстрат ығысу кернеулерінде қалыптастырылған TiNO қабықшаларының көлденең қималарына түсірілген SEM кескіндері (1 а–в сурет) реактивті магнетронды шашыратуға тән тығыз бағаналы морфологияның қалыптасқанын көрсетеді. Теріс ығысу мәні жоғарылаған кезде қабаттың тығыздығы артып, құрылымы біркелкілене түседі. Бұл бетке түсетін иондардың әсерінен атомдардың қозғалғыштығы мен қабаттың тығыздалуы күшейетінін білдіреді. –50 В және –100 В кезінде алынған үлгілер 0 В режиміндегі қабықшамен салыстырғанда жұқалау әрі тығыз орналасқан бағаналы құрылыммен сипатталады. Ал –150 В кезінде құрылымның ішінара бұрмалануы байқалады, оны шамадан тыс иондық бомбалау және қайта шашырау процестерімен байланыстыруға болады. Жалпы морфологиялық өзгерістер теріс ығысу кернеуінің артуы қабаттың тығыздалуына және бағаналы құрылымның жетілуіне әсер ететінін көрсетеді, бұл TiNO және TiO₂ жүйелеріне қатысты бұрынғы нәтижелермен сәйкес келеді.

EDS нәтижелері қабықша құрамының оттегі мөлшері жоғары матрицадан титан оксиді басым қабатқа қарай өзгеретінін көрсетті. (а) үлгісінде Ti мөлшері 26,89 % болса, О мөлшері 73,11 % (масс.%) құрады; бұл нөлдік ығысу кезінде қалыптасқан оксидтік күйге сәйкес келеді, ал азот анықталмады. –50 В теріс ығысу және ұзағырақ тұндыру кезінде (ә) үлгісінде қалыңдығы мен біркелкілігі жоғары қабат түзілді, оның құрамы Ti – 66,98 %, О – 31,83 % және N – 1,18 % болып, TiNO оксинитридін тән сипат көрсетті. (б) үлгісінде Ti және О мөлшері (масс.%) тиісінше 39,55 % және 60,45 % болды, бұл жоғары ығысу жағдайында оттегі үлесінің өзгеруімен байланысты болуы мүмкін. (в) үлгісі ең біркелкі қабатпен сипатталды; оның құрамы Ti – 64,47 % және О – 35,53 % болып, стехиометриялық TiO₂ түзілуіне жақын. Жоғары ығысу жағдайында азоттың анықталмауы қарқынды иондық бомбалау кезінде оның қайта шашырауға бейімділігімен түсіндіріледі. Сонымен қатар EDS әдісінің азот пен оттегі сияқты жеңіл элементтерді сандық анықтаудағы шектеулерін ескеру қажет: қабықшада азоттың анықталмауы оның толық болмауын әрдайым білдірмейді, себебі оның концентрациясы әдістің анықтау шегінен төмен болуы мүмкін.



2 сурет – TiNO қабықшаларының химиялық құрамын ЭҚК әдісімен талдау нәтижелері: (а) – №1_TiNO; (б) – №2_TiNO; (с) – №3_TiNO; (д) – №4_TiNO және сандық элементтік талдау.

Теріс ығысу кернеуі артқан сайын қабықшаның элементтік құрамының өзгеруі иондық бомбалаудың күшеюімен және реактивті газ ортасының құрамымен байланысты. Ығысу кернеуінің жоғарылауы Ar⁺, N₂⁺ және O₂⁺ иондарының энергиясын арттырып, қабаттың тығыздалуына ықпал етеді. Сонымен қатар мұндай жағдайда азот атомдарының бір бөлігінің қайта шашырауы мүмкін.

Тәжірибелік нәтижелер 0-ден –50 В-қа дейінгі ығысу кернеуін арттыру қабаттың тығыздалуына және, тұндыру уақыты ұзарған жағдайда, оның қалыңдығының өсуіне жағдай жасайтынын көрсетті. Ал кернеуді –100 және –150 В-қа дейін одан әрі арттыру құрылымның біртектілігін төмендетуі мүмкін; бұл кезде көміртектің енгізілуі және оттегінің шамадан тыс қайта шашырауы ықтималдығы да артады. Ығысу кернеуі жоғары болғанда қабықша қалыңдығының азаюы тұндыру мен қайта шашырату процестерінің арасындағы бәсекелестікпен түсіндірілуі мүмкін.

TiNO қабықшаларының тұндыру жылдамдығы қабат қалыңдығының жалпы тұндыру уақытына қатынасы бойынша есептеліп, нм/мин бірлігінде берілді. №1_TiNO, №2_TiNO, №3_TiNO және №4_TiNO үлгілері үшін алынған мәндер тиісінше 14,2; 30,7; 17,3 және 18,3 нм/мин болды.

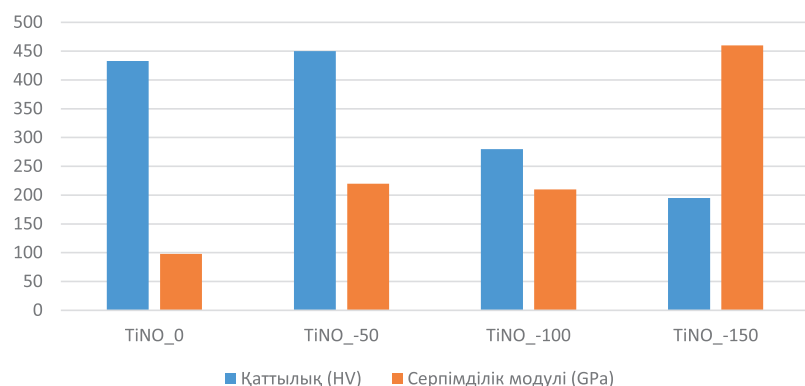
Үлгі	Тұндыру жылдамдығы, нм/мин	Тұндыру уақыты, мин	Есептелген қалыңдық, мкм
№1_TiNO (0 В)	14,2	45	≈ 0,64
№2_TiNO (–50 В)	30,7	180	≈ 5,53
№3_TiNO (–100 В)	17,3	45	≈ 0,78
№4_TiNO (–150 В)	18,3	180	≈ 3,29

Кесте Б – Қабықшалардың тұндыру жылдамдығы мен тұндыру уақыты негізінде есептелген қалыңдықтары (тұндыру жылдамдығы $\times$ уақыт). Нақты өлшенген қалыңдық мәндерімен салыстыру ұсынылады.

Тұндыру жылдамдығы -50 В-қа дейінгі ығысу кезінде өсті. Бұл иондық бомбалаудың күшеюі атомдардың қозғалғыштығын арттырып, қабықшаның өсуін жеделдеткенін көрсетеді. Керісінше, -100 және -150 В кезінде тұндыру жылдамдығы төмендеді. Мұндай өзгеріс қайта шашырау әсерінің күшеюімен байланысты: жоғары энергиялы иондар тұндырылған материалдың белгілі бір бөлігін қабат бетінен шығарып тастайды.

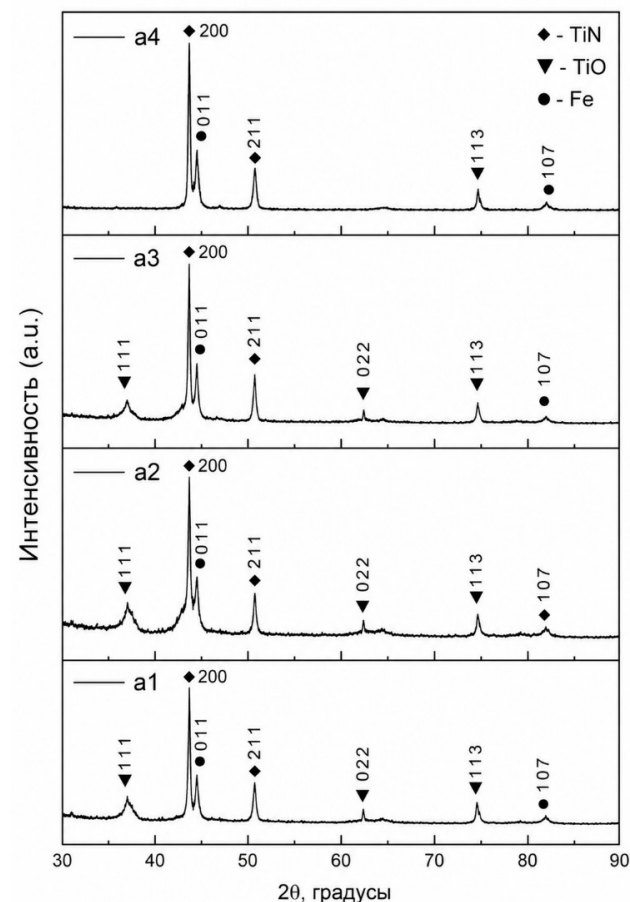
3-суретте TiNO қабықшаларының қаттылығы субстраттың теріс ығысу кернеуіне байланысты қарастырылған, оның мәні 0-ден -150 В-қа дейін өзгерді. Ең жоғары қаттылық 0 және -50 В режимдерінде байқалып, $420\text{--}430$ HV деңгейіне жетті. Ығысу кернеуін әрі қарай арттырғанда қаттылық төмендеді: -100 В кезінде 290 HV, ал -150 В кезінде 220 HV болды. Жоғары теріс ығысу жағдайындағы бұл төмендеу қалдық кернеулердің және құрылымдық ақаулардың көбеюімен, сондай-ақ қабаттың аморфтануы немесе кристаллиттік текстураның бұзылуымен байланысты болуы мүмкін.

Наноиндентация кезінде индентордың ену тереңдігін үздіксіз тіркеу арқылы қабықшаның наноқаттылығы мен Янг модулін анықтауға болады. 3-суретте реактивті магнетронды шашырату арқылы алынған титан оксинитридті үлгілерінің жүктеме-ену тереңдігі тәуелділіктері берілген.



3 сурет – Қаттылық және серпімділік модулі.

4-суретте субстратқа берілген ығысу кернеуінің әртүрлі мәндерінде тұндырылған қабықшалардың рентгендік дифракция нәтижелері келтірілген.



4 сурет – TiNO қабықшаларының дифрактограммалары.

4-суретте субстраттың теріс ығысу кернеуі 0 В (a1), -50 В (a2), -100 В (a3) және -150 В (a4) болған кезде алынған TiNO қабықшаларының рентгендік дифрактограммалары көрсетілген. Фазаларды сәйкестендіру JCPDS анықтамалық карталары бойынша жүргізілді: TiN (38-1420), TiO (23-1078), TiO₂ анатазы (21-1272) және TiO₂ рутил (21-1276). AISI 316L (Fe) негізіне тиесілі рефлекстер де белгіленген. a1 (0 В) үлгісінің спектрінде 37° , 43° , 63° , 75° және 82° аймақтарындағы рефлекстер байқалады; олар NaCl типті кубтық TiN фазасының сәйкесінше (111), (200), (220), (311) және (222) жазықтықтарына жатады. (111) рефлексінің басым болуы орташа иондық

энергия жағдайында алынған нитридтік қабаттарға төн басым өсу бағытын көрсетеді. Fe шындарының тіркелуі қалыңдығы 1 мкм-ден аз қабықша арқылы металл негізден сигналдың өтуімен түсіндіріледі. Атап өтетін жайт, 0 В режиміндегі (а) үлгісінде EDS әдісі бойынша азот анықталмағанымен, XRD нәтижесінде TiN фазасының сипатты рефлекстері байқалады; бұл алшақтық EDS әдісінің жеңіл элементтерге сезімталдығының шектеулі болуымен, сондай-ақ TiN фазасының кейбір шындарының AISI 316L негізінің (Fe) рефлекстерімен ішінара қабаттасу мүмкіндігімен түсіндірілуі мүмкін. Ығысу кернеуі -50 В-қа (а2) жеткізілгенде TiN (111) шыңының интенсивтілігі төмендеп, $2\theta = 43^\circ$ маңында TiO (011) сигналымен қатар TiN (200) жазықтығына сәйкес келетін жаңа рефлекс пайда болады. Бұл иондық бомбалаудың күшеюі жағдайында TiN фазасының оксинитридтік күйге ауысуы басталғанын көрсетеді.

а2 жағдайындағы бұл екі фазалы құрылым жоғары тығыздықты және ұсақ түйіршікті қабаттың қалыптасуына ықпал етіп, ең жоғары қаттылық мәнімен (430 HV) сәйкес келеді. Осы режимде иондардың энергиясы артқандықтан, беткі қабатта О және N элементтерінің диффузиялық араласуы күшейіп, тұрақты TiNO матрицасының түзілуіне жағдай жасалады. а3 үлгісінде (-100 В) TiN рефлекстері әлсіреп, TiO фазасының (111), (113) және (022) шындары пайда болады. Бұл қабықшаның әрі қарай тотығуын және азот мөлшерінің төмендеуін білдіреді, мұны EDS нәтижелеріндегі шамамен 1 масс.% N мәні де растайды. Сонымен бірге шындардың тарылып, интенсивтілігінің артуы кристаллиттердің іріленуін және кристалдық реттелудің жоғарылауын көрсетеді. TiN-нен TiO және TiO₂ анатазасына қарай жүретін фазалық өзгеріс құрылымдық ақаулардың азаюымен және адгезиялық беріктіктің жоғарылауымен қатар жүреді. Ең жоғары -150 В ығысу кезінде (а4) азот анықталмады. Дифрактограммада TiO (111) және (211) рефлекстері басым болып, TiO₂ анатазасының (101) және рутилдің (110) шындары пайда болды. Бұл нитридтік фазаның оксидтік фазамен іс жүзінде алмасқанын және көпкомпонентті TiO₂ құрылымының қалыптасқанын көрсетеді. TiO₂ шындарының тарылуы кристаллиттердің өсуін және кристалдану дәрежесінің жоғарылағанын білдіреді. Осылайша, теріс ығысу кернеуінің артуымен құрылымдық эволюция кубтық TiN фазасынан TiON оксинитридіне, одан әрі TiO₂-нің анатаза/рутил фазаларына қарай жүреді. Фазалық өзгерістер плазмадағы О/N қатынасының өзгеруімен және бетке түсетін иондар энергиясының жоғарылауымен түсіндіріледі. Текстураның (111) TiN-нен аралас (111)/(200) TiOx құрылымына, одан әрі (101)/(110) TiO₂ фазаларына ауысуы TiNO қабықшаларының құрылымы мен қасиеттерін технологиялық жолмен басқаруға мүмкіндік береді. XRD нәтижелері бақыланатын иондық бомбалау энергиясы қабықшалардың кристалдану

дәрежесін, құрылымын және механикалық сипаттамаларын анықтайтын негізгі факторлардың бірі екенін көрсетеді.

Беттің суланғыштығын бағалау үшін тазартылған су мен этанол қолданылып, жанасу бұрышы өлшенді. Өлшеу бөлме температурасында SDA-100 оптикалық жанасу бұрышы өлшегішінде статикалық «ілулі тамшы» әдісімен жүргізілді. 316L қорытпасының бастапқы және модификацияланған беттеріне 5 мкл қос дистилденген су немесе этанол тамызып, сұйықтық тамшысы мен қатты бет арасындағы жанасу бұрышы тіркелді.

316L тот баспайтын болаты үлгілерінің өлшенген жанасу бұрышы $50,6^\circ$ – $75,2^\circ$ аралығында болды.

Жанасу бұрышының аздап төмендеуі тамшының бетке жабысып таралуымен байланысты байқалды. TiNO_0 үлгісінде жанасу бұрышы салыстырмалы түрде жоғары болды, яғни оның суланғыштығы басқа қабықшаларға қарағанда төменірек. Ал TiNO_50 үлгісінде бұрыштың айқын азаюы бет гидрофильділігінің артқанын көрсетті. Мұндай өзгеріс жабынның кедір-бұдырлығының жоғарылауымен және сұйықтық тамшысының бетпен адгезиялық әрекеттесуінің күшеюімен түсіндірілуі мүмкін.

Жанасу бұрышын анықтау барысында инеден бөлінген тамшы қатты бетке тигеннен кейін қатты–сұйық шекарасында белгілі бір энергетикалық тосқауыл қалыптасады. Беттегі кедір-бұдырлық тамшының таралуына әсер етіп, оның ішінде ауа қалталарының сақталуына жағдай жасайды; бұл капиллярлық әсердің пайда болуына ықпал етеді. Нәтижесінде бет гидрофильді сипатқа ие болады. Әдеби мәліметтер бойынша мұндай суланғыштықтың жоғарылауы жасушалардың өсуі мен дифференциациясы үшін қолайлы болуы мүмкін.

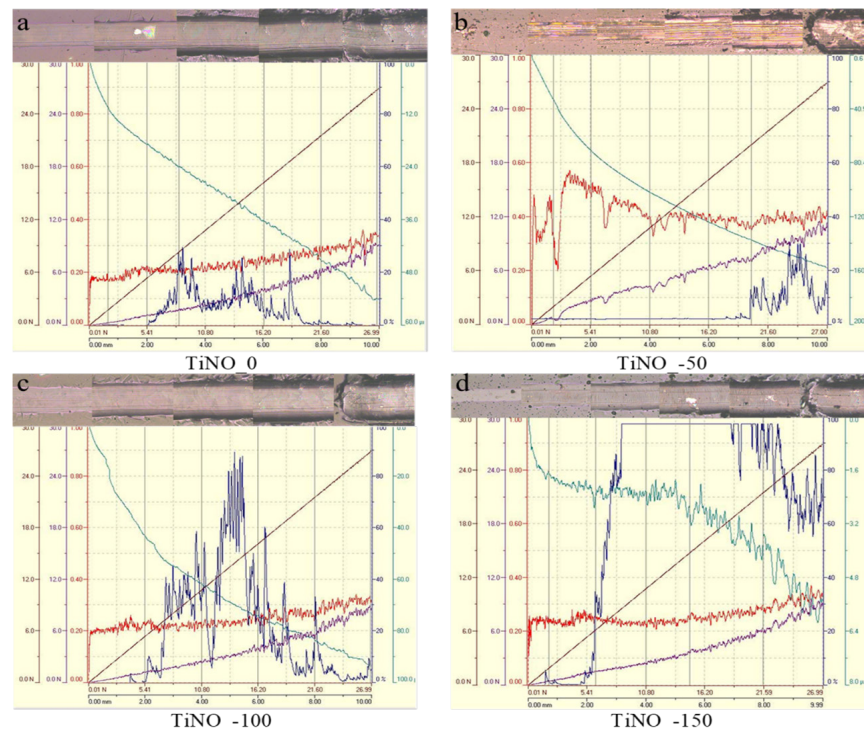
Барлық өлшенген үлгілер үшін жанасу бұрышы 90° -тан төмен болды, бұл олардың гидрофильді бетке жататынын көрсетеді. Демек, зерттелген TiNO қабықшаларының барлығы $\theta < 90^\circ$ шартын қанағаттандырып, гидрофильді қасиет көрсетті. Мұндай бет қасиеті жасушалардың бастапқы адгезиясына қолайлы жағдай жасап, материалдың биоүйлесімділігін арттыруға ықпал етуі мүмкін.

AISI 316L болат негізіне реактивті магнетронды шашырату арқылы алынған TiNO қабықшаларының адгезиялық беріктігін бағалау үшін жүктемесі біртіндеп өсетін сызат сынағы орындалды. Сынақ Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 аспабында радиусы 100 мкм болатын Rockwell C алмаз инденторын пайдалану арқылы жүргізілді.

Сынақ барысында жүктеме 0,01 Н-нан 30 Н-ға дейін 29,6 Н/мин жылдамдықпен арттырылды; сызаттың ұзындығы 10 мм, ал қозғалыс жылдамдығы 6,93 мм/мин болды. Өлшеу кезінде F_n – қалыпты жүктеме, F_t – үйкеліс күші, ϕ – үйкеліс коэффициенті, Pd – ену тереңдігі және AE –

акустикалық эмиссия параметрлері тіркелді. Критикалық жүктемелер үш кезең бойынша белгіленді: Lc1 – алғашқы жарықшақтың пайда болуы, Lc2 – жабынның деляминациясының басталуы және Lc3 – беттегі пластикалық абразияның басталуы. Сынақ аяқталғаннан кейін бұзылу белгілерінің пайда болған аймақтарын анықтау үшін сызат ізінің беті оптикалық әдіспен зерттелді.

Сызат сынағының нәтижелері (5-сурет) TiNO қабықшаларының адгезиялық беріктігі субстраттың теріс ығысу кернеуіне және тұндыру уақытына едәуір тәуелді екенін көрсетті.



5 сурет – AISI 316L болатына тұндырылған TiNO қабықшаларының әртүрлі теріс субстрат ығысу кернеулеріндегі сызат сынағы нәтижелері:
(а) 0 В, (ә) –50 В, (б) –100 В және (в) –150 В

Үлгі (ығысу кернеуі)	Lc1, Н (алғашқы жарықшақ)	Lc2, Н (деляминация басталуы)	Lc3, Н (пластикалық абразия)
TiNO-0 (0 В)	22	25	27
TiNO-50 (-50 В)	5–7	20	27
TiNO-100 (-100 В)	10–12	18–20	25–26
TiNO-150 (-150 В)	10	15	20

Кесте А – Сызат сынағының критикалық жүктемелері (мәтіндегі деректер бойынша жинақталған).

TiNO-0 (0 В) қабықшасында алғашқы жарықшақ Lc1 = 22 Н кезінде байқалды, деляминация Lc2 = 25 Н-де басталып, пластикалық абразия Lc3 = 27 Н-де тіркелді. Бұл үлгі салыстырмалы түрде тұрақты трибологиялық мінез-құлық және төмен акустикалық эмиссия көрсетті, яғни қабат пен негіз арасындағы адгезияның жоғары екенін білдіреді. –50 В ығысу жағдайында (5 ә-сурет) алғашқы микрожарықшақтар 5–7 Н аралығында пайда болғанымен, қабаттың деляминациясы Lc2 = 20 Н кезінде ғана басталды, ал абразия Lc3 = 27 Н-де байқалды. Яғни бастапқы ақаулар ерте пайда болғанымен, жабын жалпы адгезиялық тұрақтылығын сақтады. TiNO-100 үлгісінде (5б-сурет) алғашқы жарықшақтың критикалық жүктемесі Lc1 = 10–12 Н-ге дейін төмендеп, деляминация 18–20 Н-де, ал пластикалық абразия 25–26 Н-де орын алды. Бұл үлгіде акустикалық эмиссияның көптеген шындары мен ену тереңдігінің тұрақсыз өзгерістері тіркеліп, ақаулы аймақтардың бар екенін көрсетті. Ең төмен адгезиялық көрсеткіштер TiNO-150 қабықшасында байқалды (5в-сурет): алғашқы жарықшақ Lc1 = 10 Н кезінде, деляминация Lc2 = 15 Н-де, ал пластикалық абразия Lc3 = 20 Н-де басталды. Бұзылудың ерте басталуы АЕ сигналдарының қарқынды импульстерімен қатар жүріп, адгезиялық беріктіктің айтарлықтай төмендегенін көрсетті.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды. (Грант № BR24992862)

Қорытынды

Зерттеу барысында реактивті магнетронды шашыратудың технологиялық параметрлері, соның ішінде газ ағындарының қатынасы, тұндыру уақыты және субстраттың теріс ығысу кернеуі, AISI 316L болатына қалыптастырылған TiNO қабықшаларының құрылымына, фазалық құрамына және адгезиялық қасиеттеріне қалай әсер ететіні эксперименттік тұрғыдан бағаланды.

Алынған нәтижелер TiNO қабықшаларының құрылымдық, механикалық және беткі сипаттамалары арасында өзара байланыс бар екенін көрсетті, бұл олардың биомедициналық қолдану мүмкіндіктеріне әсер етеді. Оксидтік және оксинитридтік фазалардың түзілуі химиялық тұрақтылық пен коррозияға төзімділікті арттыруға жағдай жасайды. Бұл қасиет физиологиялық ортада 316L негізінен металл иондарының бөлінуін шектеу тұрғысынан маңызды.

Механикалық сынақ нәтижелері –50 В ығысу жағдайында алынған қабықшалардың қаттылық (430 HV) пен адгезиялық беріктіктің ($L_c2 = 20\text{--}25$ Н) үйлесімі бойынша ең қолайлы сипаттамалардың бірін көрсеткенін дәлелдеді. Мұндай қасиеттер стентті орналастыру кезінде туындайтын динамикалық жүктемелер әсерінен пластикалық деформацияға және қабаттың ажырауына төзімділік үшін маңызды.

Жанасу бұрышының нәтижелері зерттелген TiNO қабықшаларының барлығында гидрофилді бет қалыптасқанын көрсетті ($\theta < 90^\circ$). Бұл сипаттаманы жасушалардың бастапқы адгезиясы мен пролиферациясына қолайлы бет жағдайымен байланыстыруға болады, сондай-ақ тромбоциттердің агрегациясын төмендетуге ықпал етуі мүмкін. Дегенмен бұл жұмыста жасуша адгезиясы, пролиферациясы, цитоуыттылық және тромбоциттер агрегациясы тікелей эксперименттік түрде зерттелмегендіктен, биоүйлесімділік туралы жоғарыдағы тұжырымдар алдын ала болжам ретінде қарастырылуы тиіс және оларды растау үшін келешекте *in vitro/in vivo* сынақтар қажет. Жалпы алынған нәтижелер TiNO қабықшаларындағы құрылымдық өзгерістер мен олардың механикалық тұтастығы жүрек-қан тамырлары имплантаттары үшін маңызды беріктік және биоүйлесімділік сипаттамаларын анықтайтынын көрсетеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Kesselheim, A. S., Xu S., Avorn, J. Clinicians Contributions to the Development of Coronary Artery Stents : A Qualitative Study of Transformative Device Innovation // PLoS ONE. – 2014. – Vol. 9. – Art. e88664. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088664>

2 Kotake, H. , Jia, J. , Nakamura, S. I., Okajima, T., Shigesato, Y. Tailoring the Crystal Structure of TiO2 Thin Films from the Anatase to Rutile Phase // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2015. – Vol. 33. – Art. 041505. – <https://doi.org/10.1116/1.4923187>

3 Kengesbekov, A. B., Serikbaykyzy, A. , Bayandinova, M. B., Batanov, E. E., Bazarov, N. E., Askhatov A. N. Development of Biocompatible Coatings for Orthopedic Joint Implants // Physical Sciences and Technology. – 2025. – Vol. 12. – P. 84–94. – <https://doi.org/10.26577/phst20251218>

4 Saqib, M., Kuzmin, O., Kraśkiewicz, H., Wasyluk, L., Cuniberti, G., Fica, A., Pichugin, V., Opitz, J. Evaluation of In Vitro Corrosion Behavior of Titanium Oxynitride Coated Stainless Steel Stents // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 59766–59782. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072500>

5 Yang, P., Huang, L., Leng, Y. X., Chen, J. Y., Sun, H., Wang, J., Chen, F., Chu, P. K. In Vivo Study of Ti–O Thin Film Fabricated by Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition (PIII) // Surface and Coatings Technology. – 2002. – Vol. 156. – P. 284–288. – [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00076-4)

6 Yuryk, O., Barabanchyk, O., Malets, M. Innovations in Medicine : Modern Challenges, Future Definitions: A Narrative Review // Future Medicine. – 2022. – Vol. 1. – P. 26–34. – <https://doi.org/10.57125/FEM.2022.06.30.03>

7 Wang, J., Chen, H. Macromolecular Modification Strategies for Biomaterial Surface: Challenges in Fundamental Research and Applications // Macromolecules. – 2023. – Vol. 56. – P. 3465–3473. – <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.3c00123>

8 Pustovalova, A., Boytsova, E., Aubakirova, D., Bruns, M., Tverdokhlebov, S., Pichugin, V. Formation and Structural Features of Nitrogen-Doped Titanium Dioxide Thin Films Grown by Reactive Magnetron Sputtering // Applied Surface Science. – 2020. – Vol. 534. – Art. 147572. – <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147572>

9 Roguin, A. Stent: The Man and Word behind the Coronary Metal Prosthesis // Circulation: Cardiovascular Interventions. – 2011. – Vol. 4. – P. 206–209. – <https://doi.org/10.1161/CIRCINTERVENTIONS.110.960831>

10 Kengesbekov, A. Influence of Plasma Arc Current and Gas Flow on the Structural and Tribological Properties of TiN Coatings Obtained by Plasma Spraying // Coatings. – 2024. – Vol. 14, № 11. – Art. 1404. – <https://doi.org/10.3390/coatings14111404>

11 Mukaromah, U. A., Andriyanti, W., Sutanto, H., Sahabudin, N. N. Layer Deposition of Titanium Dioxide (TiO2) Using DC-Sputtering Method with Variation of Deposition Time : Study of Microstructure and Coating Hardness // Journal of Physics and Its Applications. – 2021. – Vol. 4. – P. 14–19. [Electronic resource]. – URL: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jpa/index> (Дата обращения: 04.08.2026)

12 Nikitenkov, N. Investigation of the Structure, Elemental and Phase Composition of Coatings on the Basis of Oxynitride Titanium Deposited by Reactive Magnetron Sputtering // Journal of Surface Investigation : X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2014. – Vol. 8. – P. 1230–1234. – <https://doi.org/10.1134/S1027451014060391>

13 Martin, N., Cremer, R., Neuschütz, D. Reactive Sputtering of TiOxNy Coatings by the Reactive Gas Pulsing Process. Part II: The Role of the Duty Cycle

// Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201. – P. 4915–4920. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.218>

14 **Saoula, N., Bait, L., Sali, S., Azibi, M., Hammouche, A., Madaoui, N.** Reactive Magnetron Sputter Deposition of Titanium Oxynitride $TiNxOy$ Coatings: Influence of Substrate Bias Voltage on the Structure, Composition, and Properties // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2019. – Vol. 55. – P. 743–747. – <https://doi.org/10.1134/S2070205119040217>

15 **Navarro, L., Luna, J., Rintoul, I.** Surface Conditioning of Cardiovascular 316L Stainless Steel Stents: A Review // Surface Review and Letters. – 2017. – Vol. 24. – Art. 1730002. – <https://doi.org/10.1142/S0218625X17300027>

16 **Ataie, A., Rakhadilov, B., Kenzhegulov, A., Apsezhanova, A., Kussainov, A.** Effect of Substrate Bias Voltage on Structural and Mechanical Properties of Ti–O–N Coatings Obtained by Reactive Magnetron Sputtering // Coatings. – 2023. – Vol. 13. – Art. 1141. – <https://doi.org/10.3390/coatings13071141>

17 **Pichugin, V., Pustovalova, A., Konishev, M., Khlusov, I., Ivanova, N., Sun, Z., Gutor, S.** In-Vitro Dissolution and Structural and Electrokinetic Characteristics of Titanium-Oxynitride Coatings Formed via Reactive Magnetron Sputtering // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2016. – Vol. 10. – P. 282–291. – <https://doi.org/10.1134/S1027451016020272>

18 **Chappe, J.-M., Martin, N., Lintymer, J., Sthal, F., Terwagne, G., Takadoun, J.** Titanium Oxynitride Thin Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering – Structure and Physical-Mechanical Properties // Applied Surface Science. – 2007. – Vol. 253. – P. 5312–5316. – <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.11.042>

19 **Mayrhofer, P. H., Geier, M., Locker, C., Chen, L.** Influence of Deposition Conditions on Texture Development and Mechanical Properties of TiN Coatings // International Journal of Materials Research. – 2009. – Vol. 100. – P. 1052–1057. – <https://doi.org/10.3139/146.110149>

20 **Vaz, F., Machado, P., Rebouta, L., Cerqueira, P., Goudeau, P., Riviere, J. P., Alves, E., Pischow K., de Rijk, J.** Mechanical Characterization of Reactively Magnetron-Sputtered TiN Films // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 174–175. – P. 375–381. – [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00630-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00630-0)

03.06.26 ж. баспаға түсті.

07.08.26 ж. түзетулерімен түсті.

10.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. Б. Кеңесбеков¹, А. К. Сейтханова², *А. Серікбайқызы³,*

М. Б. Баяндинова⁴, Л. С. Каирбаева⁵

^{1,3,4,5}Д. Серікбаев Восточно-Казахстанский технический университет,

Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;

²А. Марғұлан Павлодарский педагогический университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 03.06.26.

Поступило с исправлениями 07.08.26.

Принято в печать 10.09.26.

ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ОКСИНИТРИДА ТИТАНА МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ, ИХ СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И СВОЙСТВА

Пленки $TiNO$ относятся к числу перспективных материалов для модификации поверхностей сердечно-сосудистых стентов и других медицинских имплантатов благодаря высокой биосовместимости, устойчивости к коррозионным средам и достаточным механическим характеристикам. Основная цель исследования – всесторонняя оценка влияния отрицательного напряжения смещения, приложенного к подложке, на структурные, морфологические и механические характеристики пленок $TiNO$, полученных в условиях реактивного магнетронного распыления. Пленки осаждались на подложки из нержавеющей стали AISI 316L с использованием мишени из 99,99 % чистого титана в газовой среде $Ar:N_2:O_2$ при уровнях отрицательного напряжения смещения от 0 до -150 В. В ходе работы изучались скорость осаждения, фазовый состав, микроструктура, твердость, адгезионная прочность и смачиваемость поверхности. Результаты рентгенодифракционного анализа показали, что с увеличением отрицательного напряжения смещения фаза TiN сначала трансформируется в оксинитрид $TiNO$, а затем в фазы анатаза и рутила TiO_2 . Это явление демонстрирует решающее влияние энергии ионной бомбардировки на формирование кристаллической структуры и фазового состава пленки. Наибольшее значение твердости 430 HV и критическая нагрузка прочности сцепления 20–25 Н были зафиксированы для образца, полученного в режиме -50 В. Результаты измерения краевого угла смачивания показали, что все исследованные пленки являются гидрофильными. Это указывает на их пригодность для прикрепления клеток к

поверхности и их потенциал для биомедицинских применений. Полученные данные свидетельствуют о том, что регулирование свойств пленок TiNO посредством технологических параметров позволяет повысить эксплуатационную надежность и срок службы медицинских имплантатов.

Ключевые слова: пленка TiNO; реактивное магнетронное распыление; напряжение смещения; фазовый состав; твердость.

A. B. Kengesbekov¹, A. K. Seitkhanova², *A. Serikbaikyzy³,

M. B. Bayandinova⁴, L. S. Kairbaeva⁵

^{1,3,4,5}D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,

Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;

²Margulan University,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 03.06.26.

Received in revised form 07.08.26.

Accepted for publication 10.09.26.

FORMATION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF TITANIUM OXYNITRIDE FILMS DEPOSITED BY REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING

TiNO films are promising materials for modifying the surfaces of cardiovascular stents and other medical implants due to their high biocompatibility, resistance to corrosive environments, and satisfactory mechanical properties. The primary objective of this study was to comprehensively evaluate the effect of negative bias voltage applied to the substrate on the structural, morphological, and mechanical properties of TiNO films obtained using reactive magnetron sputtering. The films were deposited on AISI 316L stainless steel substrates using a 99.99 % pure titanium target in an Ar:N₂:O₂ gas environment at negative bias voltage levels ranging from 0 to -150 V. The deposition rate, phase composition, microstructure, hardness, adhesion strength, and surface wettability were studied. X-ray diffraction analysis results showed that with increasing negative bias voltage, the TiN phase first transforms into TiNO oxynitride and then into the anatase and rutile TiO₂ phases. This phenomenon demonstrates the decisive influence of ion bombardment energy on the formation of the crystalline structure and phase composition of the film. The highest hardness value of 430 HV and a critical adhesion load of 20–25 N were recorded for the sample obtained at -50 V. Contact

angle measurements showed that all the studied films are hydrophilic. This indicates their suitability for cell attachment to surfaces and their potential for biomedical applications. The obtained data indicate that regulating the properties of TiNO films through process parameters can improve the operational reliability and service life of medical implants.

Keywords: TiNO film, reactive magnetron sputtering, bias voltage, phase composition, hardness.

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/172-182>

Ali Coruh¹, Elham Fattahi², *Aligholi Niaei³

^{1,2,3}Department of Physics, Faculty of Science,

University of Sakarya, Turkey, Sakarya;

²Department of Chemical & Petroleum Engineering,

University of Tabriz, Iran, Tabriz.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7362-6173>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3218-461X>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5580-4266>

*e-mail: aliniaei@sakarya.edu.tr

LA-SR-BASED PEROVSKITE OXIDES AS BIFUNCTIONAL ELECTROCATALYSTS FOR WATER SPLITTING VIA COMPOSITIONAL, ELECTRONIC, AND NANOSTRUCTURAL ENGINEERING

With the growth of the global population and expansion of the world economy, the global demand for energy continues to rise steadily. Most of the produced energy still relies on fossil fuels, which leads to the depletion of natural resources and environmental degradation. This situation drives active research and development in renewable energy technologies.

One of the most promising directions is the electrocatalytic production of hydrogen from water; considered an efficient solution to the intermittency of renewable energy generation. The process of water electrolysis includes two half-reactions: the anodic oxygen evolution reaction (OER, $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$) and the cathodic hydrogen evolution reaction (HER, $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$). Under standard conditions, the equilibrium potential of water electrolysis is 1.23 V, but in practice it reaches 1.6–2.0 V due to significant charge transfer losses in the OER process.

Therefore, the development of efficient and stable electrocatalysts is key for large-scale hydrogen and oxygen production, reducing energy consumption, and advancing industrial water electrolysis technologies. Among various materials, perovskite-type oxides (ABO_3) are of particular interest due to their natural abundance, high chemical stability, and tunable composition. These properties make them promising high-activity catalysts for the oxygen evolution reaction. However, their practical

application is limited by relatively low specific surface area, which leads to reduced catalytic activity.

Keywords: Perovskite, hydrogen, photocatalysts, water splitting, renewable energy, overpotential, activity, electrochemistry.

Introduction

Current challenges associated with climate change and growing energy consumption require the active adoption of “green” energy technologies and the development of affordable and efficient catalysts for water electrolysis processes. Hydrogen, with its high specific energy and zero carbon emissions upon combustion, is considered one of the most promising avenues for clean energy development. Despite significant progress in electrochemical water splitting, scaling issues remain unresolved: high energy losses (overpotentials), high catalyst cost, and insufficient energy conversion efficiency. To achieve industrial performance, it is necessary to reduce the overpotential of the oxygen evolution reaction (OER) and the hydrogen evolution reaction (HER) to below 150 mV and 200 mV, respectively, as well as to increase the specific surface area of catalysts above 30 m²/g, which promotes enhanced activity and a reduction of overpotential below 100 mV. The implementation of this project is expected to lead to the creation of a new generation of bifunctional catalysts characterized by high activity, stability, and low energy consumption, ensuring economic efficiency. A key outcome will be the development of La-Sr-based perovskite-type porous oxides suitable for use as anodic and cathodic active materials in electrochemical water splitting.

Water electrolysis comprises two main half-reactions: hydrogen evolution (HER) at the cathode and oxygen evolution (OER) at the anode. Under ideal conditions, a theoretical potential of 1.23 V is required for the overall reaction; however, in real systems, a higher potential is needed due to overpotential phenomena [1]. The HER is a two-electron reaction involving proton adsorption and H₂ desorption [2], whereas the OER is a more complex four-electron reaction with multistep kinetics [1]. Noble metals such as Pt, RuO₂, and IrO₂ are benchmark catalysts for HER and OER, but their practical use is limited by high cost and low stability. Alternative materials based on non-noble metals exhibit outstanding catalytic characteristics and, in some cases, surpass noble metals [3–7]. One of the key parameters for assessing the activity of electrocatalysts is the overpotential at a current density of 10 mA · cm⁻² [8]. Reducing overpotential can be achieved both by improving electrolyzer design and by employing highly efficient catalysts [9]. To analyze their kinetic characteristics, the Tafel slope and turnover frequency (TOF) are used, allowing quantitative evaluation of catalytic activity [10, 11]. Perovskite-type oxides (ABO_3) represent a promising class of materials due to their low cost,

tunable electronic structure, and ease of synthesis [9–11]. Their catalytic activity in OER and HER is comparable to that of noble metals, making them attractive for use in water electrolysis [3,6–8]. In the perovskite structure, the A-site is typically occupied by a rare-earth or alkali metal (Figure 1), and the B-site by a transition metal with octahedral coordination. The stability of an electrocatalyst, determined by its activity during prolonged operation, is investigated using cyclic and linear voltammetry, as well as potentiostatic and galvanostatic tests.

Materials and methods

Structural and electronic factors governing electrocatalytic activity. The flexibility of the perovskite structure with respect to changes in coordination environment and oxidation states enables fine-tuning of catalytic activity. Doping with transition-metal oxides (TMO) enhances OER activity through synergistic effects and modification of the electronic structure, increasing the number of active sites for HER and OER. Perovskites with the structure $A'A_1-aB'_1-bB_1-bO_3-x$ allow cation substitution and control of oxygen-vacancy concentration, which affects the electronic structure, coordination, and catalytic properties [10, 11].

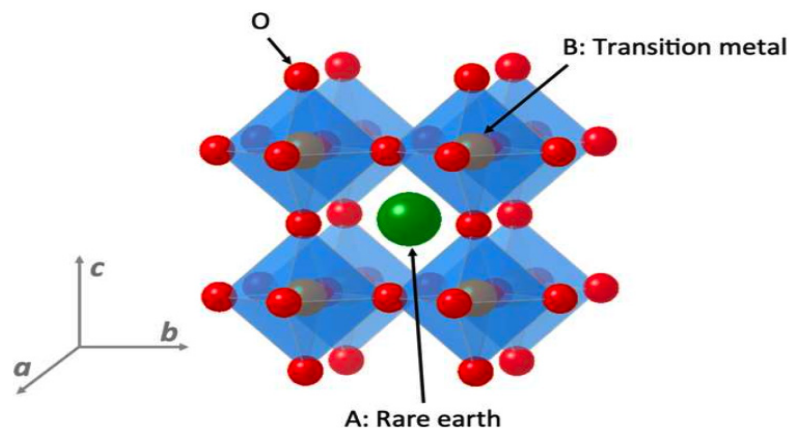


Figure 1 – General formula of perovskite oxide ABO_3 [12].

HER and OER activity are closely related to several measurable electronic parameters, including the number of 3d electrons, the spin states of transition metals, the degree of metal–oxygen bond covalency, and the positions of the d and p bands relative to the Fermi level. These parameters, in turn, depend on the nature and distribution of cations, their valence states, and the concentration of oxygen vacancies—all of which will be investigated within this project.

Results and discussion

Effect of A-site cations

The role of A-site cations in improving OER and HER activity is examined in detail in contemporary literature. Substitution at this site can alter electrical conductivity, the Goldschmidt tolerance factor, and the degree of structural order [13]. Although active sites are usually localized on B-site cations, the A-site influence is also substantial. For example, in the series $LnBaCo_2O_{5+\delta}$ ($Ln = Gd-La$), the highest HER activity was observed for $LaBaCo_2O_{5+\delta}$ —the compound with the largest A-site cation—owing to an increased O-Co-O bond angle and higher conductivity [14]. Increasing the A-cation size enhances Co-O orbital overlap and the effective transfer of e_g electrons, thereby reducing losses in HER.

A tolerance factor close to unity indicates an optimal cubic structure for alkaline HER conditions. For $LaBaCo_2O_{5+\delta}$, this factor is 1.009, consistent with a stable cubic lattice. In addition, the ionic radius of the A-cation influences the distribution of oxygen vacancies and conductivity, while its electronegativity can determine catalytic activity via an inductive effect.

La and Sr play a special role—their ability to adopt multiple valence states (Sr^{2+}/Sr^{3+} , La^{2+}/La^{3+}) contributes to enhanced HER/OER activity and stabilization of the crystal lattice. These elements improve ionic and electronic conductivity, increase catalyst durability, and promote the formation of oxygen vacancies.

Effect of B-site cations

Changes at the A-site are often accompanied by changes in the valence state of B-site cations, directly impacting catalytic activity. In the $LaBaCo_2O_{5+\delta}$ ($Ln = Gd-La$) series, increasing La content raises the average Co valence from 2.92 to 3.49, improving charge transport and HER activity [14]. A higher Co^{4+} content facilitates more effective water adsorption and accelerates electron transfer [14].

In $Pr_x(Ba_{0.5}Sr_{0.5})_{1-x}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-\delta}$ (Pr_xBSCF , $0 \leq x \leq 1$), HER activity increases up to $x = 0.5$ and then decreases due to a structural transition from cubic to orthorhombic. Here, Pr doping raises the oxidation state of Co, which serves as the HER active site [15]. Similarly, $CaCoO_3$ shows higher activity than $La_{0.5}Ca_{0.5}CoO_3$ and $LaCoO_3$ due to improved charge transport and strong metal–oxygen bond covalency.

From a practical standpoint, Fe-containing perovskites offer advantages—iron is cheaper, more abundant, and more environmentally friendly than Co and Ni. However, such materials often exhibit reduced activity and durability, necessitating strategies to enhance performance, including ionic doping, oxygen deficiency engineering, and structural optimization [16].

Nanostructuring

Numerous recent studies have shown that nanostructured perovskite-type oxides can exhibit high catalytic activity in OER and HER. This is attributed to

their significantly larger electrochemically active surface area, high density of surface oxygen vacancies, and improved charge-transfer characteristics. Together, these factors enhance overall catalytic efficiency [17].

Among various perovskite compounds, $\text{SrNb}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (SNCF) has attracted special attention, demonstrating exceptional intrinsic OER activity in alkaline media. Its performance surpasses even the noble-metal catalyst IrO_2 (current of 450 mA at an overpotential of 10 mA cm^{-2} and a Tafel slope of 60 mV/dec) and the well-known perovskite $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (BSCF) (510 mA at the same overpotential). The presence of pores of various sizes formed by aggregation of primary particles, along with textural and secondary porosity, makes these materials promising for OER and HER [17].

However, SNCF-based catalysts have limited volumetric OER activity due to the low specific surface area typical of materials synthesized by conventional solid-state routes. In general, a key challenge for perovskites is their small surface area ($< 5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) and weak porosity, which lead to reduced mass activity and hindered charge transfer (overpotential around 500 mV at 10 mA cm^{-2}).

Despite this, studies on high-surface-area perovskites for water splitting remain limited. Within this project, we plan to investigate the electrochemical characteristics and structural features of porous and nonporous perovskites of composition $\text{A}_1\text{-xA}'\text{-xB}_1\text{-yB}'\text{-yO}_3$ for HER and OER, aiming to create efficient and environmentally friendly catalysts for sustainable hydrogen production. The core idea is to employ polymer-derived nanofiber structures with diameters of about 150 nm as highly active electrocatalysts.

Since OER and HER predominantly occur at transition-metal ions located at the B-site of the perovskite lattice, the metal-oxygen bond length is one of the determining parameters of catalytic activity [7]. Therefore, designing perovskite catalysts with nanostructured morphology is a promising approach to improve their performance.

Electrospinning is a modern and technologically versatile method for producing one-dimensional (1D) nanomaterials-nanofibers, nanowires, and nanotubes-with large specific surface area and a well-developed porous structure. Perovskites synthesized by this method exhibit surface areas up to 45 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ and characteristic N_2 adsorption-desorption isotherms in the 0.4-0.8 range with a pronounced hysteresis loop at $P/P_0 > 0.9$, indicating the presence of meso- and macropores [18-20].

Controlling nanofiber diameter enables regulation of surface morphology and, consequently, the number of active sites. Changing the fiber diameter leads to variations in the density of reaction centers and the continuity of porous channels, directly affecting catalytic activity [7]. Moreover, enhanced catalyst activity correlates with the oxidation state of the transition metals involved

in the reactions. Thus, developing nanostructured perovskites with optimized morphology and electronic structure is one of the key directions for improving their electrocatalytic properties.

Conclusion

Perovskite oxides offer considerable compositional flexibility for the development of electrocatalysts for water splitting. Changes in the A- and B-site composition affect the oxidation state of transition metals, oxygen-vacancy concentration, metal-oxygen bonding, electrical conductivity, and surface reactivity. In La-Sr-based systems containing Co, Fe, and Mn, these parameters can be varied through cation substitution and therefore provide several possibilities for controlling OER and HER activity.

The available studies also indicate that composition alone is not sufficient to obtain high catalytic performance. A major limitation of conventionally prepared perovskites is their low specific surface area, which restricts the number of accessible active sites and may limit mass and charge transfer. Nanostructuring is therefore an important part of catalyst design. In particular, electrospinning allows perovskite oxides to be prepared in the form of one-dimensional porous fibers with considerably higher surface areas than those obtained by conventional solid-state synthesis.

The catalytic behavior of these materials is determined by the combined effects of crystal composition, transition-metal valence state, oxygen deficiency, surface area, and morphology. For this reason, systematic comparison of porous and nonporous La-Sr-based perovskites should help establish how these parameters influence OER and HER kinetics and identify the compositions and structural features most favorable for bifunctional electrocatalysis.

Further work should focus on relating structural and surface characteristics to electrochemical parameters such as overpotential, Tafel slope, electrochemically active surface area, and stability during prolonged operation. Particular attention should also be paid to changes in the oxidation state and local coordination of Co, Fe, and Mn under operating conditions, since the active surface of a perovskite may differ from that of the as-prepared material. Such information is necessary for the rational development of La-Sr-based perovskite electrocatalysts with improved activity and durability for alkaline water splitting.

REFERENCES

1 Yan Y., Xia B. Y., Zhao B., Wang X. A review on noble-metal-free bifunctional heterogeneous catalysts for overall electrochemical water splitting // Journal of Materials Chemistry A. – 2023. – Vol. 4. – P. 17587–175603. – <https://doi.org/10.1039/c6ta08075h>

2 Lijun Z., Hyeongtaek J., Hoon L., Kim M. G., Dae Y., Shuo L., et al. Sodium-decorated amorphous/crystalline RuO₂ with rich oxygen vacancies: a robust pH-universal oxygen evolution electrocatalyst // *Angewandte Chemie*. – 2021. – Vol. 133. – P. 18969–18977. – <https://doi.org/10.1002/ange.202106631>

3 Yifan W., Zhi W., Liang G., An L., Jin Y., Sun S., et al. Activation Strategies of Perovskite-Type Structure for Applications in Oxygen-Related Electrocatalysts. // *Small Methods*. – Vol. 5. No 2100012. – <https://doi.org/10.1002/smt.202100012>

4 Yih-Han F., Zhi-Pan L. Mechanism and Tafel lines of electro-oxidation of water to oxygen on RuO₂ (110) // *Journal of the American Chemical Society*. – 2021. – Vol. 132. – P. 18214–18222. – <https://doi.org/10.1021/ja1069272>

5 Retuerto M., Pascual L., Calle-Vallejo F., Ferrer P., Gianolio D., Pereira A.G., García Á., Torrero J., Fernández-Díaz M.T., Bencok P., Peña M.A., Fierro & S. Rojas J.L.G. Na-doped ruthenium perovskite electrocatalysts with improved oxygen evolution activity and durability in acidic media // *Nature Communications*. – 2019. Vol. 10. – № 2041. – <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09791-w>

6 Hwang J., Rao R.R., Giordano L., Katayama Yu, Yu Y. and Shao-Horn Y. Perovskites in catalysis and electrocatalysis // *Science*. – 2017. – Vol. 358. – P. 751–756. – <https://doi.org/10.1126/science.aam7092>

7 Xu X., Wang W., Zhou W., Shao Z. Recent advances in novel nanostructuring methods of perovskite electrocatalysts for energy-related applications // *Small Methods*. – 2018. – Vol. 2. – No1800071. – <https://doi.org/10.1002/smt.201800071>

8 Arandiyán H., Mofarah S. S., Sorrell Ch.C., Doustkhah E., Sajjadi B., Hao D., Wang Y., Sun H., Ni B.-J., Rezaei M., Shao Z., Maschmeyer T. Defect engineering of oxide perovskites for catalysis and energy storage: synthesis of chemistry and materials science // *Chemical Society Reviews*. – 2021. – Vol. 50. – P. 10116–101211. – <https://doi.org/10.1039/d0cs00639d>

9 Tarjomannejad A., Farzi A., Niaei A., Salari D. An experimental and kinetic study of toluene oxidation over LaMn_{1-x}B_xO₃ and La_{0.8}A_{0.2}Mn_{0.3}B_{0.7}O₃ (A=Sr, Ce and B=Cu, Fe) nano-perovskite catalysts // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 33. – P. 2628–2637. – <https://doi.org/10.1007/s11814-016-0108-4>

10 Tang L., Zhang W., Lin D., Ren Y., Zheng H., Luo Q., Wei L., Liu H., Chen J., Tang K. The hexagonal perovskite Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-δ} as an efficient electrocatalyst for the oxygen evolution reaction // *Inorganic Chemistry Frontiers*. – 2020. Vol. 7. – P. 4488–4497.

11 Grünbacher M., Tarjomannejad A., Delir P., Nezhad K., Praty C., Ploner K., Mohammadi A., Niaei A., Klötzer B., Schwarz S.,

Bernardi J., Farzi A., M. Gómez J.I., Rivero V. T., Penner S. Promotion of La(Cu_{0.7}Mn_{0.3})_{0.98}M_{0.02}O_{3-δ} (M= Pd, Pt, Ru and Rh) perovskite catalysts by noble metals for the reduction of NO by CO // *Journal of Catalysis*. – 2019. – Vol. 379. – P. 18–32. – <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2019.09.005>

12 Yang G., Jung W., , Ahn S.-J., Lee D. Controlling the oxygen electrocatalysis on perovskite and layered oxide thin films for solid oxide fuel cell cathodes // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1030. – <https://doi.org/10.3390/app9051030>

13 Karki S.B., Andriotis A.N., Menon M., Ramezanipour F. Bifunctional water-splitting electrocatalysis achieved by defect order in LaA₂Fe₃O₈ (A = Ca, Sr) // *ACS Applied Energy Materials*. – 2019. – Vol. 4. – P. 12063–12066.

14 Dou Y., Hao X., Xia T., Li Q., Wang J., et al. Addressing electrocatalytic activity and stability of LnBaCo₂O_{5+δ} perovskites for hydrogen evolution reaction by structural and electronic features // *Applied Catalysis B*. – 2021. – Vol. 297. – № 120403. – <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120403>

15 Xu X., Chen Y., Zhou W., Zhu Z., Su C., Liu M., et al. A perovskite electrocatalyst for efficient hydrogen evolution reaction // *Advanced Materials*. – 2016. – Vol. 28. – P. 6442–6448. – <https://doi.org/10.1002/adma.201600005>

16 Grimaud A., May J.K., Carlton C.E., Lee Y.-L., Risch M., W.Hong T., et al. Double perovskites as a family of highly active catalysts for oxygen evolution in alkaline solution // *Nature Communications*. – 2013. – Vol. 4. – No2439. – <https://doi.org/10.1038/ncomms3439>

17 Zhu Y., Zhou W., Zhong Y., Bu Y., Chen X., et al. A perovskite nanorod as bifunctional electrocatalyst for overall water splitting // *Advanced Energy Materials*. – 2017. – Vol. 7. – No1602122. – <https://doi.org/10.1002/aenm.201602122>

18 Li X., Hao X., Abudula A., Guan G. Nanostructured catalysts for electrochemical water splitting: current state and prospects // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2016. – Vol. 4. – P. 11973–12000. – <https://doi.org/10.1039/c6ta02334g>

Nezhad P.D.K., Bekheet M.F., Bonmassar N., Gili A., Kamutzki F., Gurlo A., Doran A., Schwarz S., Bernardi J., Praetz S., Niaei A., Farzi A., Penner S. Elucidating the role of earth alkaline doping in perovskite-based methane dry reforming catalysts // *Catal. Sci. Technol.* – 2016. Vol. 12. – № 4. – P. 1229–1244.

19 Mohammadi A., Farzi A., Thurner C., Klötzer B., Schwarz S., Bernardi J., Niaei A., Penner S. Tailoring the metal-perovskite interface for promotional steering of the catalytic NO reduction by CO in the presence of H₂O on Pd-lanthanum iron manganite composites // *Applied Catalysis B: Environment and Energy*. – 2021. Vol. – 307. – № 121160. – <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121160>

Received 08.08.26.
Received in revised form 08.08.26.
Accepted for publication 08.09.26.

Али Корух¹, Эльхам Фаттах², *Алиголи Ниази³
^{1,2,3}Физика кафедрасы, Жаратылыстану ғылымдары факультеті,
Сакарія университеті, Түркия, Сакарія қ.;
²Химиялық және мұнай инженериясы кафедрасы,
Табриз университеті, Иран, Табриз қ.
08.08.26 ж. баспаға түсті.
08.08.26 ж. түзетулерімен түсті.
08.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

La-Sr НЕГІЗІНДЕГІ ПЕРОВСКИТ ОКСИДТЕРІ КОМПОЗИЦИЯЛЫҚ, ЭЛЕКТРОНДЫҚ ЖӘНЕ НАНОҚҰРЫЛЫМДЫҚ ИНЖЕНЕРИЯ АРҚЫЛЫ СУДЫ ЫДЫРАТАТЫН БИФУНКЦИОНАЛДЫ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРЛАР

Планета халқының өсуімен және әлемдік экономиканың дамуымен энергияға жаһандық сұраныс тұрақты түрде өсуде. Өндірілетін энергияның көп бөлігі әлі де қазба отындарына тәуелді, бұл табиғи ресурстардың сарқылуына және қоршаған ортаның нашарлауына әкеледі. Бұл жағдай жаңартылатын энергия көздерін пайдалану технологиялары саласындағы белсенді зерттеулер мен әзірлемелерді ынталандырады.

Ең перспективалы бағыттардың бірі судан сутекті электрокатализикалық алу болып табылады, ол жаңартылатын энергия өндірісіндегі үзілістер мәселесін тиімді шешу болып саналады. Су электролизі процесі екі жартылай реакцияны қамтиды: оттегінің анодты бөліну реакциясы ($OER, 4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$) және сутектің бөліну катодты реакциясы ($HER, 2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$). Стандартты жағдайларда судың электролизінің тепе-теңдік потенциалы 1,23 в құрайды, бірақ іс жүзінде ол OER процесінде зарядты тасымалдау кезінде айтарлықтай шығындарға байланысты 1,6-2,0 в-қа жетеді.

Осылайша, тиімді және тұрақты электрокатализаторларды әзірлеу сутегі мен оттегінің ауқымды өндірісі, энергияны тұтынуды азайту және өнеркәсіптік су электролизі технологияларын дамыту үшін маңызды болып табылады. Әр түрлі материалдардың ішінде

перовскит типті оксидтер (ABO_3) табиғаттағы көп мөлшеріне, жоғары химиялық тұрақтылығына және реттелетін құрамына байланысты ерекше қызығушылық тудырады. Бұл қасиеттер оларды оттегінің бөліну реакциясының перспективалы жоғары белсенді Катализаторларына айналдырады. Дегенмен, олардың практикалық қолданылуы салыстырмалы түрде төмен меншікті бетімен шектеледі, бұл катализикалық белсенділіктің төмендеуіне әкеледі.

Кілтті сөздер: перовскит, сутегі, фотокатализаторлар, судың бөлінуі, жаңартылатын энергия, шамадан тыс жүктеме, белсенділік, электрохимия.

Али Корух¹, Эльхам Фаттах², *Алиголи Ниази³
^{1,2,3}Кафедра физики, факультет естественных наук,
Университет Сакарья, Турция, г. Сакарья;
²Кафедра химической и нефтяной инженерии,
Тебризский университет, Иран, г. Тебриз.
Поступило в редакцию 08.08.26.
Поступило с исправлениями 08.08.26.
Принято в печать 08.09.26.

ОКСИДЫ ПЕРОВСКИТА НА ОСНОВЕ La-Sr В КАЧЕСТВЕ БИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ РАСЩЕПЛЕНИЯ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ КОМПОЗИЦИОННОЙ, ЭЛЕКТРОННОЙ И НАНОСТРУКТУРНОЙ ИНЖЕНЕРИИ

С ростом населения планеты и развитием мировой экономики глобальный спрос на энергию продолжает неуклонно расти. Большая часть производимой энергии по-прежнему зависит от ископаемого топлива, что приводит к истощению природных ресурсов и ухудшению состояния окружающей среды. Такая ситуация стимулирует активные исследования и разработки в области технологий использования возобновляемых источников энергии.

Одним из наиболее перспективных направлений является электрокатализическое получение водорода из воды, которое считается эффективным решением проблемы перебоев в производстве возобновляемой энергии. Процесс электролиза воды включает две полуреакции: анодную реакцию выделения кислорода ($OER, 4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$) и катодную реакцию выделения

водорода ($HER, 2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$). В стандартных условиях равновесный потенциал электролиза воды составляет 1,23 В, но на практике он достигает 1,6–2,0 В из-за значительных потерь при переносе заряда в процессе OER.

Таким образом, разработка эффективных и стабильных электрокатализаторов имеет ключевое значение для крупномасштабного производства водорода и кислорода, снижения энергопотребления и развития технологий промышленного электролиза воды. Среди различных материалов оксиды типа перовскита (ABO_3) представляют особый интерес из-за их большого количества в природе, высокой химической стабильности и регулируемого состава. Эти свойства делают их перспективными высокоактивными катализаторами реакции выделения кислорода. Однако их практическое применение ограничено относительно низкой удельной поверхностью, что приводит к снижению каталитической активности.

Ключевые слова: Перовскит, водород, фотокатализаторы, расщепление воды, возобновляемая энергия, перенапряжение, активность, электрохимия.

SRSTI 29.19.13

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/183-199>

***A. K. Kochneva¹, A. Serikbaykyzy², A. N. Askhatov³,
N. Zhasulanuly⁴, N. E. Berdimuratov⁵**

^{1,2,3,4}D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;

⁵Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7876-9552>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4623-4681>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6716-9929>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4691-247X>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6880-6439>

*e-mail: kochnevaasem@gmail.com

STUDY OF THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF COATINGS FORMED BY MICRO-ARC OXIDATION ON A TITANIUM ALLOY

This study investigates the physicochemical and mechanical properties of calcium phosphate coatings formed by micro-arc oxidation (MAO) on the titanium alloy Ti-13Nb-13Zr. The coatings were deposited in an electrolyte based on 30 % H_3PO_4 with the addition of hydroxyapatite (60 g/L) and $CaCO_3$ (90 g/L) under various voltage, current, frequency, and processing time conditions. The microstructure and morphology of the coatings were investigated using optical and scanning electron microscopy (SEM/EDS). The coating thickness ranged from 68 to 162 μm depending on the micro-arc discharge (MAD) conditions. Surface roughness (R_a) was in the range of 7.99–12.06 μm and correlated with the intensity of the micro-arc discharges. Mechanical properties were determined using the instrumented microindentation method. The maximum values of microhardness (up to 420 HV), Young's modulus, and yield strength were obtained for a sample formed at 500 V and 2 A. Scratch tests confirmed the high adhesive strength of the coatings and the absence of catastrophic delamination. Samples MAO_4 – MAO_5 demonstrated the best combination of thickness, porosity, and mechanical stability. The results confirm the significant influence of micro-arc oxidation conditions on coating growth kinetics, the formation of a

porous structure, and performance characteristics, which allows for the optimization of MAO parameters to produce bioactive and mechanically stable coatings for medical applications.

Keywords: micro-arc oxidation, titanium alloy, Ti-13Nb-13Zr, oxide coatings, calcium phosphate coating, MAO, physicochemical properties, microhardness.

Introduction

Titanium and its alloys are widely used in orthopedics and dentistry due to their high corrosion resistance, biointertness, and satisfactory mechanical properties. However, the natural TiO₂ passive film and the relatively «inert» surface of titanium do not provide optimal conditions for rapid osseointegration, nor do they possess pronounced antibacterial properties, which has stimulated the development of technologies for functional surface modification and the formation of protective bioactive coatings.

One of the most effective methods for producing functional oxide layers on titanium is micro-arc oxidation (MAO), which allows for the formation of porous oxide coatings with high adhesion to the substrate and the possibility of controlled doping through the composition of the electrolyte and the electrical parameters of the process. It has been shown that changes in MAO parameters (voltage, current, frequency/duration) significantly affect the morphology, porosity, and phase composition of the coating, which directly influences its performance properties [1; 2]. For promising biomedical β - and pseudo- β -alloys (including Ti-13Nb-13Zr), the MAO method enables the production of bioactive layers that promote the formation of a calcium phosphate component and enhance osteoconductivity [3; 4].

Particular attention is paid to calcium phosphate (CaP) and hydroxyapatite-containing coatings, as they are capable of increasing the bioactivity of the titanium surface and initiating the precipitation of apatite-like phases in model biofluids. Various approaches to the formation of CaP- s during MDA have been demonstrated for both pure titanium and Nb-containing alloys [5; 6]. In [7; 8], it was shown that the incorporation of hydroxyapatite and/or CaP phases into the oxide matrix contributes to improved biological responses and increased osteointegration potential. For Ti-13Nb-13Zr, the formation of bioactive coatings via MDP has been reported, as well as the sensitivity of their characteristics to processing parameters [9; 10]. In particular, varying the PVD conditions on Ti-13Nb-13Zr produced by additive manufacturing leads to noticeable changes in the structure of Ca-P-containing layers [11; 12], which is important when transitioning to implants with complex geometries.

Along with bioactivity, corrosion resistance and coating stability in physiological environments are critically important. Studies show that SPT

coatings are capable of reducing the corrosion rate of titanium; however, the magnitude of the protective effect depends on the density/defect density of the layer, porosity, and chemical composition [13; 14]. Of particular interest is the behavior of materials in solutions simulating in vivo conditions (e.g., Ringer's solution), where corrosion kinetics and long-term surface stability are evaluated [15]. Furthermore, for bioactive systems, it is important to control the potential release of coating components into the biological environment, which affects the durability of the layer and biological safety [16].

Current developments in MAO are also linked to targeted functional alloying of coatings and the creation of “multifunctional” surfaces: antibacterial, osteogenic, and wear-resistant. It has been shown that the introduction of Ag, Sr, Zn, and other elements/compounds can provide an antibacterial effect and stimulate osteogenesis; however, this requires optimization of the composition and control of the release of active components [17]. The influence of nano-additives on improving wear resistance and altering the microstructure of the MDA layer is noted separately. A number of studies investigate combined technologies (e.g., thermal spraying + MDA) aimed at improving wear resistance and overall performance characteristics [18].

Despite significant progress, questions remain in the literature regarding the correlation between the physicochemical characteristics of MAO coatings (thickness, porosity, phase composition, elemental distribution) and their corrosion behavior and functional properties under varying process conditions and electrolyte compositions [18]. Additionally, the development of approaches to MAO modification of titanium products obtained by additive manufacturing is relevant, since their initial structure and surface roughness can significantly affect the kinetics of coating formation and its uniformity [19].

In this regard, the objective of this study is to investigate the physicochemical characteristics of coatings formed by the micro-arc oxidation method on a titanium alloy, including an analysis of morphology and microstructure, phase composition, and elemental distribution, as well as an evaluation of corrosion behavior and functional properties depending on the coating formation conditions. The results obtained can be used to determine optimal MEO conditions for the creation of coatings for medical applications.

Materials and Methods

The substrate used was the Ti-13Nb-13Zr titanium alloy, widely used in medical implants due to its high corrosion resistance, biocompatibility, and reduced elastic modulus, which is close to that of bone tissue. Five 2-mm-thick samples were prepared for the experiment. Prior to surface treatment, the samples underwent mechanical grinding, ultrasonic cleaning in ethanol, rinsing in distilled water, and sandblasting to create the necessary roughness and improve coating adhesion to

the substrate. Calcium phosphate coatings were formed on an NHWYM-750-40 series single-pulse power supply unit using the micro-arc oxidation (MAO) method in an aqueous electrolyte containing 30 % phosphoric acid (H_3PO_4), 60 g/L of hydroxyapatite $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (HA), and 90 g/L of calcium carbonate ($CaCO_3$). Five MAO regimes were employed in this study, differing in a combination of electrical and temporal parameters, including voltage, current, frequency, and treatment duration (Table 1). Since these parameters were varied simultaneously, the observed differences in the structure and properties of the coatings were considered to result from the combined effect of the MAO processing conditions rather than being attributed to the influence of any single parameter.

After treatment, the samples were rinsed with distilled water and dried at room temperature.

Table 1 – Micro-arc oxidation conditions

Sample	Voltage (U), V	Current, A	Coating deposition time of coatings, min	AC (DC) frequency, Hz
MAO_1	300	0.49	10	200
MAO_2	400	1	15	200
MAO_3	500	2	7	300
MAO_4	450	3	3	200
MAO_5	350	1	15	200

The microstructural features of the coatings were investigated using scanning electron microscopy (SEM) on a TESCAN VEGA 4 LMH microscope (Brno, Czech Republic), equipped with an energy-dispersive X-ray spectrometer (EDS) Xplore 30 (Oxford Instruments, UK) for detailed elemental analysis. EDS was performed along a specified line to determine the elemental distribution across the cross-section.

Coating thickness was evaluated using an Olympus BX53M metallographic microscope (Olympus Corporation, Hachioji, Tokyo, Japan). Cross-sectional SEM images were analyzed for each coating.

Surface roughness (Ra) was measured for each sample at five different points using an SSR300+ profilometer (Hangzhou Mituolinke Technology Co., Ltd., Hangzhou, China).

The mechanical properties of the coatings were investigated by instrumented microindentation using a FISCHERSCOPE HM2000 measurement system in accordance with DIN EN ISO 14577-1. A four-sided Vickers diamond pyramid with an angle of 136° between opposite faces was used as the indenter. The maximum test load was 30 mN and was reached within 15 s. The holding time at the

maximum load was 5 s. The indenter approach velocity to the sample surface was $2 \mu\text{m/s}$. The load-indentation depth curves were recorded and initially processed using WIN-HCU software. Based on the test results, Martens hardness (HM), indentation hardness (HIT), Vickers hardness (HV), and indentation modulus (EIT) were determined.

The adhesion strength and fracture resistance of the MAO coatings were evaluated by scratch testing using an Anton Paar RST 300 scratch tester (S/N: 1000197707) in linear progressive scratch mode. A Rockwell-type diamond indenter (S/N: BE-211) with a tip radius of $200 \mu\text{m}$ was used. The normal load (F_n) was linearly increased from 0.5 to 40 N at a loading rate of 47.4 N/min. The scratch length was 5 mm, and the indenter sliding speed was 6 mm/min. During the test, the normal load (F_n), tangential force (F_t), and acoustic emission (Ae) signal were continuously recorded. The critical loads corresponding to coating failure were determined based on a combined analysis of changes in the mechanical signals and optical examination of the scratch track.

Results and Discussion

Figure 1 shows the microstructures of the coating cross-sections. The thickness of the MAO coatings was determined from cross-sections using optical microscopy at a magnification of $\times 20$. Three thickness measurements were performed for each sample.

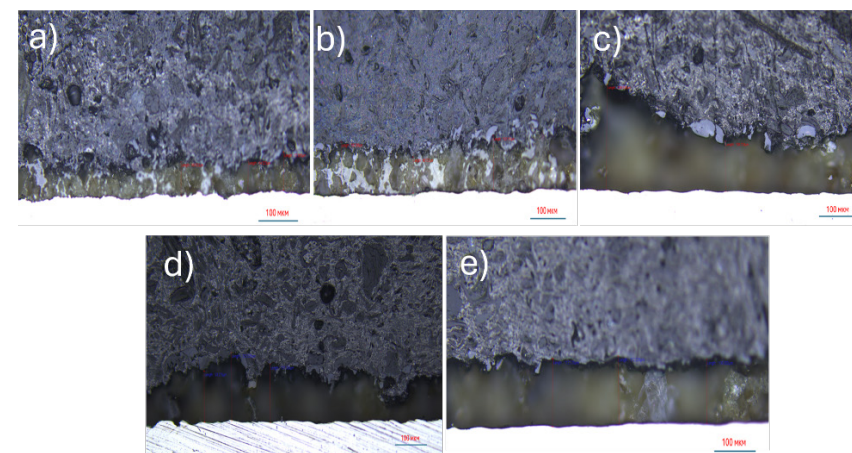


Figure 1 – Cross -sectional microstructures of the coating
(a) MAO_1, (b) MAO_2, (c) MAO_3, (d) MAO_4, (e) MAO_5

The coating thickness was determined by optical microscopy on cross-sectional specimens using an Olympus BX53M microscope. For each sample,

measurements were performed at three predefined, approximately equidistant locations along the coating cross-section. At each location, the distance from the substrate–coating interface to the outer surface of the coating was measured. The obtained values were used to calculate the mean coating thickness. The mean coating thickness and standard deviation should be reported separately for each sample in a summary table.

All samples exhibit a well-developed porous morphology of the outer layer, featuring rounded and elongated pores formed as a result of micro-arc discharges during the oxidation process. The coating thickness varies across the different samples, which is attributed to differences in the coating formation conditions and the intensity of the discharge processes. At the interface between the coating and the titanium alloy (), a continuous transition layer is observed without pronounced delamination defects, indicating high adhesion of the coating to the titanium alloy. In samples MAO_2, MAO_3, MAO_4, a more developed porous structure with increased pore size is observed, which may be associated with the increased energy of micro-arc discharges and more intensive growth of the oxide layer. In the MAO_1 and MAO_5 samples, the coating structure is characterized by a more uniform thickness and a lower degree of porosity.

Scanning electron microscopy (SEM) using a TESCAN VEGA 4 LMH microscope (Brno, Czech Republic) allowed us to determine the porosity, the nature of crater-like structures, the coating thickness, the condition of the “coating–substrate” transition zone, and to identify microdefects. The obtained data were used to analyze the influence of micro-arc oxidation conditions on the formation of the structure and the operational properties of the coatings.

Figure 2 shows SEM images of cross-sections of coatings formed by the micro-arc oxidation method on a Ti-13Nb-13Zr alloy. The coatings have a two-layer structure typical of MAO, directly adjacent to the metal substrate.

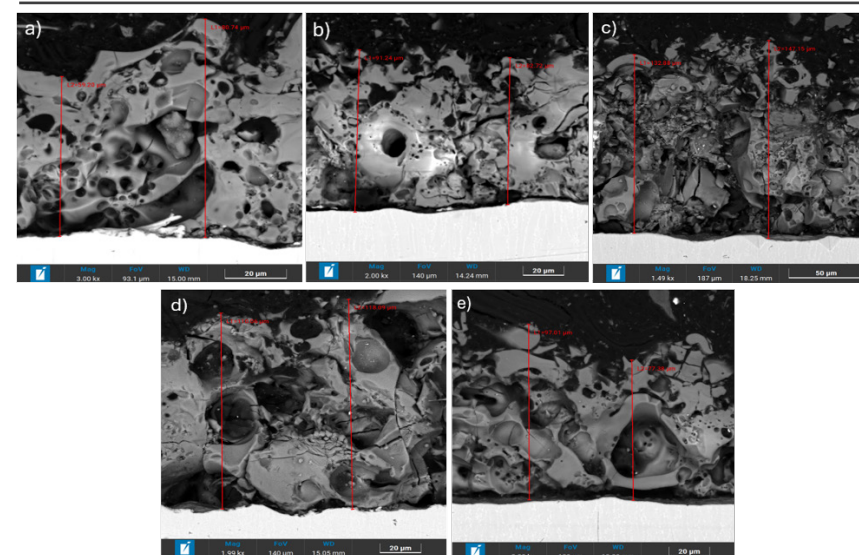


Figure 2 – SEM images of MAO sample coatings
(a) MAO_1, (b) MAO_2, (c) MAO_3, (d) MAO_4, (e) MAO_5

To assess the distribution of chemical elements across the coating thickness, linear energy-dispersive analysis was performed across a cross-section of the MAO layer. The micrographs show the scan line extending from the coating surface to the metal substrate. The resulting element intensity distributions are presented as depth concentration profiles.

Figure 3 shows the EDDA analysis of samples (a) MAO_1, (b) MAO_2, (c) MAO_3, (d) MAO_4, and (e) MAO_5.

The overall comparative analysis of the EDS line profiles revealed a non-uniform distribution of Ca, P, and O throughout the thickness of the MAO coatings. In addition, a Si signal was detected in all investigated samples, with its intensity varying along the EDS line scan. Since silicon was not included in the specified composition of either the Ti-13Nb-13Zr alloy or the electrolyte used for MAO, the origin of this signal requires further verification. Therefore, the detected Si signal was not interpreted as a constituent directly incorporated into the coating during the MAO process.

Based on a generalized comparative analysis of this figure, we can conclude that all samples exhibit an uneven distribution of Ca, P, Si, and O across the coating thickness without a pronounced gradient. The profiles exhibit a fluctuating character with local maxima caused by the porous structure and discharge channels. At the “coating–substrate” interface, a sharp increase in the Ti, Nb,

and Zr signals is observed, indicating a distinct boundary and the absence of a developed diffusion layer. Samples MAO_1 and MAO_5 are characterized by a more uniform distribution of elements and a smaller amplitude of fluctuations. Sample MAO_2 exhibits local concentration peaks of Ca and P. Samples MAO_3 and MAO_4 are distinguished by the greatest distribution heterogeneity, associated with developed porosity and intense micro-arc discharges.

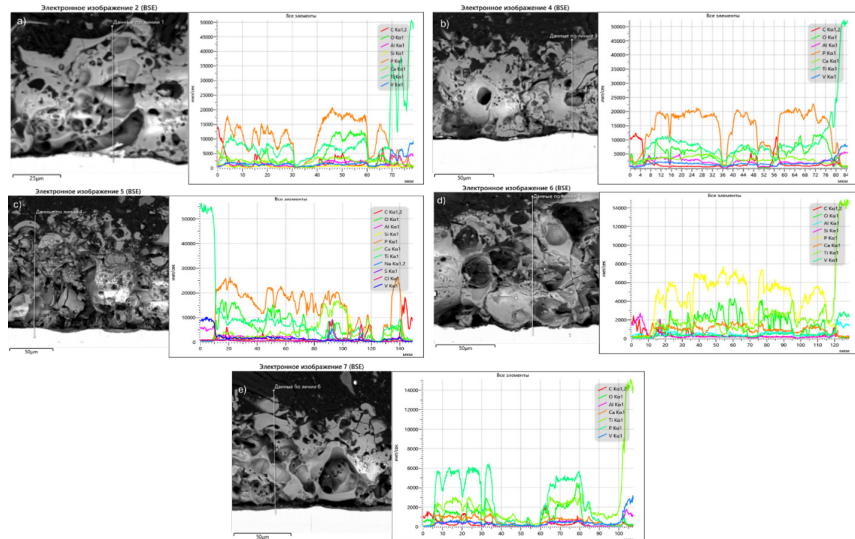


Figure 3 – SEM analysis of samples (a) MAO_1, (b) MAO_2, (c) MAO_3, (d) MAO_4, (e) MAO_5

Surface roughness (Ra) was measured to quantitatively assess the topography of the MAO coatings and determine the influence of micro-arc oxidation modes on the formation of the surface relief. The Ra parameter (arithmetic mean deviation of the profile) characterizes the average height of micro-irregularities and is one of the key indicators of coating quality and functionality. The obtained values were used to analyze the relationship between surface morphology, bioactivity, and the mechanical properties of the coatings.

Figure 4 presents the measurement results for samples (a) MAO_1, (b) MAO_2, (c) MAO_3, (d) MAO_4, (e) MAO_5 in the form of profilograms. The profilograms demonstrate a pronounced undulating relief pattern caused by crater-like pores, zones of local remelting, and uneven growth of the oxide layer during micro-arc oxidation. The maximum roughness is observed in the MAO_2 sample, which is associated with the presence of pronounced peaks and valleys

caused by intense micro-arc discharges. The MAO_3 and MAO_4 samples exhibit comparable Ra values ($\sim 10 \mu\text{m}$) with a well-developed relief of medium intensity. The MAO_5 sample is characterized by moderate roughness and a smoother profile. The minimum Ra value was recorded in the MAO_1 sample, indicating the formation of a more uniform surface with a smaller amplitude of irregularities.

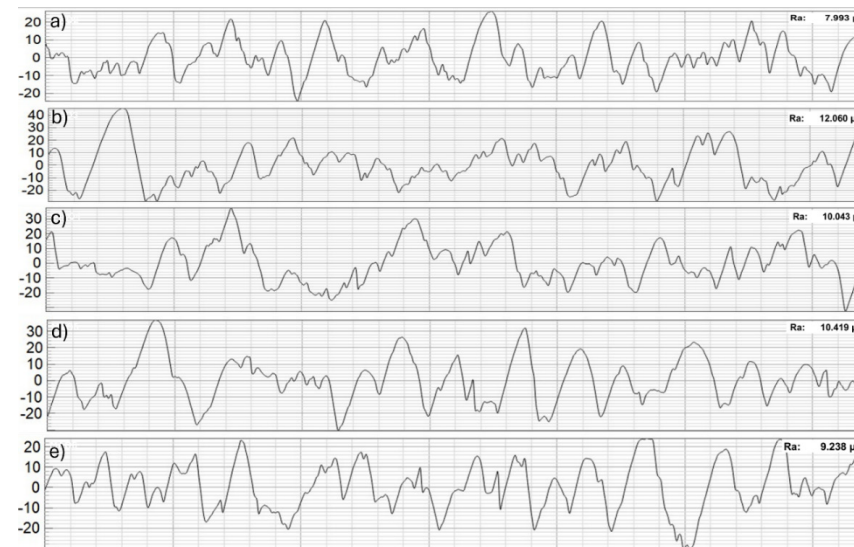


Figure 4 – Roughness profiles of samples (a) MAO_1, (b) MAO_2, (c) MAO_3, (d) MAO_4, (e) MAO_5

The mechanical properties of the micro-arc-sprayed coatings were determined using the instrumented microindentation method on a FISCHERSCOPE HM2000 instrument (Helmut Fischer GmbH, Sindelfingen, Germany). During the tests, a “load–displacement” curve was recorded, based on which microhardness (HM) and elastic modulus (EIT) were calculated, and the mechanical properties of the coatings were evaluated based on microhardness (HV) values. The obtained data were used to assess the influence of MDP conditions on the mechanical strength and performance characteristics of the coatings. Microhardness (HM) characterizes the material’s resistance to local plastic deformation, which allows for evaluating the degree of oxide layer compaction in MAO coatings, comparing the effects of MAO conditions, and determining the coating’s wear resistance. The elastic modulus (EIT) is determined by the slope of the unloading curve and characterizes the elastic properties of the coating, allowing for an assessment of the oxide layer’s

stiffness; analysis of the elastic modulus's correspondence to that of bone (for biomedical applications); and prediction of crack resistance.

The highest hardness value (HV) is observed in the MAO_3 sample, reaching approximately 420 HV, which is nearly twice the hardness of the parent Ti-13Nb-13Zr alloy (~220–250 HV). The increase in hardness is associated with the formation of a dense TiO₂ oxide layer, the development of a ceramic-like structure, and a reduction in the proportion of defects in the coating. The lowest hardness was observed in the MAO_1 sample, which may be due to increased porosity and insufficient density of the formed layer (Figure 5).

The maximum elastic modulus (EIT) is also observed in MAO_3, indicating the formation of the stiffest coating structure. The increase in EIT indicates an increase in the density of the oxide phase, improved interphase bonding, and a decrease in the microporosity of the coating.

The highest HM values (resistance to plastic deformation) are characteristic of the MAO_2 and MAO_3 samples, indicating high resistance of the coatings to plastic deformation and wear.

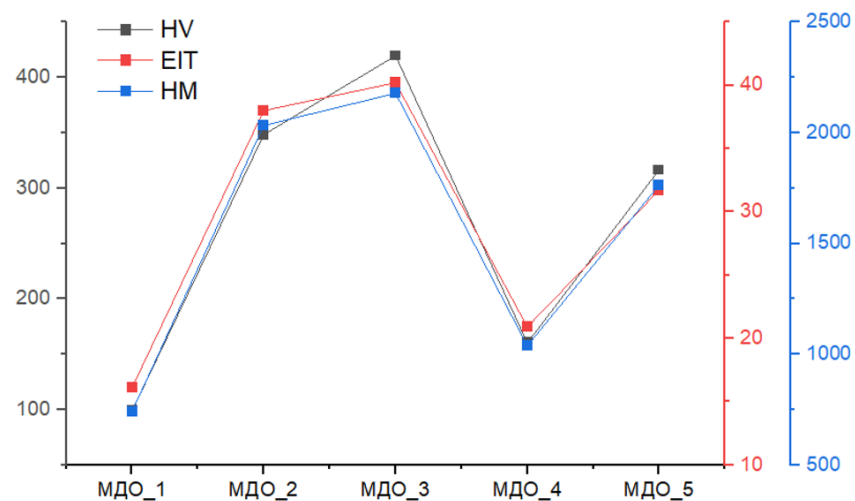


Figure 5 – Scratch test results for samples (a) MAO_1, (b) MAO_2, (c) MAO_3, (d) MAO_4, (e) MAO_5

Thus, the parameters of micro-arc oxidation have a significant influence on the formation of the mechanical properties of the coatings. The highest values of hardness, elastic modulus, and yield strength were obtained for the MAO_3 sample, which indicates the formation of the densest and most mechanically stable oxide structure.

To evaluate the adhesion strength and fracture resistance of micro-arc oxide coatings on the Ti-13Nb-13Zr alloy, tests were conducted on an Anton Paar RST 300 scratch tester (S/N: 1000197707) in linear progressive scratching mode. The progressive scratching method involves a gradual increase in the load on the diamond indenter as it moves across the coating surface, which allows the critical failure loads to be determined. The scratch test allows the following to be established: Lc1 – the load at which microcracks begin to form; Lc2 – the load at which local coating failure begins; Lc3 – the load at which intense coating failure or delamination occurs.

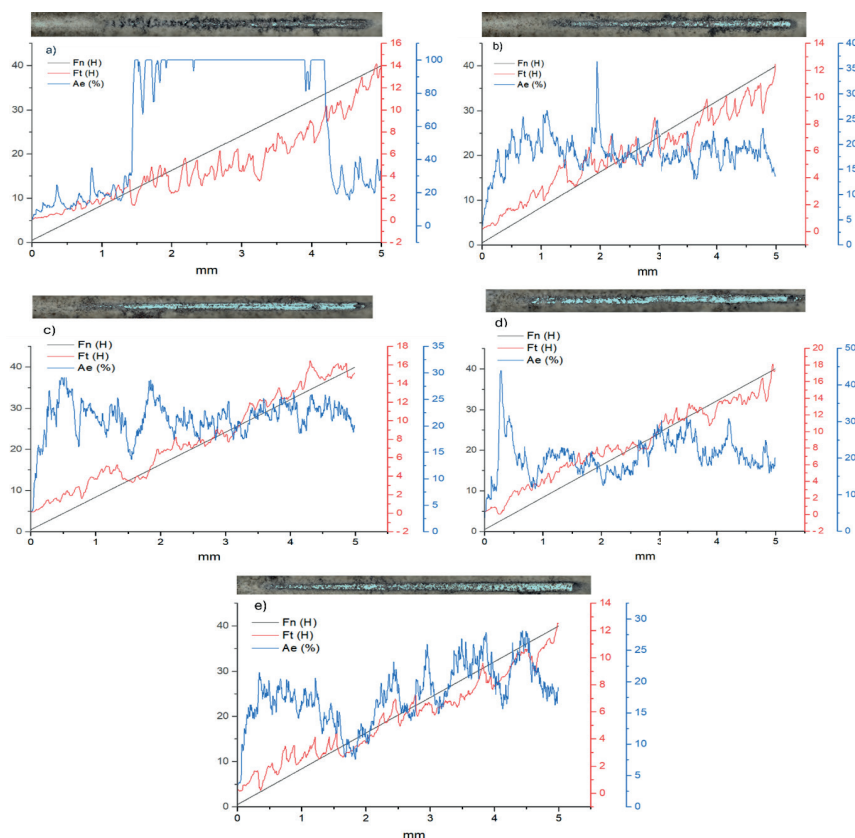


Figure 6 – Scratch test results for samples (a) MAO_1, (b) MAO_2, (c) MAO_3, (d) MAO_4, (e) MAO_5

These parameters characterize the adhesion strength of the coating to the substrate. The method allows determining the oxide layer's resistance to cracking; resistance to chipping; and susceptibility to brittle fracture. The scratch test was used to compare samples obtained under different conditions; to determine the optimal MAO parameters; and to evaluate the influence of thickness and porosity on strength. This method ensures a continuous increase in load and the identification of several stages of failure in a single pass.

During the tests, the normal load F_n , the tangential force F_t , and the acoustic emission A_e , which characterizes the coating failure processes, were recorded. The analysis was performed for five samples: (a) MAO_1, (b) MAO_2, (c) MAO_3, (d) MAO_4, (e) MAO_5 (Figure 6).

A comparative analysis of the scratch test results for MAO coatings shows that in all samples, a gradual increase in friction force (F_t) is observed with increasing load, which corresponds to the normal loading mechanism of the coating. Differences between the samples are evident in signal stability and the nature of the friction coefficient fluctuations. The most stable behavior and high resistance to failure are characteristic of the MAO_3 and MAO_5 samples. The MAO_1 and MAO_4 samples demonstrate signs of early failure, while MAO_2 occupies an intermediate position.

Information about funding

This research was carried out with financial support from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant No. BR24992862).

Conclusion

This work demonstrates that micro-arc oxidation regimes significantly influence the formation of the structure, composition, and properties of calcium phosphate coatings on the Ti-13Nb-13Zr alloy. The formed coatings have a two-layer structure with a porous outer layer and a dense barrier sublayer, ensuring high adhesion.

It has been established that an increase in discharge intensity leads to an increase in thickness (68–162 μm), an increase in roughness ($R_a = 7.99\text{--}12.06 \mu\text{m}$), and the development of a porous structure without a pronounced element distribution gradient. At the same time, excessive porosity is accompanied by an increase in structural heterogeneity.

The best mechanical properties (up to 420 HV, high elastic modulus, and resistance to plastic deformation), as well as high adhesion strength and fracture resistance, were obtained for coatings formed under optimal conditions (MAO_3–MAO_5).

The results confirm that micro-arc oxidation parameters significantly influence the adhesion strength and wear resistance of coatings on the Ti-13Nb-

13Zr alloy, and also confirm the possibility of targeted optimization of MADO parameters for the formation of bioactive and mechanically stable coatings for medical applications. The coatings formed under conditions that ensure the formation of a uniform porous structure and a dense barrier layer exhibited the most optimal mechanical properties.

The biological properties and corrosion resistance were not experimentally investigated in the present study; therefore, the potential medical applications and bioactivity of the coatings require separate experimental verification.

REFERENCES

- 1 Dziaduszevska, M., Shimabukuro, M., Seramak, T., Zielinski, A., Hanawa, T. Effects of Micro-Arc Oxidation Process Parameters on Characteristics of Calcium-Phosphate-Containing Oxide Layers on the Selective Laser Melted Ti13Zr13Nb Alloy // Coatings. – 2020. – Vol. 10. – № 8. – P. 745. – <https://doi.org/10.3390/coatings10080745>
- 2 Simka, W., Krzakała, A., Maselbas, M., Dercz, G., Szade, J., Winiarski, A., Michalska, J. Formation of Bioactive Coatings on Ti–13Nb–13Zr Alloy for Hard Tissue Implants // RSC Advances. – 2013. – Vol. 3. – P. 11195–11204. – <https://doi.org/10.1039/c3ra23256e>
- 3 Gołasz, P., Płoska, A., Korniienko, V., Diedkova, K., Varava, Y., Zieliński, R., Pogorielov, M., Simka, W. Modification of Ti13Nb13Zr Alloy Surface via Plasma Electrolytic Oxidation and Silver Nanoparticles Decorating // Materials. – 2025. – Vol. 18. – № 2. – P. 349. – <https://doi.org/10.3390/ma18020349>
- 4 Sypniewska, J., Pawłowski, Ł., Mirowska, A., Szkodo, M. Hybrid Enrichment of Ti13Nb13Zr Alloy with Zinc Ions and Silver Nanoparticles Using a Combination of Micro-Arc Oxidation and Electrophoretic Deposition // Scientific Reports. – 2025. – № 15. – P. 30769. – <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11620-8>
- 5 Sharkeev, Y., Komarova, E., Sedelnikova, M., Sun, Z., Zhu, Q.-F., Zhang, J., Tolkacheva, T., Uvarkin, P. Structure and Properties of Micro-Arc Calcium Phosphate Coatings on Pure Titanium and Ti–40Nb Alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2017. – №27(1), P. 125–133. – [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60014-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60014-1)
- 6 Qin, J., Chen, Y., Chen, C., Zhong, S., Yan, Z., Liu, W., Wang, Y., Lai, X., Zhao, Y., Zhao, R., et al. Preparation of HA-Containing Coating by One-Step MAO on Titanium Alloys through Synergistic Effect of Calcium Gluconate and Calcium Glycerophosphate // Surface and Coatings Technology. – 2023. – № 466, P. 129655. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129655>

7 **Chen, J.-Z., Shi, Y.-L., Wang, L., Yan, F.-Y., Zhang, F.-Q.** Preparation and Properties of Hydroxyapatite-Containing Titania Coating by Micro-Arc Oxidation // *Materials Letters*. – 2006. – № 60(20). – P. 2538–2543. – <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.01.035>

8 **Yao, Z.Q., Ivanisenko, Yu., Diemant, T., Caron, A., Chuvilin, A., Jiang, J.Z., Valiev, R.Z., Qi, M., Fecht, H.-J.** Synthesis and Properties of Hydroxyapatite-Containing Porous Titania Coating on Ultrafine-Grained Titanium by Micro-Arc Oxidation // *Acta Biomaterialia*. – 2010. – Vol. 6. – № 7. – P. 2816–2825. – <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.12.053>

9 **Ni, J.H., Shi, Y.-L., Yan, F.-Y., Chen, J.-Z., Wang, L.** Preparation of Hydroxyapatite-Containing Titania Coating on Titanium Substrate by Micro-Arc Oxidation // *Materials Research Bulletin*. – 2008. – № 43(1). – P. 45–53. – <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2007.02.019>

10 **Zhao, Q., Yi, L., Jiang, L., Ma, Y., Lin, H., Dong, J.** Surface Functionalization of Titanium with Zinc/Strontium-Doped Titanium Dioxide Microporous Coating via Microarc Oxidation // *Nanomedicine*. – 2019. – № 16. – P. 149–161. – <https://doi.org/10.1016/j.nano.2018.12.006>

11 **Zhang, Y.-Y., Zhu, Y., Lu, D.-Z., Dong, W., Bi, W.-J., Feng, X.-J., Wen, L.-M., Sun, H., Qi, M.-C.** Evaluation of Osteogenic and Antibacterial Properties of Strontium/Silver-Containing Porous TiO₂ Coatings Prepared by Micro-Arc Oxidation // *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. – 2021. – № 109(4), P. 505–516. – <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34719>

12 **Zhassulan, A., Rakhadilov, B., Baizhan, D., Kengesbekov, A., Kakimzhanov, D., Musataeva, N.** Influence of TiO₂ Nanoparticle Concentration on Micro-Arc Oxidized Calcium–Phosphate Coatings: Corrosion Resistance and Biological Response // *Coatings*. – 2025. – № 15(10). – P. 1142. – <https://doi.org/10.3390/coatings15101142>

13 **Rakhadilov, B., Zhassulan, A., Baizhan, D., Shynarbek, A., Ormanbekov, K., Aldabergenova, T.** The Effect of the Electrolyte Composition on the Microstructure and Properties of Coatings Formed on a Titanium Substrate by Microarc Oxidation // *AIMS Materials Science*. – 2024. – № 11(3). – P. 547–564. [Electronic resource] – <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/matersci.2024027>

14 **Li, G., Ma, F., Liu, P., Qi, S., Li, W., Zhang, K., Chen, X.** Review of Micro-Arc Oxidation of Titanium Alloys: Mechanism, Properties and Applications // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – № 948. – P. 169773. – <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169773>

15 **Ming, X., Wu, Y., Zhang, Z., Li, Y.** Micro-Arc Oxidation in Titanium and Its Alloys: Development and Potential of Implants // *Coatings*. – 2023. – №13(12), P. 2064. – <https://doi.org/10.3390/coatings13122064>

16 **Wen, X., Liu, Y., Xi, F., Zhang, X., Kang, Y.** Micro-Arc Oxidation (MAO) and Its Potential for Improving the Performance of Titanium Implants in Biomedical Applications // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2023. – №11, P. 1282590. – <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1282590>

17 **Komarova, E. G., Sharkeev, Y. P., Sedelnikova, M. B., Prosolov, K. A., Khlusov, I. A., Prymak, O., Epple, M.** Zn- or Cu-Containing CaP-Based Coatings Formed by Micro-Arc Oxidation on Titanium and Ti-40Nb Alloy: Part I–Microstructure, Composition and Properties // *Materials*. – 2020. – №13(18), P. 4116. – <https://doi.org/10.3390/ma13184116>

18 **Kozelskaya, A. I., Rutkowski, S., Frueh, J., Gogolev, A. S., Chistyakov, S. G., Gnedenkov, S. V., Sinebryukhov, S. L., Frueh, A., Egorkin, V. S., Choyzonov, E. L., et al.** Surface Modification of Additively Fabricated Titanium-Based Implants by Means of Bioactive Micro-Arc Oxidation Coatings for Bone Replacement // *Journal of Functional Biomaterials*. – 2022. – №13(4), P. 285. – <https://doi.org/10.3390/jfb13040285>

19 **Kozelskaya, A. I., Verzunova, K. N., Akimchenko, I. O., Frueh, J., Petrov, V. I., Slepchenko, G. B., Bakina, O. V., Lerner, M. I., Brizhan, L. K., Davydov, D. V., et al.** Antibacterial Calcium Phosphate Coatings for Biomedical Applications Fabricated via Micro-Arc Oxidation // *Biomimetics*. – 2023. – №8(5), P. 444. – <https://doi.org/10.3390/biomimetics8050444>

Received 17.08.26.

Received in revised form 17.08.26.

Accepted for publication 14.09.26.

*А. К. Кочнева¹, А. Серікбайқызы², А. Н. Асхатов³,

Н. Жасұланұлы⁴, Н. Е. Бердімұратов⁵

^{1,2,3,4}Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан

техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;

⁵Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

17.08.26 ж. баспаға түсті.

17.08.26 ж. түзетулерімен түсті.

14.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТИТАН ҚОРЫТПАСЫНДА МИКРОДОҒАЛЫҚ ОКСИДТЕУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН ЖАБЫНДАРДЫҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста $Ti-13Nb-13Zr$ титан қорытпасында микродоғалық оксидтеу (МДО) әдісімен алынған кальций-фосфатты жабындардың физика-химиялық және механикалық қасиеттері зерттелді. Жабындар 30 % H_3PO_4 негізіндегі электролитте гидроксипатит (60 г/л) және $CaCO_3$ (90 г/л) қосу арқылы, кернеу, ток, жиілік және өңдеу уақытының әртүрлі режимдерінде алынды. Жабындардың микроструктурасы мен морфологиясы оптикалық және сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM/EDS) әдістерімен зерттелді. Жабын қалыңдығы МДО режиміне байланысты 68–162 мкм аралығында өзгерді. Беткі кедір-бұдырлық (R_a) 7,99–12,06 мкм диапазонында болды және микродоғалық разрядтардың қарқындылығымен өзара байланыс көрсетті. Механикалық қасиеттері аспаптық микроиндентация әдісімен анықталды. Ең жоғары микроқаттылық (420 HV дейін), серпімділік модулі және пластикалық деформацияға төзімділік 500 В және 2 А режимінде алынған үлгіде байқалды. Жүргізілген скретч-сынақтар жабындардың жоғары адгезиялық беріктігін және катастрофалық қабыршақтанудың болмауын растады. Қалыңдық, кеуектілік және механикалық тұрақтылықтың ең оңтайлы үйкесімі МДО_4 – МДО_5 үлгілерінде байқалды. Алынған нәтижелер микродоғалық оксидтеу режимдерінің жабынның өсу кинетикасына, кеукті құрылымының қалыптасуына және эксплуатациялық қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Бұл медициналық мақсаттағы биоактивті және механикалық тұрақты жабындарды алу үшін МДО параметрлерін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: микродоғалық оксидтеу, титан қорытпасы, $Ti-13Nb-13Zr$, оксидтік жабындар, кальций-фосфатты жабын, МДО, физика-химиялық қасиеттер, микроқаттылық, адгезиялық беріктік, коррозияға төзімділік.

*А. К. Кочнева¹, А. Серікбайқызы², А. Н. Асхатов³,
Н. Жасұланұлы⁴, Н. Е. Бердімуратов⁵

^{1,2,3,4}Восточно-Казахстанский технический
университет имени Д. Серикбаева,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;

⁵Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
Поступило в редакцию 17.08.26.
Поступило с исправлениями 17.08.26.
Принято в печать 14.09.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ

В работе исследованы физико-химические и механические свойства кальций-фосфатных покрытий, сформированных методом микродугового оксидирования (МДО) на титановом сплаве $Ti-13Nb-13Zr$. Покрытия получали в электролите на основе 30 % H_3PO_4 с добавлением гидроксипатита (60 г/л) и $CaCO_3$ (90 г/л) при различных режимах напряжения, тока, частоты и времени обработки. Микроструктура и морфология покрытий исследованы методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (SEM/EDS). Толщина покрытий варьировалась от 68 до 162 мкм в зависимости от режима МДО. Шероховатость поверхности (R_a) находилась в диапазоне 7,99–12,06 мкм и коррелировала с интенсивностью микродуговых разрядов. Механические свойства определяли методом инструментированного микроиндентирования. Максимальные значения микротвёрдости (до 420 HV), модуля упругости и сопротивления пластической деформации получены для образца, сформированного при 500 В и 2 А. Проведённые скретч-испытания подтвердили высокую адгезионную прочность покрытий и отсутствие катастрофического отслаивания. Наилучшее сочетание толщины, пористости и механической устойчивости продемонстрировали образцы МДО_4 – МДО_5. Полученные результаты подтверждают существенное влияние режимов микродугового оксидирования на кинетику роста покрытия, формирование пористой структуры и эксплуатационные характеристики, что позволяет оптимизировать параметры МДО для получения биоактивных и механически устойчивых покрытий медицинского назначения.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, титановый сплав, $Ti-13Nb-13Zr$, оксидные покрытия, кальций-фосфатное покрытие, МДО, физико-химические свойства, микротвёрдость, адгезионная прочность покрытий, коррозионная стойкость.

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/200-213>

**К. М. Маханов¹, *А. К. Салькеева², А. С. Кусенова³,
Р. И. Шакирзянов⁴, Ж. К. Смагулов⁵**

¹Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;

²Карагадинский технический университет имени А. Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;

³Карагадинский технический университет имени А. Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;

⁴Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;

⁵Карагадинский университет имени академика Е. А. Букетова,
Республика Казахстан, г. Караганда.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1263-0734>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2277-7959>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0497-7014>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9908-3034>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3412-973X>

*e-mail: salkееva58@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

В данной работе представлены результаты исследования радиопоглощающих материалов в сверхвысокочастотном диапазоне 80-120 ГГц. В качестве основного радиопоглощающего материала рассмотрен порошок графита кристаллического типа. Подготовка материала осуществлялась путем перемешивания частиц графита определенной размерности с эпоксидной смолой. Частицы графита используются в качестве наполнителей в исследуемых материалах. Выбор объекта исследования не случаен, так как исследования радиофизических параметров графита показали перспективность его применения в качестве наполнителей. В качестве подложки и связующего материала использована эпоксидная смола. Образцы готовились путем продувки порошка по поверхности подложки из эпоксидной смолы. Экспериментальным путем установлена наиболее эффективная рабочая толщина эпоксидной смолы. Рассчитаны

геометрические размеры расположения компонентов установки, при котором наблюдается наиболее эффективная регистрация сигнала. Результаты исследований показали, что пленка, состоящая из частиц графита на поверхности эпоксидной смолы, эффективно экранирует радиоизлучение в субмиллиметровом диапазоне.

Полученный материал полностью соответствует необходимым критериям, а именно: «высокая эффективность защиты – невысокие затраты на изготовление». Получение радиопоглощающих материалов полностью соответствует целям устойчивого развития инфраструктуры телекоммуникаций и инноваций в этой области.

Ключевые слова: Радиопоглощающие материалы, электромагнитное излучение, графит, сверхвысокая частота, эпоксидная смола.

Введение

Развитие современной радиоэлектронной техники, особенно в области сверхвысоких частот (СВЧ), привело к глобальной проблеме электромагнитного загрязнения, которое может оказывать негативное влияние на работу радиотехнического оборудования. Увеличивается количество различных источников электромагнитного излучения (ЭМИ), расширяется используемый диапазон частот. Активное использование оборудования, работающего в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, в исследовательских лабораториях, в военной Развитие современной радиоэлектронной техники, особенно в области сверхвысоких частот (СВЧ), привело к глобальной проблеме электромагнитного загрязнения, которое может оказывать негативное влияние на работу радиотехнического оборудования. Увеличивается количество различных источников электромагнитного излучения (ЭМИ), расширяется используемый диапазон частот. Активное использование оборудования, работающего в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, в исследовательских лабораториях, в военной технике, в медицине вызвало появление ряда специфических проблем. Особенно остро проблемы отразились при использовании медицинского оборудования [1; 2]. Все это требует решения проблем, связанных с защитой от воздействия ЭМИ в широком диапазоне частот [3]. При использовании электромагнитных волн в технике, приходится сталкиваться с такой проблемой, как потеря этих волн в атмосфере Земли, а также в других средах и материалах. Поглощение электромагнитных волн в коротковолновой части миллиметрового диапазона стало одной из актуальных задач радиофизики [4]. В целях устойчивого развития, принятой

25 сентября 2015 года ООН резолюции «Преобразования нашего мира», исследование поглощения электромагнитных волн необходима для развития инфраструктуры телекоммуникаций и других практических приложений. Использование радиопоглощающих материалов необходимо для инноваций в этой области развития.

Радиопоглощающие материалы (РПМ), способные поглощать или ослаблять радиоволновое излучение являются одним из эффективных средств решения этих проблем [5]. Такими материалами являются ферриты [5], металлические сплавы [6], графит [7], углеродные нанотрубки [8] и другие. Таким образом, материал может быть изготовлен с использованием компонентов, способных поглощать или отражать радиоволновое излучение.

Целью данной работы является разработка и исследование радиоматериалов, эффективно поглощающих ЭМИ в диапазоне 80–120 ГГц. Разрабатываемые радиоматериалы должны удовлетворять соотношению «высокая эффективность защиты – невысокие затраты на изготовление».

Объектом исследования являются частицы графита, встроенные в матрицу связующего материала. Выбор объекта исследования обусловлен наличием большого количества работ, посвященных исследованию радиофизических параметров графита, перспективностью применения частиц графита в качестве наполнителей в исследуемых материалах. В частности, следующий этап исследований будет посвящен изготовлению полимерных пленок с наполнителями из частиц графита разных размеров.

В качестве связующего компонента использовали эпоксидную смолу. Эпоксидная смола легко прилипает к поверхности, нуждающейся в защите от ЭМИ, и устойчива к различным давлениям, действующим на поверхность [9]. Однако, авторами не рассматриваются вопросы, связанные с толщиной эпоксидной смолы.

Частицы графита предварительно смешивались в определенной пропорции в растворе эпоксидной смолы. Исследуемые пленочные образцы получены путем нанесения смеси различного объема на стеклянные подложки, прозрачные в рассматриваемом радиодиапазоне.

Определение толщины пленок осуществлено путем преобразования формулы для расчета объема ($V = abc, c = V / ab$), где V – объем, a – ширина, b – длина $c=h$ – толщина эпоксидной смолы. Полученные значения толщины образцов для эпоксидной смолы различного объема: при $V=5\text{мл}$, $h_1 = 0,8\text{мм}$; при $V=10\text{ мл}$, $h_2 = 1,7\text{мм}$; при $V=15\text{ мл}$, $h_3 = 2,6\text{мм}$.

Материалы и методы

Радиопоглощающим материалом выбран порошок графита – частицы размером 0,2 мм, встроенные в связующую матрицу – эпоксидную смолу марки ЭД-20. При нанесении смеси объемами 5мл, 10мл и 15мл на

стеклянные подложки размером 9,5х6 см получены исследуемые пленочные образцы, поглощающие в сверхвысокочастотном диапазоне 80-120 ГГц.

Экспериментальная установка состоит из генератора сигналов Г4-183М, аттенюатора АП-20, двух рупорных прямоугольных антенн и калориметрического измерителя мощности М1-25 М/03.

На начальном этапе была проведена работа по определению оптимальных соотношении между геометрическими параметрами и частотными характеристиками экспериментальной установки.

При исследовании характеристик радиопоглощающих материалов необходимо предварительно создать условия. Они должны обеспечить возможность выполнения различных действий для повышения измерительных возможностей прибора. Например, обеспечить изменение угла падения ЭМИ, изменение частоты генератора и поляризации электромагнитной волны, попадающей в поглощающий слой (исследуемый материал). Для этого, первые несколько этапов измерений необходимо провести в «пустом пространстве», без объектов исследования.

С учетом вышеизложенных требований, была собрана экспериментальная установка. Для сохранения устойчивости приборов и положения на одном уровне, генератор и калориметр установили на специальные металлические основы. Для вращения исследуемого образца использовали поворотную платформу Standa.

Внешний вид собранной экспериментальной установки показан на рисунке 1.

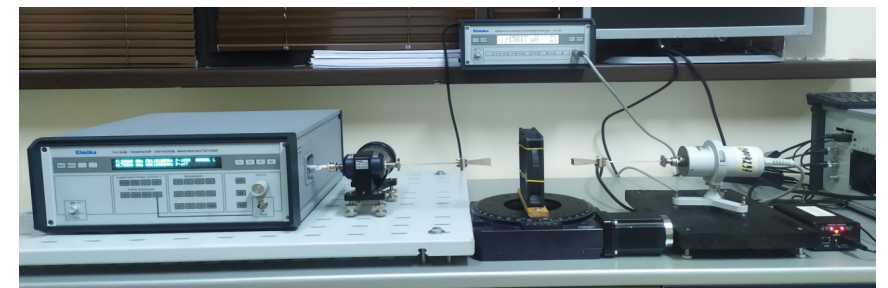


Рисунок 1 – Экспериментальная установка

В собранной установке угол между излучающей и приемной рупорными антеннами небольшой. Поэтому мы в первую очередь определили диаграмму направленности рупорной антенны [10; 11]. Исследования проводились на частоте 98 ГГц. Уровень ослабления (аттенюатор) исходного ЭМИ установили равным 5дБ. Шаг поворота приемной антенны соответствовал 3–5°.

Результаты измерений в плоскостях Е и Н, полученные при изменении угла приемной антенны представлены в таблице 1.

Полученные значения позволили построить диаграмму направленности, а также 3D-модели антенны и диаграммы (рисунок 2).

Построение всех диаграмм и графиков, представленных в работе проведено с помощью программы OriginPro и среды Ansys HFSS.

Таблица 1 – Результаты измерения рупорной антенны в Е и Н плоскостях

Угол		0°	5°	8°	10°	13°	15°	16°	20°
Мощность сигнала, дБ	Е	14,47	12,43	9,54	7,53	1	0	0	0
	Н	15,71	14,59	10,21	9,21	6,98	3,01	1	0

На основании полученных результатов были рассчитаны расстояния, соответствующие эффективному размещению компонентов оборудования в зависимости от размеров исследуемого образца. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

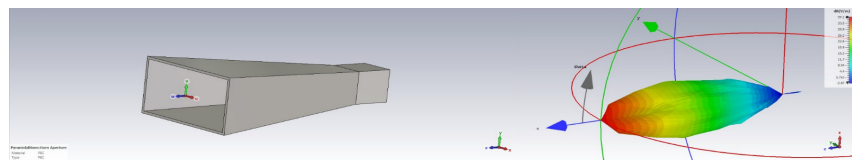
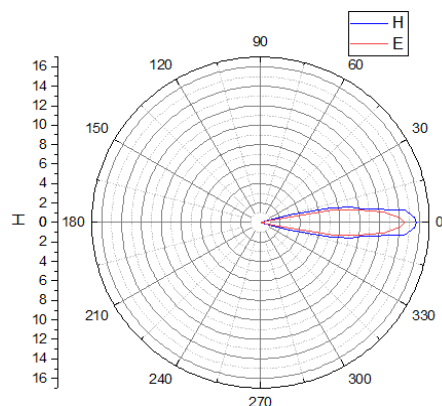


Рисунок 2 – Диаграмма направленности антенны в Е и Н плоскостях, 3D модели антенны и диаграммы направленности

Результаты, представленные в таблице 2 показывают зависимость расстояния между антеннами и образцом от размеров самого исследуемого образца. Изменение размера одной из сторон исследуемого объекта сопровождается обязательной корректировкой расстояния между образцом и антенной. Это необходимо для того, чтобы перекрыть всю область распространения ЭМИ и исключить ошибки регистрации полезного сигнала.

Таблица 2 – Эффективное расстояние в зависимости от ширины и высоты исследуемого объекта

Высота, см Ширина, см	4	5	6	7	8	9	10
3	4,7	7,2	9,10	10,95	12,98	14,88	18,15
4	4,6	7,3	9,10	10,95	12,98	14,88	18,15
5	6,5	7,3	9,10	10,95	12,98	14,88	18,15
6	8,4	8,2	9,10	10,95	12,98	14,88	18,15
7	10,95	10,1	10,1	10,95	12,98	14,88	18,15

Собранная экспериментальная установка позволяет последовательно проводить измерения как коэффициентов пропускания, так и отражения. Это достигается за счет использования автоматизированной поворотной платформы (Standa) и конструкции держателя образца. При необходимости изменения характера экспериментальной работы, общая конструкция установки не нарушается. Соответственно, нет необходимости проведения дополнительных работ, по настройке приборов. Измеренные данные с регистрирующей части могут в автоматическом режиме передаваться в персональный компьютер. Где, в последующем они могут быть обработаны и сохранены в Excel формате.

Таким образом, на данном этапе, была завершена работа по построению и сборке экспериментальной установки. Определена диаграмма направленности и осуществлен расчет геометрического положения компонентов установки относительно друг друга.

Результаты и обсуждение

Для установления безопасного рабочего режима оборудования, предварительно были проведены измерения «пустого пространства» при разных уровнях ослабления сигнала. Уровень ослабления мощности исходного ЭМИ был установлен на 25 дБ. Затем, аттенуатор последовательно открывали с шагом 5 дБ и считывали показания с дисплея калориметрического измерителя. Регистрация коэффициентов поглощения осуществлялась на фиксированных частотах 80 ГГц, 98 ГГц и 120 ГГц. По результатам

измерений был построен график зависимости прошедшего сигнала от частоты и уровня ослабления исходного ЭМИ. Результаты были обработаны и представлены в 3D формате на рисунке 3а. Из рисунка видно, что уровень излучаемого сигнала на крайних частотах ниже, по сравнению с уровнем на частоте 98 ГГц. Наблюдаемое изменение мощности сигнала связано с техническими особенностями экспериментального оборудования. Также установлено, что ослабление ЭМИ, соответствующее 5дБ является наиболее оптимальным. Так как позволяет проводить измерения без ущерба для получаемых результатов и прибору. Дальнейшие измерения проводились при данном значений ослабления.

Следующий этап работы был посвящен определению уровня поглощения подложки из чистой эпоксидной смолы различной толщины. Цель данного этапа заключалась в необходимости выбора предельной толщины и определения ее поглощательных свойств. При которой подложка не оказывала бы влияния на объект исследования.

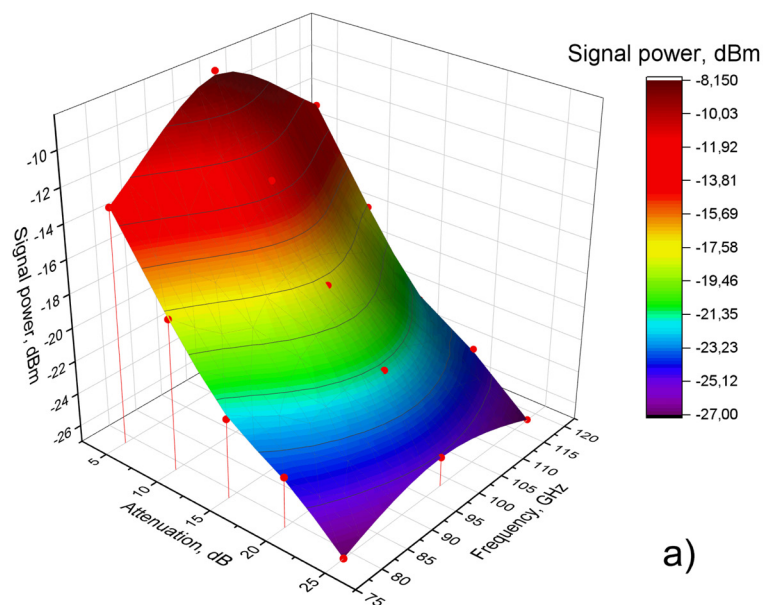


Рисунок 3а – Регистрация «пустого пространства» (а)

Измерения проводились для пленок толщиной 1 мм, 1,5 мм и 2,5 мм соответственно. Регистрация проводилась на трех дискретных частотах 80 ГГц, 98 ГГц и 120 ГГц. Полученные результаты представлены таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измерения пленок эпоксидной смолы различной толщины

f, МГц	Измерения, дБм			
	0 мм	1 мм	1,5 мм	2,5 мм
78000	-17,1	-17,2	-17,2	-20,2
98000	-12,8	-15,4	-11,7	-14,4
120000	-19,4	-17,4	-18,6	-19,5

Графическое представление зависимости, полученной после обработки данных таблицы 3 показано на рисунке 3б.

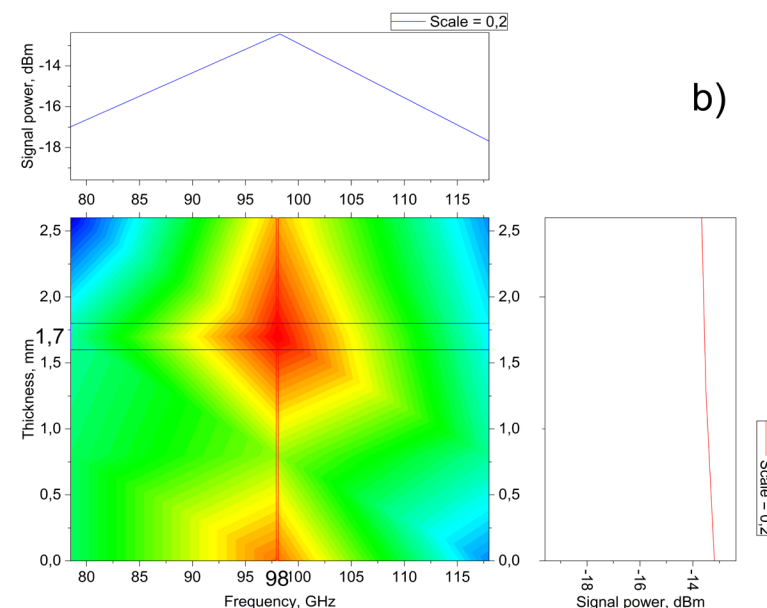


Рисунок 3б – Определение наиболее эффективной толщины эпоксидной смолы (b)

Обзор рисунка 3б показывает, что толщина эпоксидной смолы равной 1,5 мм является наиболее оптимальной. На данной толщине подложка оказывает минимальное влияние на величину ЭМИ. В последующем, при изготовлении объектов исследования мы ориентировались на данные результаты.

Изготовление РПМ осуществлялось путем продувки 10 мг порошкообразного графита (марка ГЛ-1) по поверхности эпоксидной смолы.

Регистрация коэффициентов пропускания ЭМИ, прошедшего через образцы проводилась на частотах 80 ГГц, 98 ГГц и 120 ГГц.

На рисунке 4 представлены результаты сравнения данных, полученных для случая «пустого пространства» и эпоксидной смолы толщиной 1,5 мм.

Обзор графика, представленного на рисунке 4, показывает, что для образца «графит + эпоксидная смола» уровень регистрируемого сигнала соответствует значениям равным -30 дБм, что свидетельствует о полной экранировке радиоизлучения.

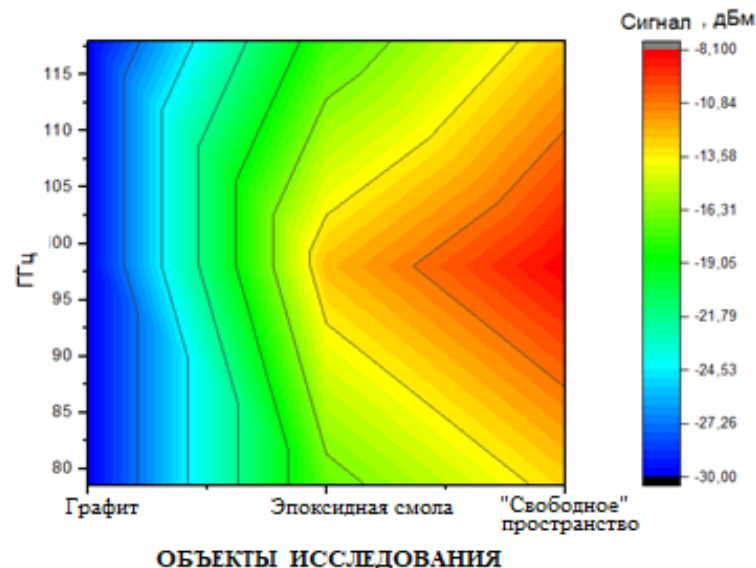


Рисунок 4 – Сравнение объектов исследования

Выводы

В ходе выполнения данной работы была решена поставленная задача, а именно разработка и исследование радиоматериалов, эффективно поглощающих электромагнитное излучение (ЭМИ) в сверхвысокочастотном диапазоне 80–120 ГГц. В качестве основного радиопоглощающего материала использовался порошок кристаллического графита с размером частиц 0,2 мм. Образцы изготавливались методом продувки 10 мг графитового порошка по поверхности эпоксидной смолы. В работе представлены результаты измерения коэффициента пропускания частиц графита на поверхности эпоксидной смолы. Регистрация сигнала осуществлялась на трех разных частотах: 80 ГГц, 98 ГГц и 120 ГГц. Установлено, что

наиболее эффективная толщина эпоксидной смолы соответствует значению 1,5 мм. При данной толщине, эпоксидная смола оказывает минимальное влияние на величину ЭМИ на всех исследуемых частотах. Были получены результаты экспериментальных измерений пленок из частиц графита на поверхности эпоксидной подложки. Пленки изготовлены путем продувки 10 мг частиц графита. Результаты исследования показали, что изготовление поглощающих материалов на основе оксидной смолы с добавлением частиц графита, полностью экранирует ЭМИ в миллиметровом диапазоне. Разработанный материал полностью удовлетворяет заданному критерию: «высокая эффективность защиты – невысокие затраты на изготовление».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Черный, А. П.** Современное состояние исследований влияния электромагнитных излучений на организм человека [Текст] // Інженерні та освітні технології в комп'ютерних системах. – 2013. – № 2. – С. 5–11.
- 2 **Бараночников, М. Л.** Магнитоэлектроника [Текст]. – М. : ДМК Пресс. – 2001. – 544 с.
- 3 **Островский, О. С., Одаренко, Е. Н., Шматько, А. А.** Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн [Текст] // Физическая инженерная поверхность. – 2003. – Т. 1. – № 2. – С. 161–173.
- 4 **Бубнов, Г. М.** Исследования поглощения волн миллиметрового диапазона в атмосфере Земли и материалах криогенных рефлекторов [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 1.3.4 / Г. М. Бубнов. – М., 2022. – 130 с.
- 5 **Крюков, А. В., Еремеев, А. С.** Новые радиопоглощающие гибкие материалы на основе углеродной матрицы с различными синтетическими наполнителями и оценка их поглощающих свойств в СВЧ-диапазоне [Текст] // РЭНСИТ. – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 335–340.
- 6 **Горшенев, В. Н., Колесов, В. В., Фионов, А. С., Эрихман, Н. С.** Многослойные покрытия с изменяемыми электродинамическими характеристиками на основе наполненных полимерных матриц [Текст] // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 11. – С. 1–18.
- 7 **Семенец, В. В., Стыщенко, Т. Е.** Разработка материала для защиты медицинского персонала от воздействия излучения [Текст] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 80, № 2/5. – С. 30–37.
- 8 **Быченко, Д. С., Каныгин, М. А., Окотруб, А. В., Шуба, М. В., Поддубская, О. Г., Плющ, А. О., Кужир, П. П., Максименко, С. А.** Анизотропия электромагнитных свойств полимерных композитов на основе многослойных углеродных нанотрубок в гигагерцовом диапазоне частот [Текст] // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 93, № 10. – С. 669–673.

9 **Kuzhir, P., Paddubskaya, A., Bychanok, D., Nemiletsau, A., Shuba, M., Plusch, A., Maksimenko, S., Bellucci, S., Coderoni, L., Micciulla, F., Sacco, L., Rinaldi, G., Macutkevic, J., Seliuta, D., Valusis, G., Banys, J.** Microwave probing of nanocarbon based epoxy resin composite films: Toward electromagnetic shielding [Text] // Thin Solid Films. – 2011. – Vol. 519, issue 12. – Pp. 4114–4118.

10 **Balanis, C. A.** Antenna Theory: Analysis and Design [Text]. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. – 1104 p. – [Electronic resource]. – <https://books.google.kz/books?id=iFEBcgAAQBAJ>

11 **Погребной, А. А., Никитин, Д. М., Мороз, Ф. В.** Измерение диаграммы направленности двухзеркальной антенны Кассегрена и расчет коэффициента усиления исследуемой антенны по измеренной диаграмме направленности [Текст] // Молодой ученый. – 2016. – № 13(117). – С. 196–200.

REFERENCES

1 **Chernyi, A. P.** Sovremennoe sostoyanie issledovaniy vliyaniya elektromagnitnykh izlucheni na organizm cheloveka [Text] // [Current state of research on the influence of electromagnetic radiation on the human body]. Inzhenerni ta osviti tekhnologii v kompiuternykh systemakh. – 2013. – № 2. – P. 5–11.

2 **Baranochnikov, M. L.** Magnitoelektronika [Text] // [Magnetoelectronics]. – Moscow : DMC Press. – 2001. – 544 p.

3 **Ostrovskii, O. S., Odarenko, E. N., Shmatko, A. A.** Zashchitnye ekrany i poglotiteli elektromagnitnykh voln [Text] // [Protective shields and absorbers of electromagnetic waves]. Fizicheskaya Inzhenernaya Poverkhnost. – 2003. – Vol.1. – № 2. – P. 161–173.

4 **Bubnov, G. M.** Issledovaniya pogloshheniya voln millimetrovogo diapazona v atmosfere Zemli i materialax kriogennykh reflektorov [Text] // Research on the absorption of millimeter-wave bands in the Earth's atmosphere and materials of cryogenic reflectors]: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk : 1.3.4. – Moscow : 2022. – 130 p.

5 **Kryukov, A. V., Ereemeev, A. S.** Novye radiopogloshchayushchie gibkie materialy na osnove uglerodnoi matritsy s razlichnymi sinteticheskimi napolnitelyami i otsenka ikh pogloshchayushchikh svoystv v SVCh-diapazone [Text] // [New radio-absorbing flexible materials based on a carbon matrix with various synthetic fillers and evaluation of their absorbing properties in the microwave range]. RENSIT. – 2020. – Vol.12, № 3. – P. 335–340.

6 **Gorshenev, V. N., Kolesov, V. V., Fionov, A. S., Erikhman, N. S.** Mnogosloynye pokrytiya s izmenyaemyimi elektrodinamicheskimi kharakteristikami na osnove napolnennykh polimernykh matrits [Text] // [Multilayer coatings with

variable electrodynamic characteristics based on filled polymer matrices]. Zhurnal Radioelektroniki. – 2016. – №11. – P.1–18.

7 **Semenets, V. V., Stytsenko, T. E.** Razrabotka materiala dlya zashchity meditsinskogo personala ot vozdeystviya izlucheniya [Text] // [Development of a material for protecting medical personnel from radiation exposure]. Vostochno-Evropeiskii Zhurnal Peredovykh Tekhnologii. – 2016. – Vol.80, № 2/5. – P. 30–37.

8 **Bychanok, D. S., Kanygin, M. A., Okotrub, A. V., Shuba, M. V., Poddubskaya, O. G., Plyushch, A. O., Kuzhir, P. P., Maksimenko, S. A.** Anizotropiya elektromagnitnykh svoystv polimernykh kompozitov na osnove mnogoslownykh uglerodnykh nanotrubok v gigagertsovom diapazone chastot [Text] // [Anisotropy of electromagnetic properties of polymer composites based on multi-walled carbon nanotubes in the gigahertz frequency range]. JETP Letters. – 2011. – Vol. 93, №10. – P. 669–673.

9 **Kuzhir, P., Paddubskaya, A., Bychanok, D., Nemiletsau, A., Shuba, M., Plusch, A., Maksimenko, S., Bellucci, S., Coderoni, L., Micciulla, F., Sacco, L., Rinaldi, G., Macutkevic, J., Seliuta, D., Valusis, G., Banys, J.** Microwave probing of nanocarbon based epoxy resin composite films: Toward electromagnetic shielding [Text] // Thin Solid Films. – 2011. – Vol. 519, № 12. – P. 4114–4118.

10 **Balanis, C. A.** Antenna Theory: Analysis and Design [Text]. – Hoboken : John Wiley & Sons. – 2016. – 1104 p. – [Electronic resource]. – <https://books.google.kz/books?id=iFEBcgAAQBAJ>

11 **Pogrebnoi, A. A., Nikitin, D. M., Moroz, F. V.** Izmerenie diagrammy napravlenosti dvukhzerkalnoi anteny Kassegrena i raschet koeffitsienta usileniya issleduemoi anteny po izmerennoi diagramme napravlenosti [Text] // [Measurement of the radiation pattern of a dual-reflector Cassegrain antenna and calculation of the gain of the antenna under study from the measured radiation pattern]. Molodoi Uchenyi. – 2016. – № 13 (117). – P. 196–200.

Поступило в редакцию 01.06.26.

Поступило с исправлениями 29.06.26.

Принято в печать 06.09.26.

К. М. Маханов¹, *А. К. Салькеева², А. С. Кусенова³,

Р. И. Шакирзянов⁴, Ж. К. Смагулов⁵

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

²Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

³Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

⁴Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
⁵Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
01.06.26 ж. баспаға түсті.
29.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
06.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МИЛЛИМЕТРЛІК ДИАПАЗОНДАҒЫ РАДИОЖҰТЫЛУ МАТЕРИАЛДАРДЫ ЗЕРТТЕУ

Жұмыста 80-120 Гц аса жоғары жиілік диапазонында радиожұтқыш материалдарды зерттеу нәтижелері берілген. Негізгі радиожұтқыш материал ретінде кристалды графит ұнтағы қарастырылды. Материалды дайындау белгілі бір өлшемдегі графит бөлшектерін эпоксидті шайырмен араластыру арқылы жүзеге асырылды. Зерттеліп отырған материалдарда графит бөлшектері толтырғыш ретінде қолданылады. Зерттеу нысанының таңдалуы кездейсоқ емес, өйткені графиттің радиофизикалық параметрлерін зерттеу оның толтырғыш ретінде қолданылуының перспективасы екенін көрсетті. Эпоксидті шайыр төсеніш және байланыстырушы материал ретінде қолданылды. Үлгілер эпоксидті шайырлы төсеніштің бетіне ұнтақты үрлеу арқылы дайындалды. Эпоксидті шайырдың ең тиімді жұмыс қалыңдығы эксперименталды түрде анықталды. Сигналдың ең тиімді жазылуы байқалатын орнату компоненттерінің орналасуының геометриялық өлшемдері есептелді. Зерттеу нәтижелері, эпоксидті шайырдың бетіндегі графит бөлшектерінен тұратын пленка, субмиллиметрлік диапазондағы радиосәулеленуді эффективті қорғайтынын көрсетті.

Алынған материал қажетті критерийлерге толық сәйкес келеді, атап айтқанда: «қорғаныстың жоғары тиімділігі – дайындауға кететін шығынның аздығы». Радиожұтқыш материалдарды алу телекоммуникация инфрақұрылымын тұрақты дамыту және осы саладағы инновациялар мақсаттарына толық жауап береді.

Кілтсөздер: Радиожұтқыш материалдар, электромагниттік сәулелену, графит, өте жоғары жиілік, эпоксидті шайыр.

K. Makhanov¹, A. Salkeyeva², A. Kussenova³,
R. Shakirzyanov⁴, Zh. Smagulov⁵
¹L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
²Abylka Saginov Karaganda technical university,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
³Abylka Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
⁴L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
⁵Academician E. A. Buketov Karaganda University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 01.06.26.
Received in revised form 29.06.26.
Accepted for publication 06.09.26.

STUDY OF RADIO ABSORBENT MATERIALS IN THE MILLIMETER RANGE

The paper presents the results of a study of radio-absorbing materials in the ultra-high-frequency range of 80–120 GHz.

Crystalline graphite powder is considered as the main radio-absorbing material. Epoxy resin is used as a substrate and a binder. Samples were prepared by blowing the powder over the surface of an epoxy resin substrate. The most effective working thickness of the epoxy resin is determined experimentally. The geometric dimensions of the arrangement of the installation components are calculated, at which the most effective signal registration is observed.

The results of the studies showed that a film consisting of graphite particles on the surface of the epoxy resin effectively shields radio emissions in the submillimeter range. The material obtained fully meets the necessary criteria, namely: «high shielding effectiveness – low manufacturing costs». The production of radar-absorbing materials is entirely consistent with the goals of sustainable development of telecommunications infrastructure and innovation in this field.

Keywords: Radio-absorbing materials, electromagnetic radiation, graphite, Ultra-high frequency, epoxy resin.

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/214-231>

З. К. Шанина¹, *Н. А. Таймагамбетова², Д. М. Сергеев³

^{1,2,3}Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,

Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.

³Кенес Одағының екі мәрте Батыры

Т. Ж. Бигелдинов атындағы Әуе қорғаныс

күштерінің Әскери институты,

Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6394-4821>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8830-0054>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7426-3039>

*e-mail: zshanina@zhubanov.edu.kz

ТРАНСМОН РЕЖИМІНДЕГІ КУБИТТЕРДІҢ СПЕКТРЛІК СИПАТТАМАЛАРЫН ЖӘНЕ ЭНЕРГИЯ ДЕҢГЕЙЛЕРІНІҢ ҚҰРЫЛЫМЫН ТАЛДАУ

Мақалада қазіргі заманғы кванттық есептеуіш жүйелердің ең перспективалы базалық элементтерінің бірі – трансмон типті асқын өткізгіш кубиттердің энергия спектрі мен спектрлік сипаттамаларын сандық модельдеу мәселесі қарастырылған. Классикалық Купер жұбының қорабымен салыстырғанда трансмон архитектурасының қоршаған ортадағы диэлектрлік флуктуациялар мен зарядтық шуылдарға жоғары төзімділігінің физикалық-теориялық негіздері талданды. Жұмыс аясында кубиттің операторлық гамильтонианын шекті өлшемді дискретті зарядтық базисте құрудың математикалық моделі әзірленіп, стационарлы Шредингер теңдеуін сандық тәсілмен шешу үшін MATLAB бағдарламалық ортасында матрицалық диагоналдау алгоритмі жүзеге асырылды. Модельдеу барысында кездейсоқ шамалар емес, кванттық электроникада «алтын стандарт» ретінде танылған нақты эталондық эксперименталды параметрлер ($E_C = 0.28$ ГГц және $E_J = 14.0$ ГГц) негізге алынды, бұл жүйенің трансмон режиміне толық сәйкестігін қамтамасыз етті. Сандық симуляция нәтижесінде кубиттің алғашқы төрт энергия деңгейінің келтірілген сыртқы ығысу зарядына тәуелділік қисықтары тұрғызылды. Алынған спектрлерді талдау трансмон

режимінде зарядтық дисперсияның экспоненциалды түрде басылып, деңгейлердің толықтай тегістелетінін (түзу сызыққа айналатынын) көрсетті, бұл жүйенің дефазировкаға қарсы жоғары когеренттілігін негіздейді. Сонымен қатар, қатынасының артуымен кубиттің косинусоидальды потенциалының тереңдеуі және оның салдарынан абсолюттік анггармонияның (α) дәрежелі заңдылықпен әлсіреу серпіні зерттелді. Сандық модельдеу арқылы (оңтайлы нүкте) нүктесінде кубиттің негізгі ауысу жиілігі ГГц, ал келесі деңгей жиілігі ГГц екені анықталып, абсолюттік анггармония шамасы МГц деп есептелді. Бұл мән жүйенің екі деңгейлі жұмысшы субкеңістігін нақты адресациялауға және жоғары энергетикалық күйлерге кванттық ақпараттың шашырауын болдырмауға толық мүмкіндік береді. Зерттеу барысында құрылған сандық модельдер мен алгоритмдер отандық зертханаларда асқын өткізгіш кванттық процессорлардың чиптерін калибрлеу мен оңтайлы параметрлерін таңдау үшін практикалық құрал ретінде ұсынылады.

Кілтті сөздер: асқын өткізгіш кубиттер, трансмон, Джозефсон түйісуі, зарядтық дисперсия, матрицалық диагоналдау, анггармония.

Кіріспе

Қазіргі заманғы ақпараттық қоғамның даму қарқыны есептеуіш техникалардың қуаттылығын үздіксіз арттыруды талап етеді. Алайда дәстүрлі кремний негізіндегі жартылай өткізгіш транзисторлардың өлшемдері нанометрлік деңгейге дейін кішірейді. Бұл жағдай Мур заңының жүзеге асуына физикалық шектеулер қояды. Осындай масштабта кремнийлік құрылымдарда кванттық туннельдеу және суперпарамагнетизм секілді деструктивті құбылыстар пайда болады. Салдарынан классикалық процессорлардың өнімділігін одан әрі арттыру қиындай түседі [1, 1-б.; 2, 1169-б.].

Осы технологиялық дағдарыстан шығудың негізгі балама бағыттарының бірі – ақпаратты өңдеу мен тасымалдау процестерін кванттық механика заңдылықтарына сүйене отырып жүзеге асыру. Бұл ретте суперпозиция, кванттық шатасу және интерференция принциптеріне негізделген кванттық есептеуіш жүйелерді құру өзекті мәселеге айналды [3, 505-б.].

Кванттық компьютерлердің негізгі функционалдық элементі – екі өлшемді кванттық күйлер кеңістігінде ақпаратты сақтайтын және өңдейтін кванттық бит немесе кубит болып табылады [4, 13-б.]. Қазіргі таңда кубиттерді физикалық тұрғыдан жүзеге асырудың бірнеше бәсекелес платформалары дамуда. Олардың қатарына иондық тұзақтар, оптикалық

фотондар және жартылай өткізгіштердегі кванттық нүктелердің спиндері жатады [4, 343-б.; 5, 2-б.].

Алайда, олардың ішінде асқын өткізгіш тізбектерге негізделген кубиттер әлемдік ғылым мен индустрияда жетекші орынға ие болды. Бұл бағыт қазіргі таңда IBM, Google және Rigetti секілді технологиялық алыптардың жобаларында белсенді қолданылады [3, 505-б.; 6, 2-б.]. Асқын өткізгіш кубиттер заманауи микроэлектрониканың интегралдық схемалар технологиясына толық үйлесімді келеді. Сондай-ақ, олар литографиялық әдістермен микрочип бетінде оңай масштабталу әлеуетімен және сыртқы микротолқынды импульстер арқылы басқарудың жоғары икемділігімен ерекшеленеді [5, 2-б.; 6, 2-б.].

Асқын өткізгіш кубиттердің физикалық табиғаты макроскопиялық кванттық құбылыстарға негізделген [6, 2-б.; 7, 1-б.]. Мұндай жүйелерді құрудың алғашқы қадамы идеалды индуктивтілік пен сыйымдылықтан тұратын сызықтық LC-контурларды (микротолқынды резонаторларды) қолданудан басталды. Мұндай тізбек кванттық гармониялық осцилляторға эквивалентті болып табылады [8, 264-б.].

Бірақ кванттық гармониялық осциллятордың энергия деңгейлерінің құрылымы эквидистантты, яғни барлық көршілес деңгейлердің арақашықтығы бірдей ($\hbar\omega$) болады [8, 269-б.]. Бұл қасиет сыртқы микротолқынды өріспен әсер еткенде жүйенің тек алғашқы екі күйінің ($|0\rangle$ және $|1\rangle$) арасында ғана резонанстық ауысу жасауға мүмкіндік бермейді. Энергия жүйелі түрде жоғары деңгейлерге ($|2\rangle, |3\rangle, \dots, |n\rangle$) шашырап, кванттық ақпараттың жоғалуына әкеледі [5, 2-б.; 8, 269-б.].

Сондықтан, сызықтық тізбекті нағыз екі деңгейлі кубитке айналдыру үшін оған сызықты емес (гармониялық емес) элементті енгізу қажет болды. Асқын өткізгіштік электроникада мұндай бірегей сызықты емес элемент рөлін Джозефсон түйісуі атқарады [1, 1-б.]. Джозефсон түйісуі өзінің сызықты емес индуктивтілігі арқылы жүйенің потенциалдық энергиясының пішінін параболадан косинусоидалды түрге ($-E_J \cos \phi$) өзгертеді [1, 2-б.; 2, 1170-б.]. Нәтижесінде энергия деңгейлерінің эквидистанттылығы бұзылып, жүйе айтарлықтай ангармониялық сипатқа ие болады. Бұл құбылыс $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ кванттық ауысу жиілігін ($f_{\{01\}}$) нақты адресациялауға жағдай жасайды [2, 1170-б.; 6, 2-б.].

Асқын өткізгіш кубиттердің даму тарихындағы алғашқы үлгі Купер жұбының қорабы (КЖҚ) деп аталатын зарядтық кубит болды [6, 2-б.]. Алайда, КЖҚ кубиттері өздерінің табиғаты бойынша қоршаған ортадағы диэлектрлік материалдар мен интерфейстердің статикалық және динамикалық электрлік зарядының флуктуацияларына (зарядтық шуылға) өте сезімтал болды [7, 1-б.]. Бұл шуыл кубиттің жұмысшы жиілігінің стохастикалық (кездейсоқ)

ығысуына әкелді. Салдарынан кванттық күйдің когеренттілігі өте тез, яғни наносекундтар ішінде бұзылуға әкелді (декогеренция) [7, 1-б.; 9, 1-б.].

2007 жылы Йель университетінің ғалымдары (Jens Koch және т.б.) бұл мәселені шешудің жаңа әдісін ұсынып, оны трансмон режимі деп атады [1, 1-б.]. Трансмон кубитінің негізгі идеясы – Джозефсон түйісуіне параллель етіп өте үлкен шунттаушы конденсаторды қосу болып табылады. Бұл әдіс жүйенің зарядтау энергиясын (E_C) барынша азайтады. Нәтижесінде Джозефсон энергиясының зарядтау энергиясына қатынасы ($\frac{E_J}{E_C} \gg 1$, әдетте 50...100 аралығында) экспоненциалды түрде артады [1, 2-б.; 5, 5-б.]. Осы режимге өткенде кубиттің энергия деңгейлерінің сыртқы ығысу зарядына (n_g) тәуелділігі (зарядтық дисперсиясы) толықтай басылып, тегістеледі. Осының салдарынан трансмон кубиттері зарядтық шуылдан қорғалып, олардың когеренттілік уақыты (T_2) бірнеше реттік шамаға өсті [1, 2-б.; 10, 1-б.].

Алайда, кванттық механиканың іргелі заңдылықтарына сәйкес, трансмон режиміне өтудің өзіндік кері әсері бар. $\frac{E_J}{E_C}$ қатынасы өскен сайын кубиттің косинусоидалды потенциалдық шұңқыры тереңдей түседі [1, 2-б.]. Осының әсерінен оның ішіндегі алғашқы энергия деңгейлері бір-біріне жақындап, жүйенің абсолюттік ангармониясы ($\alpha = f_{\{12\}} - f_{\{01\}}$) әлсірейді. Бұл көрсеткіш әдетте -200...-300 МГц шамасына дейін төмендейді [1, 2-б.; 10, 1-б.]. Әлсіз ангармония кванттық логикалық қақпаларды өте жылдам орындауға кедергі келтіреді. Себебі басқарушы микротолқынды импульстің жиілік спектрі кеңейген жағдайда, жүйе $|1\rangle$ күйінен жоғары $|2\rangle$ немесе $|3\rangle$ деңгейлеріне өтіп кетеді [5, 5-б.; 12, 1-б.].

Соңғы жылдардағы (2025–2026 жж.) ең өзекті зерттеулер көрсеткендей, дәстүрлі AlO_x окшаулағыш қабаты бар тұрақты Джозефсон түйісулерінен басқа жаңа құрылымдар белсенді зерттелуде. Олардың қатарына екі өлшемді жартылай өткізгіштік гетероқұрылымдар (heterostructure) негізіндегі наносымды (nanowire) трансмондар [13, 1-б.; 14, 1-б.] және қос түйісулі СКИД (SQUID) құрылымдары жатады [11, 1-б.]. Бұл бағыттар трансмонның потенциалына жоғары ретті Джозефсон гармоникаларын енгізуді көздейді. Аталған әдістер сыртқы магнит ағыны немесе гейттік кернеу арқылы кубиттің деңгейлер құрылымы мен ангармониясын кең диапазонда басқаруға мүмкіндік береді [11, 1-б.; 14, 1-б.].

Осы айтылған факторларды ескере отырып, трансмон режиміндегі кубиттердің гамильтонианың дәл құру және оның дискретті энергия деңгейлерінің орналасу архитектурасын есептеу өте маңызды. Сонымен қатар, олардың спектрлік сипаттамаларын сыртқы параметрлерге тәуелді түрде талдау – заманауи кванттық процессорларды жобалау мен калибрлеудің

ең басты алғышарты болып табылады. Бұл жайт осы зерттеу жұмысының жоғары ғылыми өзектілігін айқындайды.

Материалдар мен әдістер

Машиналық оқыту және кванттық ақпаратты өңдеу технологияларының негізі макроскопиялық кванттық эффектілерді басқаруға негізделген асқын өткізгіш схемалар болып табылады [3, 505-б.]. Екі өлшемді кванттық жүйені (кубитті) құрудың ең қарапайым нұсқасы – идеалды сыйымдылық (C) пен индуктивтіліктен (L) тұратын сызықтық LC -контур немесе микротолқынды резонатор болып табылады. Мұндай контурдың классикалық гамильтонианы келесі түрде өрнектеледі:

$$H_{LC} = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L}, \quad (1)$$

мұндағы Q – конденсатордағы электр заряды, ал Φ – индуктивтілік катушкасы арқылы өтетін магнит ағыны. Стандартты кванттау процедурасына сәйкес, бұл айнымалылар өзара түйіндес операторларға ($\hat{Q}$ және $\hat{\Phi}$) айналады және олар үшін $[\hat{\Phi}, \hat{Q}] = i\hbar$ коммутациялық қатынасы орындалады. (1) теңдеуі кванттық гармониялық осциллятордың (QHO) математикалық моделіне толық эквивалентті:

$$H_{QHO} = \hbar\omega \left(\hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{1}{2} \right), \quad (2)$$

мұндағы $\hat{a}^\dagger$ және $\hat{a}$ – кванттық туу және жою операторлары, ал $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – контурдың резонанстық жиілігі. (2) модельдің басты кемшілігі – оның энергия деңгейлерінің спектрі толықтай эквидистантты, яғни кез келген көршілес деңгейлердің арақашықтығы бірдей және $\Delta E = E_{m+1} - E_m = \hbar\omega$ шамасына тең болады. Салдарынан, сыртқы микротолқынды импульспен әсер еткенде жүйені тек негізгі $|0\rangle$ және $|1\rangle$ бірінші қозып тұрған күйлерінен тұратын жұмысшы субкеңістігінде оқшаулау мүмкін емес. Энергия резонансты түрде жоғары деңгейлерге ($|2\rangle, |3\rangle \dots$) шашырап, кванттық ақпараттың жоғалуына әкеледі.

Жүйенің эквидистанттылығын бұзып, оған ангармониялық (сызықты емес) қасиет дарыту үшін сызықты индуктивтілік L элементі сызықты емес Джозефсон түйісуімен алмастырылады. Джозефсон түйісуі – арасы жұқа диэлектрик қабатымен (әдетте AlO_x) бөлінген екі асқын өткізгіштен тұратын құрылым. Түйісу арқылы өтетін Купер жұптарының ток (I) мен кернеу (V) сипаттамалары Джозефсонның екі іргелі теңдеуімен сипатталады:

$$I = I_c \sin\phi, \quad (3)$$

$$V = \frac{\Phi_0}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}. \quad (4)$$

Мұндағы I_c – түйісудің критикалық тогы, ϕ – асқын өткізгіш фазалар айырымы, ал $\Phi_0 = h/(2e)$ – магнит ағынының кванты. (3) және (4) қатынастарын интегралдау арқылы Джозефсон түйісуінің меншікті потенциалдық энергиясының косинусоидалды функция екендігі анықталады:

$$U(\phi) = \int I \cdot V dt = \frac{\Phi_0 I_c}{2\pi} \cos\phi = -E_J \cos\phi. \quad (5)$$

Мұндағы $E_J = \Phi_0 I_c / (2\pi)$ – Джозефсонның максималды туннельдік энергиясы. Осылайша, косинусоидалды потенциалды (5) және сыртқы гейттік кернеу тудыратын келтірілген ығысу зарядын (n_g) ескере отырып, трансмон кубитінің негізгі кванттық гамильтонианын келесі операторлық түрде тұрғызамыз:

$$H = 4E_C (\hat{n} - n_g)^2 - E_J \cos\hat{\phi}. \quad (6)$$

Теңдеудегі $E_C = e^2/(2C_\Sigma)$ – жүйенің зарядтау энергиясы ($C_\Sigma = C_J + C_B$ мұндағы C_J – түйісу сыйымдылығы, ал C_B – үлкен шунттаушы конденсатор сыйымдылығы). $\hat{n} = \frac{\hat{Q}}{2e}$ операторы түйісу арқылы өткен Купер жұптарының санының операторы болып табылады. Фаза операторы мен Купер жұптарының саны операторы өзара түйіндес кванттық шамалар ретінде келесі коммутациялық шартты қанағаттандырады:

$$[\hat{\phi}, \hat{n}] = i. \quad (7)$$

Трансмон режимінің теориялық мәні – E_J/E_C қатынасын мақсатты түрде арттыру ($E_J/E_C \gg 1$). Бұл шартқа параллельді шунттаушы конденсатор (C_B) арқылы E_C мәнін барынша азайту есебінен қол жеткізіледі. Жүйедегі кванттық фаза флуктуациялары кіші болған жағдайда ($\hat{\phi} \ll 1$), (6) теңдеуіндегі косинусоидалды мүшені Тейлор қатарына жіктеу арқылы ангармонияның сипатын аналитикалық түрде көруге болады:

$$-E_J \cos\hat{\phi} \approx -E_J + \frac{E_J}{2} \hat{\phi}^2 - \frac{E_J}{24} \hat{\phi}^4. \quad (8)$$

Егер (8) жіктеуіндегі алғашқы екі мүшені (6) теңдеуіне қойсақ, жүйе қайтадан стандартты гармониялық осцилляторға айналады. Ал қатардың

үшінші мүшесі $(-E_J \hat{\phi}^4/24)$ жүйеге кванттық ангармониялық бұзылуды (perturbation) енгізеді. Дәл осы төртінші дәрежелі сызықты еместік энергия деңгейлерінің эквидистанттылығын бұзып, трансмонды нақты екі деңгейлі кубит ретінде қолдануға мүмкіндік береді.

Теориялық модель бойынша $\frac{E_J}{E_C} \gg 1$ шегінде кубиттің деңгейлер құрылымы шағын ангармониялық осцилляторға жақындайды, ал оның деңгейлерінің сыртқы n_g зарядының шуылына сезімталдығы (зарядтық дисперсиясы) экспоненциалды түрде басылады.

Теориялық бөлімде тұрғызылған трансмон кубитінің стационарлы Шредингер теңдеуін сандық тәсілмен шешу және оның дискретті энергия деңгейлерін анықтау үшін Гамильтониан операторын дискретті зарядтық базисте $(|n\rangle)$ өрнектейміз [1, 2-б.]. Бұл кванттық-механикалық базисте Купер жұптарының саны операторы $(\hat{n})$ табиғи түрде диагональды сипатқа ие болады:

$$\hat{n}|n\rangle = n|n\rangle. \quad (9)$$

Мұндағы n – бүтін сандар жиыны ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Ал фазалық операторды қамтитын косинусоидалды потенциалдық мүше кванттық механика заңдылықтары бойынша келесі экспоненциалды операторлардың комбинациясы ретінде жазылады:

$$\cos \hat{\phi} = \frac{e^{i\hat{\phi}} + e^{-i\hat{\phi}}}{2}. \quad (10)$$

Бұл жердегі $e^{\pm i\hat{\phi}}$ операторлары зарядтық күйлер кеңістігінде бірлік қадаммен жылжытуды жүзеге асырады, яғни жүйенің күйін көршілес базистік векторға ауыстырады:

$$e^{\pm i\hat{\phi}} |n\rangle = |n \pm 1\rangle. \quad (11)$$

Осылайша, (9) және (11) қатынастарын (6) негізгі гамильтониан теңдеуіне қою арқылы, оператордың дискретті зарядтық базистегі матрицалық элементтерін $(H_{n',n} = \langle n' | \hat{H} | n \rangle)$ есептеудің аналитикалық формуласын тұрғызамыз:

$$H_{n',n} = 4E_C(n - n_g)^2 \delta_{n',n} - \frac{E_J}{2} (\delta_{n',n+1} + \delta_{n',n-1}). \quad (12)$$

Мұндағы $\delta_{n',n}$ – Кронекер символы, ол келесі шарттарды қанағаттандырады:

$$\delta_{n',n} = \begin{cases} 1, & \text{егер } n' = n \\ 0, & \text{егер } n' \neq n \end{cases}. \quad (13)$$

(12) теңдеуімен анықталатын гамильтониан матрицасының құрылымы шексіз өлшемді болып табылады. MATLAB бағдарламалық ортасында нақты сандық есептеулерді орындау мақсатында базистік кеңістікті N шектеу параметрімен (cutoff) қоршаймыз. Купер жұптарының санын $n \in [-N, N]$ шектеулі диапазонында қарастыру арқылы шаршы гамильтониан матрицасының толық өлшемін $(2N + 1) \times (2N + 1)$ түріне келтіреміз. Мысалы, $N = 10$ мәнінде матрица өлшемі 21×21 болады. Тұрғызылған матрицаның бас диагоналі кубиттің кинетикалық зарядтау энергиясын сипаттаса, оған тікелей жанама үстіңгі және астыңғы диагональдары Купер жұптарының Джозефсон түйісуі арқылы туннельдену динамикасын анықтайды.

Әзірленген сандық модельдеу әдістемесін іске асыру үшін MATLAB ортасында жоғары өнімді есептеу алгоритмі әзірленді. Алгоритм келесі негізгі функционалдық блоктардан тұрады:

1. *Бастапқы физикалық параметрлерді калибрлеу:* Модельдің шынайылығы мен халықаралық эксперименттерге сәйкестігін қамтамасыз ету мақсатында кванттық электроникада негізгі эталондық параметрлер енгізілді: зарядтау энергиясы $E_C = 0.28$ ГГц және Джозефсон энергиясы $E_J = 14.0$ ГГц. Бұл шамалар жүйенің нақты трансмон режимінде ($E_J/E_C = 50$) жұмыс істеуін қамтамасыз етеді [1, 2-б.].

2. *Матрицаны циклдік түрде құру:* Сыртқы ығысу заряды $n_g \in [-2, 2]$ диапазонында $\Delta n_g = 0.01$ қадамымен сканирленді. Әрбір n_g нүктесінде (12) формуласына сәйкес $(2N + 1) \times (2N + 1)$ өлшемді гамильтониан матрицасы автоматты түрде қайта құрылып отырды.

3. *Канондық диагоналдау:* Әрбір қадамда жинақталған матрица MATLAB-тың ішкі eig(H) функциясы арқылы сандық диагоналданып, гамильтонианның меншікті мәндері – кубиттің алғашқы төрт стационарлы энергия деңгейлері (E_0, E_1, E_2, E_3) спектр түрінде есептелді.

Кванттық логикалық операцияларды сәтті орындау үшін жүйенің спектрлік сызықты еместік (ангармониялық) дәрежесі бағалануы тиіс. Модельдеу шеңберінде кубиттің негізгі жұмысшы ауысу жиілігі (f_{01}) мен келесі жоғары деңгейге ауысу жиілігі (f_{12}) келесі формулалармен есептелді:

$$f_{01} = E_1 - E_0, \quad (14)$$

$$f_{12} = E_2 - E_1. \quad (15)$$

Осы екі көршілес ауысу жиіліктерінің айырымы жүйенің абсолюттік ангармониясын (α) сипаттайтын негізгі көрсеткіш болып табылады:

$$\alpha = f_{12} - f_{01} = E_2 - 2E_1 + E_0. \quad (16)$$

(14)-(16) формулалары арқылы MATLAB ортасында есептелген сандық мәндер мен тұрғызылған графиктер мақаланың келесі бөлімінде дәстүрлі зарядтық кубит спектрлерімен салыстырыла отырып, егжей-тегжейлі талданады.

Нәтижелер және талқылау

MATLAB бағдарламалық ортасында әзірленген сандық алгоритмді іске қосу нәтижесінде асқын өткізгіш кубиттердің екі түрлі параметрлік режиміне сәйкес келетін энергия спектрлері мен абсолюттік ангармонияның функционалдық тәуелділік қисықтары алынды.

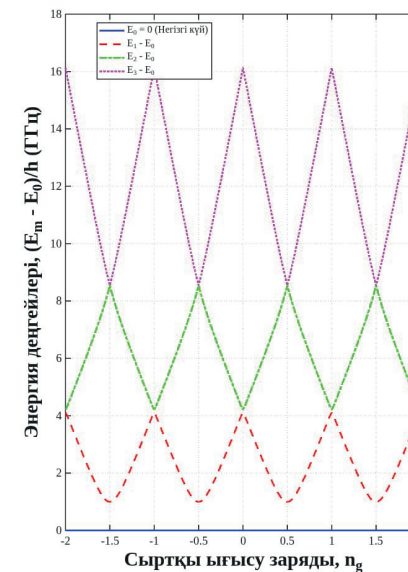
Бірінші кезеңде дәстүрлі зарядтық кубит режимінің физикалық сипаттамаларын айқындау мақсатында Джозефсон энергиясы мен зарядтау энергиясының тең қатынасы ($\frac{E_J}{E_C} = 1$) қарастырылды. Осы режимде есептелген алғашқы төрт энергия деңгейінің (E_0, E_1, E_2, E_3) сыртқы ығысу зарядына (n_g) тәуелділік графигі тұрғызылды (1-сурет).

1-суретте көрсетілген спектрлік қисықтарды талдау жүйенің айтарлықтай жоғары зарядтық дисперсияға ие екендігін дәлелдейді. Энергия деңгейлері сыртқы n_g зарядының өзгеруіне байланысты периодты түрде қатты модуляцияланып, қисық сызықтар (синусоидалар) пішінін алады. Мұндай параметрлік күйде кубиттің жұмысшы ауысу жиілігі ($f_{\{01\}} = E_1 - E_0$) n_g нүктесіне өте сезімтал болады. Эксперименталды тұрғыдан бұл сезімталдық қоршаған ортадағы диэлектриктердің кездейсоқ зарядтық шуылдарының әсерінен кубит жиілігінің кездейсоқ ығысуына әкеледі, бұл кванттық когеренттілікті бірнеше наносекунд ішінде жояды [5, 4-б.; 9, 1-б.].

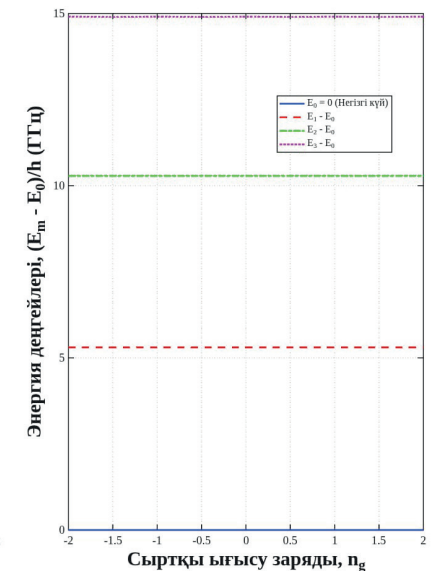
Екінші кезеңде Йель тобының классикалық эталондық параметрлері ($E_C = 0.28$ ГГц, $E_J = 14.0$ ГГц) енгізіліп, нағыз трансмон кубиті режимі ($\frac{E_J}{E_C} = 50$) модельденді. Осы режим үшін есептелген энергия деңгейлерінің спектрі 2-суретте бейнеленген.

Сандық модельдеу нәтижелері көрсеткендей, E_J/E_C қатынасын 50-ге дейін арттыру зарядтық дисперсияны экспоненциалды түрде басуға мүмкіндік береді. 2-суреттегі барлық алғашқы төрт энергия деңгейі сыртқы ығысу зарядының (n_g) кез келген мәнінде толықтай тегістеліп, мінсіз параллель түзу сызықтарға айналған. Физикалық тұрғыдан бұл құбылыс трансмон кубитінің сыртқы зарядтық шуылдардан толықтай оқшауланғанын және декогеренцияға қарсы қорғаныс тосқауылының қалыптасқанын айғақтайды. Бұл нәтиже қазіргі кванттық процессорларда когеренттілік

уақытын (T_2) микросекундтық диапазонға дейін ұзартудың басты себебі болып табылады [1, 2-б.; 10, 1-б.].



1-сурет – Зарядтық кубиттің энергия спектрі ($E_J/E_C = 1$)

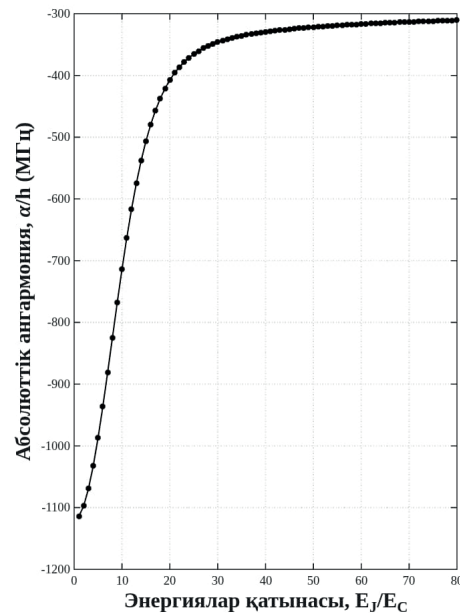


2-сурет – Трансмон кубитінің энергия спектрі ($E_J/E_C = 50$)

Алайда, трансмон режиміне өтудің кванттық-механикалық ымыраластықты бағасын айқындау үшін E_J/E_C қатынасының 1-ден 80-ге дейінгі диапазондағы өзгеру динамикасына сәйкес абсолюттік ангармонияның (α) мәндері есептелді (3-сурет).

3-суреттегі қисық заңдылық көрсеткендей, E_J/E_C қатынасы артқан сайын, косинусоидальды потенциалдық шұңқырдың тереңдеуіне байланысты жүйенің абсолюттік ангармониясы дәрежелі функция бойынша қарқынды түрде кеміп отырады. Егер $E_J/E_C = 1$ нүктесінде ангармония өте жоғары болса, нақты жұмысшы $E_J/E_C = 50$ нүктесінде сандық есептелген деңгейлер келесі мәндерді көрсетті:

- Негізгі жұмысшы жиілігі: $f_{01} = E_1 - E_0 \approx 5.274$ ГГц,
- Келесі деңгей жиілігі: $f_{12} = E_2 - E_1 \approx 4.981$ ГГц,
- Абсолюттік ангармония шамасы: $\alpha = f_{12} - f_{01} \approx -293$ МГц.



3-сурет – E_J/E_C қатынасы артқан сайын ангармонияның кемуі

Алынған $\alpha \approx -293$ МГц сандық мәні аналитикалық жуықтау формуласындағы $-E_C = -280$ МГц шамасына өте жақын және оның теріс таңбасы потенциалдың косинусоидальды сипатын айқын көрсетеді. Спектрлік тұрғыдан бұл шама (~ 293 МГц) кубитті басқаратын микротолқынды импульстердің жиілігін нақты адресациялауға жеткілікті. Бұл көрсеткіш жүйенің тек екі деңгейлі субкеңістікте ($|0\rangle$ және $|1\rangle$) жұмыс істеуін қамтамасыз етіп, кванттық ақпараттың жоғары энергетикалық күйлерге ағып кету ықтималдылығын барынша азайтады [5, 5-б.; 12, 1-б.].

Алынған графиктік және сандық нәтижелер соңғы жылдардағы (2025–2026 жж.) [13, 14] және классикалық [1, 11] эксперименталды мәліметтермен сапалық әрі сандық тұрғыдан жоғары сәйкестік көрсетеді. Бұл жайт әзірленген сандық модельдің дәлдігі мен сенімділігін толық растайды және оны отандық кванттық зертханаларда чиптерді калибрлеу үшін қолдануға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Зерттеу жұмысы шеңберінде қазіргі заманғы кванттық есептеуіш техникалардың ең перспективалы және жетекші платформаларының бірі болып табылатын асқын өткізгіш трансмон кубиттерінің спектрлік сипаттамалары мен энергия деңгейлерінің құрылымына кешенді сандық

модельдеу мен теориялық талдау жүргізілді. Жұмыс барысында алынған негізгі нәтижелер мен ғылыми тұжырымдар келесі тармақтарда жинақталған:

1. *Математикалық модель мен алгоритмнің тиімділігі:* Сызықты емес Джозефсон түйісуінің косинусоидальды потенциалымен толықтырылған асқын өткізгіш контурдың кванттық гамильтонианы шекті өлшемді дискретті зарядтық базисте ($n \in [-10, 10]$) сәтті құрылды. MATLAB бағдарламалық ортасында гамильтониан операторын матрицалық диагоналдау әдісі (канондық eig алгоритмі) негізінде стационарлы Шредингер тендеуін жоғары дәлдікпен шешудің өнімді сандық алгоритмі жүзеге асырылды.

2. *Зарядтық шуылдан қорғалуды негіздеу:* Джозефсон энергиясы мен зарядтау энергиясының әртүрлі параметрлік қатынастарында кубиттің алғашқы төрт энергия деңгейінің (E_0, E_1, E_2, E_3) сыртқы ығысу зарядына (n_g) тәуелділік спектрлері алынды. Сандық симуляция нәтижелері көрсеткендей, $\frac{E_J}{E_C} = 1$ режимінде деңгейлер күшті синусоидальды дисперсияға ие болып, сыртқы шуылға жоғары сезімталдық көрсетсе (Сурет 1), нағыз трансмон режиміне ($\frac{E_J}{E_C} = 50$) өткенде деңгейлер толығымен тегістеліп, мінсіз параллель түзу сызықтарға айналады (Сурет 2). Бұл трансмон архитектурасының қоршаған ортаның зарядтық флуктуацияларын экспоненциалды түрде баса алатындығын нақты дәлелдейді.

3. *Спектрлік параметрлер мен ымыраластықты айқындау:* $\frac{E_J}{E_C}$ қатынасының 1-ден 80-ге дейінгі аралықта өзгеру серпінін есептеу барысында жүйенің абсолюттік ангармониясының (α) дәрежелі заңдылықпен әлсіреу заңдылығы анықталды (Сурет 3). Нақты мәндерді талдау көрсеткендей, халықаралық эталондық параметрлер жағдайында ($E_C = 0.28$ ГГц, $E_J = 14.0$ ГГц) кубиттің негізгі жұмысшы ауысу жиілігі $f_{01} \approx 5.274$ ГГц, ал екінші деңгей жиілігі $f_{12} \approx 4.981$ ГГц шамасын құрап, абсолюттік ангармония шамасы $\alpha \approx -293$ МГц деп есептелді. Бұл мән жүйенің екі деңгейлі жұмысшы субкеңістігін нақты адресациялауға және жоғарғы энергетикалық күйлерге кванттық ақпараттың шашырау ықтималдылығын айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді.

4. *Тәжірибелік маңыздылығы:* Алынған сандық модельдеу графиктері мен спектрлік параметрлер соңғы жылдардағы (2025–2026 жж.) жетекші халықаралық эксперименталды ғылыми мәліметтермен жоғары дәлдікпен сәйкес келеді. Тұрғызылған алгоритмдер мен есептеу модельдері кванттық процессорлардың микросхемаларын отандық зертханаларда жобалауда, кубит параметрлерін (E_J және E_C) оңтайлы таңдауда және басқарушы микротолқынды импульстерді калибрлеуде практикалық көмекші құрал ретінде пайдалануға ұсынылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 Koch, J., Yu, T. M., Gambetta, J., Houck, A. A., Schuster, D. I., Majer, J., Blais, A., Devoret, M. H., Girvin, S. M., Schoelkopf, R. J. Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper-pair box // Physical Review A. – 2007. – Vol. 76, No. 4. – P. 042319. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.76.042319>
- 2 Devoret, M. H., Schoelkopf, R. J. Superconducting Circuits for Quantum Information: An Outlook // Science. – 2013. – Vol. 339, No. 6124. – P. 1169–1174. – <https://doi.org/10.1126/science.1231930>
- 3 Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor // Nature. – 2019. – Vol. 574, No. 7779. – P. 505–510.
- 4 Nielsen, M. A., Chuang, I. L. Quantum Computation and Quantum Information. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 702 c.
- 5 Krantz, P., Kjaergaard, M., Yan, F., Orlando, T. P., Gustavsson, S., Oliver, W. D. A quantum engineer's guide to superconducting qubits // Applied Physics Reviews. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 021318.
- 6 Kjaergaard, M., Schwartz, M. E., Braumüller, J., Krantz, P., Wang, J. I. J., Gustavsson, S., Oliver, W. D. Superconducting Qubits : Current State of Play // Annual Review of Condensed Matter Physics. – 2020. – Vol. 11. – P. 369–395. – <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031119-050605>
- 7 Shnirman, A., Schön, G., Hermon, Z. Quantum Manipulations of Small Josephson Junctions // Physical Review Letters. – 1997. – Vol. 79, No. 12. – P. 2371–2374. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.2371>
- 8 Pozar, D. M. Microwave Engineering. 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2012. – 752 c.
- 9 Ithier, G., Collin, E., Joyez, P., Meeson, P. J., Vion, D., Esteve, D., Chiarello, F., Shnirman, A., Makhlin, Y., Schrieffer, J., Schön, G. Decoherence in a Superconducting Quantum Bit Circuit // Physical Review B. – 2005. – Vol. 72, No. 13. – P. 134519. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.134519>
- 10 Larsen, T. W., Petersson, K. D., Kuemmeth, F., Jespersen, T. S., Krogstrup, P., Nygård, J., Marcus, C. M. A Semiconductor Nanowire-Based Superconducting Qubit // Physical Review Letters. – 2015. – Vol. 115, No. 12. – P. 127001. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.127001>
- 11 Peterer, M. J., Bader, S. J., Jin, X., Yan, F., Kamal, A., Gudmundsen, T. J., Leek, P. J., Oliver, W. D., Gustavsson, S. Coherence and Decay of Higher Energy Levels of a Superconducting Transmon Qubit // Physical Review Letters. – 2015. – Vol. 114, No. 1. – P. 010501. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.010501>

- 12 Wood, C. J., Gambetta, J. M. Quantification and characterization of leakage errors // Physical Review A. – 2018. – Vol. 97. – P. 032306. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.032306>
- 13 Purkayastha, A., Sharma, A., Patel, P. J., Chen, A.-H., Dempsey, C. P., Asodekar, S., Sinha, S., Tomasian, M., Pendharkar, M., Palmstrom, C. J., Hocevar, M., Zuo, K., Hatridge, M., Frolov, S. M. Tunable anharmonicity in Sn-InAs nanowire transmons beyond the short junction limit // arXiv preprint arXiv:2603.26895. – 2026. – P. 1–10.
- 14 Liu, S., Bordoloi, A., Issokson, J., Levy, I., Vavilov, M. G., Shabani, J., Manucharyan, V. E. Strongly anharmonic flux-tunable transmon based on InAs-Al 2D heterostructure // Nature Communications. – 2026. – Vol. 17. – P. 740. – <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67420-1>

REFERENCES

- 1 Koch, J., Yu, T. M., Gambetta, J., Houck, A. A., Schuster, D. I., Majer, J., Blais, A., Devoret, M. H., Girvin, S. M., Schoelkopf, R. J. Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper-pair box // Physical Review A. – 2007. – Vol. 76, No. 4. – P. 042319. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.76.042319>
- 2 Devoret, M. H., Schoelkopf, R. J. Superconducting Circuits for Quantum Information: An Outlook // Science. – 2013. – Vol. 339, No. 6124. – P. 1169–1174. – <https://doi.org/10.1126/science.1231930>
- 3 Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor // Nature. – 2019. – Vol. 574, No. 7779. – P. 505–510.
- 4 Nielsen, M. A., Chuang, I. L. Quantum Computation and Quantum Information. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 702 c.
- 5 Krantz, P., Kjaergaard, M., Yan, F., Orlando, T. P., Gustavsson, S., Oliver, W. D. A quantum engineer's guide to superconducting qubits // Applied Physics Reviews. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 021318.
- 6 Kjaergaard, M., Schwartz, M. E., Braumüller, J., Krantz, P., Wang, J. I. J., Gustavsson, S., Oliver, W. D. Superconducting Qubits : Current State of Play // Annual Review of Condensed Matter Physics. – 2020. – Vol. 11. – P. 369–395. – <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031119-050605>
- 7 Shnirman, A., Schön, G., Hermon, Z. Quantum Manipulations of Small Josephson Junctions // Physical Review Letters. – 1997. – Vol. 79, No. 12. – P. 2371–2374. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.2371>
- 8 Pozar, D. M. Microwave Engineering. 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2012. – 752 c.

9 Ithier, G., Collin, E., Joyez, P., Meeson, P. J., Vion, D., Esteve, D., Chiarello, F., Shnirman, A., Makhlin, Y., Schrieffer, J., Schön, G. Decoherence in a Superconducting Quantum Bit Circuit // Physical Review B. – 2005. – Vol. 72, No. 13. – P. 134519. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.134519>

10 Larsen, T. W., Petersson, K. D., Kuemmeth, F., Jespersen, T. S., Krogstrup, P., Nygård, J., Marcus, C. M. A Semiconductor Nanowire-Based Superconducting Qubit // Physical Review Letters. – 2015. – Vol. 115, No. 12. – P. 127001. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.127001>

11 Peterer, M. J., Bader, S. J., Jin, X., Yan, F., Kamal, A., Gudmundsen, T. J., Leek, P. J., Oliver, W. D., Gustavsson, S. Coherence and Decay of Higher Energy Levels of a Superconducting Transmon Qubit // Physical Review Letters. – 2015. – Vol. 114, No. 1. – P. 010501. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.010501>

12 Wood, C. J., Gambetta, J. M. Quantification and characterization of leakage errors // Physical Review A. – 2018. – Vol. 97. – P. 032306. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.032306>

13 Purkayastha, A., Sharma, A., Patel, P. J., Chen, A.-H., Dempsey, C. P., Asodekar, S., Sinha, S., Tomasian, M., Pendharkar, M., Palmstrom, C. J., Hocevar, M., Zuo, K., Hatridge, M., Frolov, S. M. Tunable anharmonicity in Sn-InAs nanowire transmons beyond the short junction limit // arXiv preprint arXiv:2603.26895. – 2026. – P. 1–10.

14 Liu, S., Bordoloi, A., Issokson, J., Levy, I., Vavilov, M. G., Shabani, J., Manucharyan, V. E. Strongly anharmonic flux-tunable transmon based on InAs-Al 2D heterostructure // Nature Communications. – 2026. – Vol. 17. – P. 740. – <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67420-1>

27.08.26 ж. баспаға түсті.

27.08.26 ж. түзетулерімен түсті.

10.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

З. К. Шанина¹, *Н. А. Таймагамбетова², Д. М. Сергеев³

^{1,2,3}Ақтөбінский региональный университет имени К. Жубанова,
Республика Казахстан, г. Ақтөбе;

³Военный институт Сил воздушной обороны
имени дважды Героя Советского Союза Т. Я. Бегельдинова,
Республика Казахстан, г. Ақтөбе.

Поступило в редакцию 27.08.26.

Поступило с исправлениями 27.08.26.

Принято в печать 10.09.26.

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И СТРУКТУРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ КУБИТОВ В ТРАНСМОННОМ РЕЖИМЕ

В статье рассматривается проблема численного моделирования энергетического спектра и спектральных характеристик одного из наиболее перспективных базовых элементов современных квантовых вычислительных систем – трансмонных сверхпроводящих кубитов. Анализируются физические и теоретические основы высокой устойчивости трансмонной архитектуры к диэлектрическим флуктуациям и шуму заряда в окружающей среде по сравнению с классическим ящиком куперовской пары. В рамках работы разработана математическая модель построения операторного гамильтониана кубита в конечномерном дискретном зарядовом базисе, а также реализован алгоритм диагонализации матрицы в программной среде MATLAB для численного решения стационарного уравнения Шрёдингера. При моделировании в качестве базиса использовались не случайные величины, а реальные эталонные экспериментальные параметры ($E_C = 0.28$ ГГц и $E_J = 14.0$ ГГц), признанные «золотым стандартом» в квантовой электронике, что обеспечивало полное соответствие системы трансмонному режиму. В результате численного моделирования были построены кривые зависимости первых четырех энергетических уровней кубита от приложенного внешнего заряда смещения. Анализ полученных спектров показал, что в трансмонном режиме дисперсия заряда экспоненциально подавляется, а уровни полностью сглаживаются (превращаются в прямую линию), что объясняет высокую когерентность системы по отношению к дефазировке. Кроме того, было изучено углубление косинусного потенциала кубита с увеличением отношения $\frac{E_J}{E_C}$ и, как следствие, ослабление абсолютной ангармоничности (α) по степенному закону. С помощью численного моделирования было установлено, что основная частота перехода кубита в точке $n_g = 0$ (оптимальная точка) составляет $f_{\{01\}} \approx 5.27$ ГГц, а частота следующего уровня $-f_{\{12\}} \approx 4.98$ ГГц, при этом абсолютное значение ангармоничности было рассчитано как $\frac{\alpha}{h} \approx -290$ МГц. Это значение полностью позволяет точно адресовать двухуровневое рабочее подпространство системы и предотвращать утечку квантовой информации в высокоэнергетические состояния. Созданные в ходе исследования численные модели и алгоритмы представлены как практический инструмент для калибровки и

выбора оптимальных параметров сверхпроводящих квантовых процессоров в отечественных лабораториях.

Ключевые слова: сверхпроводящие кубиты, трансмон, джозефсоновский переход, дисперсия заряда, диагонализация матрицы, ангармоничность.

Z. K. Shanina¹, *N. A. Taimagambetova², D. M. Sergeyev³

^{1,2,3}K. Zhubanov Aktobe Regional University,

Republic of Kazakhstan, Aktobe;

³T. Begeldinov Aktobe Aviation Institute,

Republic of Kazakhstan, Aktobe.

Received 27.08.26.

Received in revised form 27.08.26.

Accepted for publication 10.09.26.

ANALYSIS OF SPECTRAL CHARACTERISTICS AND ENERGY LEVELS STRUCTURE OF QUBITS IN THE TRANSMON MODE

The article deals with the numerical modeling problem of the energy spectrum and spectral characteristics of one of the most promising basic elements of modern quantum computing systems - transmon superconducting qubits. The physical and theoretical foundations of the highly resistant transmon architecture to dielectric fluctuations and charge noise in the environment compared to the classical Cooper box are analyzed. In the framework of the work, a mathematical model of the construction of the operator Hamiltonian qubit in a finite-dimensional discrete charge basis was developed, as well as an algorithm of diagonalization of the matrix was implemented in the MATLAB software environment for the numerical solution of the stationary Schrödinger equation. During modeling, rather than using arbitrary values, the simulation was based on actual reference experimental parameters ($E_C = 0.28$ GHz and $E_J = 14.0$ GHz), recognized as the “gold standard” in quantum electronics, ensuring full compliance of the system with the transmon regime. As a result of the numerical modeling, the dependence curves of the first four energy levels of the qubit on the applied external displacement charge were constructed. The analysis of the obtained spectra showed that in the transmon regime, the dispersion of the charge is exponentially suppressed, and the levels are completely smoothed (turned into a straight line), which explains the high coherence of the

system in relation to dephasing. In addition, the deepening of the cosine potential of the qubit with an increase in the ratio $\frac{E_J}{E_C}$ and, as a result, the weakening of the absolute anharmonicity (α) according to the power law was studied. With the help of numerical modeling, it was established that the main frequency of the qubit transition at the point $n_g = 0$ (the optimal point) is $f_{\{01\}} \approx 5.27$ GHz, and the frequency of the next level is $f_{\{12\}} \approx 4.98$ GHz, while the absolute value of anharmonicity was calculated as $\frac{\alpha}{h} \approx -290$ MHz. This value fully allows you to accurately address the two-level working subspace of the system and prevent the leakage of quantum information into high-energy states. Numerical models and algorithms created during the research are presented as a practical tool for calibration and selection of optimal parameters of superconducting quantum processors in domestic laboratories.

Keywords: superconducting qubit, transmon, Josephson transition, charge dispersion, diagonalization matrix, anharmonicity.

SRSTI 14.25.09

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/232-248>

***G. M. Aralbayeva¹, S. N. Nurkasymova²,
K. E. Nabiyeva³, G. M. Kenes⁴**

^{1,2,3,4}L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6827-5567>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9835-6862>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7278-2191>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8410-8006>

*e-mail: aralbayevagulnara@gmail.com

STEM-BASED INQUIRY MODEL FOR TEACHING THE CONCEPT OF PRESSURE

This study evaluates the effectiveness of a STEM-based inquiry model (STEM-P Inquiry Model) in teaching the “Pressure” unit in 7th-grade physics. The aim of the research is to determine the impact of the proposed model on students’ conceptual understanding of pressure, academic achievement, learning motivation, and inquiry skills. The novelty of the study lies in the development of a structured pedagogical model that integrates STEM and inquiry-based learning approaches specifically for teaching a targeted physical concept, and its experimental validation. The research was conducted using a quasi-experimental design involving 44 students, divided into an experimental group ($n = 20$) and a control group ($n = 24$). The experimental group was taught using the STEM-P model, while the control group received traditional instruction. The results showed that the experimental group demonstrated significantly higher academic achievement compared to the control group ($p < 0.05$), with a large effect size ($d = 0.82$). In addition, students’ conceptual understanding improved, misconceptions decreased significantly, and both learning motivation and inquiry skills showed notable development. The proportion of misconceptions in the experimental group decreased from 35 % to 10 %, and 78 % of students reached an independent level in performing inquiry tasks. The findings confirm that the STEM-P model

is an effective pedagogical tool for teaching complex concepts in physics and can be successfully implemented in school practice to enhance students’ scientific understanding and inquiry competencies.

Keywords: physics education, pressure concept, STEM learning, inquiry learning, STEM-P model, learning motivation, inquiry skills.

Introduction

The primary priority of modern global education is not only the acquisition of theoretical knowledge but also the development of students’ scientific thinking, inquiry skills, and their ability to apply knowledge to solve real-world problems. In this context, the STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) educational paradigm is increasingly recognized as an effective approach for modernizing the learning process and fostering students’ functional literacy and interdisciplinary competencies.

Physics serves as a foundational discipline within STEM education, as it not only explains the fundamental laws of nature but also bridges theory and practice. Through learning physics, students engage in experimental investigations, data analysis, and engineering problem-solving, which contribute to the development of critical thinking skills [1]. Recent empirical studies and meta-analytical reviews demonstrate that STEM-based approaches significantly improve students’ academic achievement and enhance their interest in science disciplines [2; 3; 4; 5; 6]. In particular, the integration of engineering design elements into classroom instruction promotes systems thinking and enables students to solve complex problems more effectively [4; 6; 7]. Furthermore, the interdisciplinary nature of STEM education and its integration with engineering design methodologies enhance students’ cognitive engagement and support their ability to reason about abstract concepts and address complex challenges [8; 9; 10].

However, a review of the scientific and pedagogical literature indicates that most existing studies focus primarily on the general impact of STEM education on learning outcomes, while insufficient attention has been given to its role in developing conceptual understanding of specific physics topics. One such topic is the concept of pressure in 7th-grade physics, which remains challenging for many students. Research shows that students often associate pressure solely with force, neglecting its dependence on the area of contact, and struggle to correctly explain how pressure changes under different conditions [11; 12; 13]. These misconceptions hinder a deep understanding of physical phenomena.

This issue can be attributed to the lack of structured pedagogical models that systematically integrate STEM and inquiry-based learning approaches with specific subject content. To address this gap, there is a need to develop specialized

instructional models focused on facilitating the understanding of particular physical concepts.

Therefore, the aim of this study is to develop a STEM-based inquiry model (STEM-P Inquiry Model) for teaching the concept of pressure to 7th-grade students and to evaluate its effectiveness in practice. The study examines the impact of the proposed model on students' conceptual understanding, academic achievement, learning motivation, and inquiry skills. Ultimately, this research seeks to provide effective strategies for enhancing students' scientific literacy.

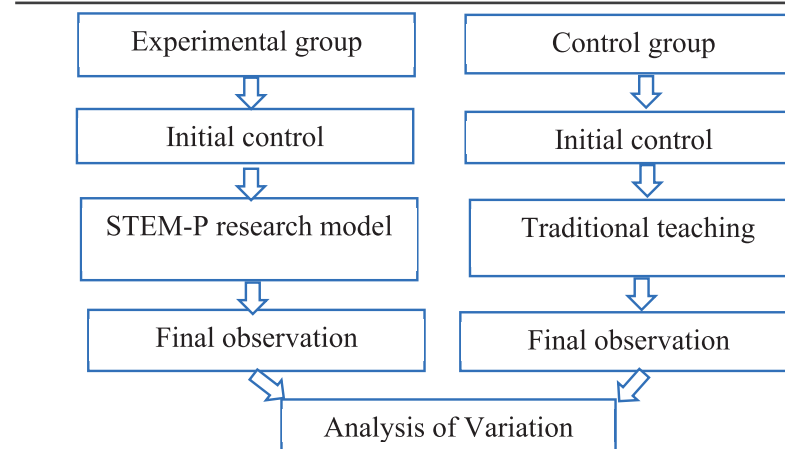
Materials and methods

The study was conducted using a quasi-experimental research design. This design is widely applied in educational settings to evaluate the effectiveness of pedagogical interventions, particularly when random assignment of participants is not feasible, allowing for the analysis of changes in learning outcomes [14; 15; 16].

The research was carried out among 7th-grade students at School-Lyceum No. 53 in Astana, Kazakhstan. A total of 44 students participated in the study and were divided into two groups: an experimental group (Grade 7A, $n = 20$) and a control group (Grade 7A', $n = 24$). The participants were aged between 12 and 13 years.

In the experimental group, instruction was organized using a STEM-based inquiry model (STEM-P Inquiry Model), while the control group received traditional instruction. The learning outcomes of both groups were compared using pre-test and post-test measurements. The independent variable of the study was the teaching method (STEM-P inquiry model vs. traditional instruction), while the dependent variables included students' conceptual understanding, academic achievement, learning motivation, and inquiry skills.

This research design enabled a comprehensive evaluation of the effectiveness of the proposed pedagogical intervention in a real educational context. The overall structure of the study and the logic of the analysis are presented in Scheme 1.



Scheme 1 – General structure of the study

In accordance with the purpose of the study, one main and several additional hypotheses were formulated to comprehensively evaluate the effectiveness of the STEM-P-based inquiry model. The main hypothesis is aimed at assessing the effect of the model on students' level of conceptual understanding, while the additional hypotheses are intended to determine its impact on academic achievement, motivation, and inquiry skills.

Main hypothesis:

1. Students taught through the STEM-P inquiry model will have a statistically higher level of conceptual understanding of the concept of pressure compared to students in the control group taught using traditional methods.

Additional hypotheses:

2. The STEM-P model has a statistically significant effect on increasing students' academic achievement in the topic of pressure.

3. The STEM-P model contributes to reducing students' misconceptions related to the concept of pressure.

4. STEM-based instruction increases students' interest in physics and their learning motivation.

5. The STEM-P model has a positive effect on the development of students' inquiry and experimental skills.

The STEM-P model proposed in this study is based on the integration of the educational concept with the inquiry-based learning approach. Although existing models (for example, the 5E model) are aimed at developing students' scientific skills, they do not systematically consider the conceptual understanding of specific subject content, especially concepts in physics [17; 18; 19].

In this regard, the proposed model was developed as a structured pedagogical approach aimed at specific subject content and focused on deep understanding of the concept of pressure.

The model consists of the following interconnected stages:

- presentation of a problem situation;
- formulation of a hypothesis;
- experimental investigation;
- development of an engineering solution;
- analysis of results and drawing conclusions.

These stages are aimed at the comprehensive development of students' scientific thinking, inquiry activity, and engineering skills.

In the experimental group, the teaching of the concept of pressure was organized based on this STEM-P inquiry model. Below is an excerpt from a lesson on the topic "Pressure" in the 7th-grade physics course.

Stage 1: Presentation of a problem situation.

At this stage, students were given a problem task based on a real-life situation. For example, explaining the effect of pressure on different surfaces: "Why does a tank not sink in sand, while a light car may sink?" Students proposed various answers based on their own experience. At this stage, students' cognitive interest is increased and they strive to master the new topic (such tasks correspond to Hypothesis 4 and contribute to increasing learning motivation).

Stage 2: Formulation of a hypothesis.

At this stage, students propose their assumptions regarding the given problem, which contributes to the development of their scientific thinking and inquiry skills (in accordance with Hypothesis 5). For example: "Pressure depends on force", "Pressure depends on weight", "Pressure may depend on the contact area". Students attempted to justify their ideas and demonstrated reasoning skills.

Stage 3: Experimental investigation.

Students were given practical tasks to determine the dependence of pressure on force and area. For example, placing the same object on different surfaces (edge and flat side of a book), observing pressure using a syringe or a plastic bottle, etc. As a result, students experimentally determined that pressure increases as area decreases and decreases as area increases. Such tasks are aimed at deepening conceptual understanding and eliminating misconceptions (in accordance with Hypotheses 1 and 3).

Stage 4: Development of an engineering solution.

Students performed practical tasks based on the obtained results. For example: "Design a model of a vehicle that does not sink in sand." Students created models by increasing the contact area, while some constructed simple hydraulic devices

using syringes. This stage contributed to the development of engineering thinking and practical skills (in accordance with Hypotheses 2 and 5).

Stage 5: Analysis of results and conclusion.

Students analyzed the experimental results and drew scientific conclusions. For example, they proved that pressure is directly proportional to force and inversely proportional to area, compared their initial hypotheses, refined them, and reached a scientific understanding. This contributed to deepening their conceptual understanding (in accordance with Hypothesis 1).

During the instruction, practical work, engineering tasks, and digital resources (simulations) were used. This allowed students to apply theoretical knowledge in practice.

During the study, several measurement tools were used to comprehensively evaluate students' learning outcomes:

Conceptual test – included the physical meaning of pressure, the relationship between force and area, and applications of pressure.

Academic achievement test – consisted of theoretical questions and problem-solving tasks.

Motivation questionnaire – based on a 5-point Likert scale to determine students' interest and learning motivation.

Inquiry skills assessment rubric – aimed at evaluating hypothesis formulation, conducting experiments, data analysis, and drawing conclusions.

The applied instruments made it possible to comprehensively assess students' learning outcomes and ensured a multidimensional evaluation of their conceptual understanding, academic achievement, motivation, and inquiry skills. Test tasks were evaluated on a 100-point scale. The effectiveness and content validity of the instruments were verified through expert evaluation by subject teachers and methodological specialists.

The study was organized in three main stages: diagnostic, intervention, and final stages.

1. Diagnostic stage.

At this stage, conceptual and academic tests were conducted to determine students' initial level of knowledge. In addition, a motivation questionnaire was administered. The results made it possible to compare the baseline indicators of the experimental and control groups.

2. Intervention stage.

In this stage, the experimental group was taught using the STEM-P model, while the control group was taught using traditional methods. Problem tasks, practical activities, engineering projects, and digital simulations were systematically implemented. The duration of the intervention was 6 weeks, during which the "Pressure" unit was fully taught.

3. Final stage.

After the intervention, conceptual and academic tests were administered again. In addition, a motivation questionnaire was conducted and inquiry skills were assessed. This allowed comparison of the results between the experimental and control groups.

All stages of the study were systematically implemented, and the collected data were prepared for further statistical analysis.

Quantitative statistical methods were used to analyze the data. Independent samples t-tests were used to determine differences between groups, and paired samples t-tests were used to assess within-group changes.

To account for initial differences identified in the pre-test results, analysis of covariance was conducted, where pre-test scores were included as a covariate. This method made it possible to evaluate group differences independently of the intervention effect and to determine the actual impact of the teaching method.

Appropriate statistical indicators were determined to test the research hypotheses. Academic achievement and conceptual understanding were assessed by comparing pre-test and post-test results. Changes in misconceptions were determined using percentage indicators, while learning motivation was analyzed based on the mean values of questionnaire results.

The level of statistical significance was set at $p < 0.05$. Effect size was calculated to determine the practical significance of the teaching method.

Thus, the applied statistical methods made it possible to comprehensively test the research hypotheses and to evaluate the effectiveness of the STEM-P model in the educational process.

Results and discussion

Results and Their Analysis

The analysis of the research data made it possible to comprehensively evaluate the effectiveness of the proposed STEM-P model in the educational process. The results were analyzed according to the applied measurement tools in terms of academic achievement, conceptual understanding, learning motivation, and inquiry skills.

According to the results of the independent samples t-test, a statistically significant difference ($t = 2.21$, $p = 0.03$) was identified between the experimental group ($M = 52.4$, $SD = 6.8$) and the control group ($M = 49.1$, $SD = 7.1$). This indicates that the groups were not fully equivalent at the baseline level. Therefore, to refine the interpretation of the intervention results, an analysis of covariance was applied, taking into account the initial differences.

After the intervention, the mean score of the experimental group increased significantly to 78.6 points, while in the control group it reached only 62.3 points. The results of the paired samples t-test demonstrated that the post-test scores of

the experimental group were statistically significantly higher than the pre-test scores ($p < 0.05$). In addition, the results of the covariance analysis showed that the effect of the teaching method was highly significant ($p < 0.001$), indicating that the effectiveness of the STEM-P model was independent of the students' initial level.

The effect size calculated to evaluate the practical significance of the teaching method ($d = 0.82$) confirmed the high level of effectiveness of this model and its decisive role in improving academic achievement.

The effect size (d) was calculated as follows:

$$d = \frac{\text{difference in post - test scores}}{\text{pooled standard deviation}}$$

The coefficient d is a statistical indicator that characterizes the magnitude of the effect between two groups.

Table 1 – Pre-test and Post-test Results of Experimental and Control Groups

Group	Number of students	Pre-test (M $\pm$ SD)	Post-test (M $\pm$ SD)	Change
Experimental group	20	52.4 $\pm$ 6.8	78.6 $\pm$ 8.1	+26.2
Control group	24	49.1 $\pm$ 7.1	62.3 $\pm$ 7.5	+13.2

Note: M – mean, SD – standard deviation. Test scores were assessed on a 100-point scale

As shown in Table 1, the increase in learning outcomes in the experimental group was +26.2 points, whereas in the control group it was +13.2 points.

The initial and final test results of the two groups are presented in the form of a bar graph (Figure 1).

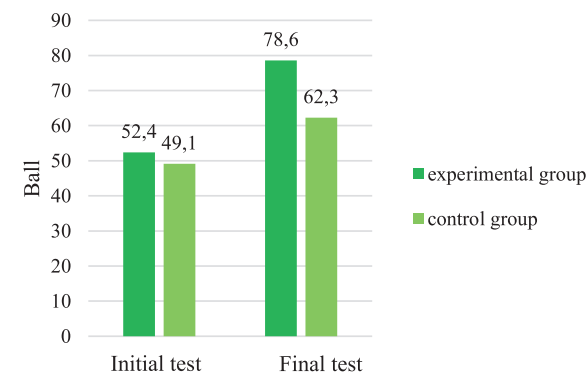


Figure 1 – Initial and final test results of the experimental and control groups

The pre-test and post-test results of both groups are presented in a bar chart (Figure 1). The diagram clearly shows that the increase in the experimental group is higher compared to the control group. Thus, the obtained results confirm the main (H1) and the second additional (H2) hypotheses of the study.

Conceptual Understanding

Students' conceptual understanding of the concept of pressure was assessed using a specialized conceptual test. The test tasks were aimed at determining students' understanding of the physical meaning of pressure, the relationship between force and area, and the laws governing changes in pressure under different conditions.

The pre-test results showed that both groups had similar conceptual misconceptions. In particular, most students associated pressure only with force and did not consider its dependence on the contact area. In addition, difficulties were observed in explaining how pressure changes when the same force is applied to different areas.

After the intervention, the results showed a significant improvement in the level of conceptual understanding in the experimental group. Specifically, the proportion of misconceptions related to the concept of pressure decreased from approximately 35 % to 10 %. This indicates that students began to correctly understand the dependence of pressure on force and area.

Although some positive changes were observed in the control group, the reduction in misconceptions was significantly lower (from approximately 33 % to 22 %) (Figure 2). This indicates that traditional teaching methods are limited in developing deep conceptual understanding.

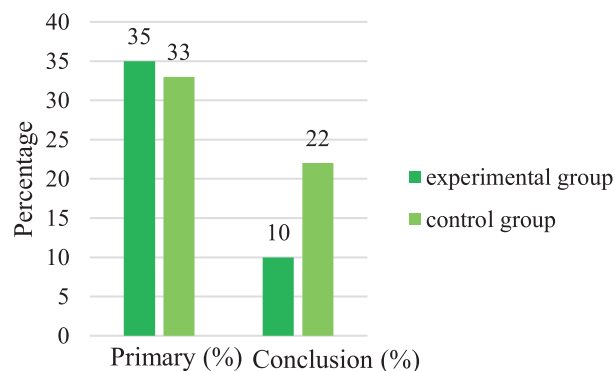


Figure 2 – Changing misconceptions about the concept of pressure

As shown in Figure 2, the level of misconceptions in the experimental group decreased significantly compared to the control group. The main reason for this improvement can be explained by the features of the STEM-P inquiry model. In particular, students independently identified the relationship between force and area through experimental activities and drew scientific conclusions based on data analysis. This enabled them to understand abstract concepts through concrete experience [4; 8].

Thus, the obtained results indicate that the STEM-P model effectively contributes to the deep and conscious understanding of the concept of pressure and confirm the third hypothesis of the study.

Learning Motivation

Students' interest in the subject and learning motivation were assessed using a questionnaire based on a 5-point Likert scale. The questionnaire included indicators such as interest in lessons, participation, willingness to complete tasks, and overall attitude toward the subject. The pre-test results showed that the motivation levels of the experimental and control groups were similar. The mean score in the experimental group was $M = 3.1$, while in the control group it was $M = 3.0$. After the intervention, a significant increase in motivation was observed in the experimental group. The mean score increased to $M = 4.2$, indicating a higher level of interest, engagement, and willingness to complete tasks. In contrast, the control group showed only a slight increase (from $M = 3.0$ to $M = 3.3$), indicating that traditional teaching methods had a limited effect on students' motivation.

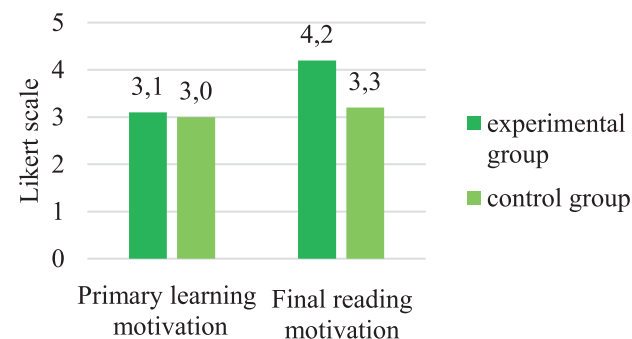


Figure 3 – Comparison of learning motivation levels in experimental and control groups before and after the intervention

Statistical analysis confirmed that the changes in the experimental group were significant ($p < 0.05$). As shown in Figure 3, the motivation level in the experimental group increased significantly, while the change in the control group remained minimal. Thus, the results confirm the fourth hypothesis.

Inquiry Skills

Students' inquiry skills were assessed using a rubric that included criteria such as hypothesis formulation, conducting experiments, data analysis, and drawing conclusions.

The pre-test results indicated that the level of inquiry skills in both groups was low to moderate. Many students experienced difficulties in formulating hypotheses and analyzing experimental results.

After the intervention, a significant improvement in inquiry skills was observed in the experimental group. Approximately 78 % of students were able to independently perform tasks related to hypothesis formulation, conducting experiments, and analyzing results. In addition, students were able to draw scientific conclusions based on experimental data.

In contrast, this indicator remained significantly lower in the control group (approximately 42 %). Most students relied on predefined models and showed difficulties in data analysis.

This difference can be explained by the systematic organization of inquiry activities within the STEM-P model, which includes stages of hypothesis formulation, experimentation, and data analysis.

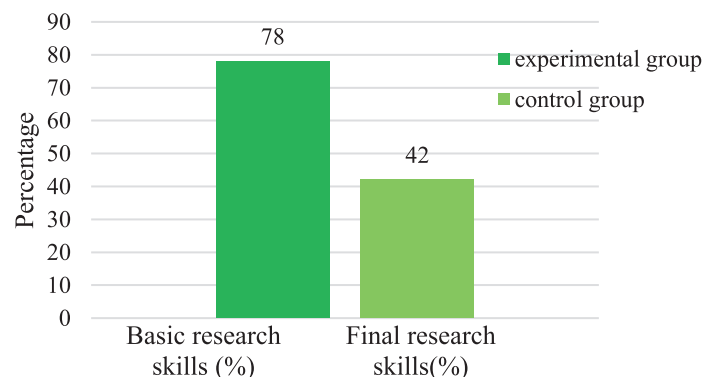


Figure 4 – Level of development of students' research skills

As shown in Figure 4, the level of inquiry skill development in the experimental group was significantly higher than in the control group. Thus, the results confirm the fifth hypothesis.

General Discussion

The results of the study showed that the STEM-based inquiry model (STEM-P Inquiry Model) has a positive effect on students' academic achievement, conceptual understanding, learning motivation, and inquiry skills. These findings

are consistent with existing research demonstrating the effectiveness of STEM education and inquiry-based learning approaches.

First, the results related to academic achievement showed a significant increase in the experimental group. This confirms that the STEM approach allows students not only to acquire knowledge but also to apply it in practice [6]. In addition, project-based STEM learning contributes to deeper understanding in physics [4].

Second, the improvement in conceptual understanding is one of the key advantages of the STEM approach. The significant reduction in misconceptions in the experimental group supports findings that STEM and inquiry-based learning promote deeper understanding. Meta-analytical studies show that STEM models incorporating inquiry elements demonstrate the highest effectiveness [20].

Third, the increase in learning motivation is another important outcome of STEM-based instruction. Research shows that STEM education enhances students' interest and motivation. Meta-analytical studies confirm that STEM instruction positively affects both motivation and academic achievement [7].

Fourth, the development of inquiry skills is one of the most significant outcomes of the STEM-P model. Studies show that STEM approaches have a strong impact on the development of scientific inquiry skills. Meta-analysis results indicate that STEM-based learning positively influences not only academic outcomes but also higher-order thinking and scientific skills [20].

Overall, the results indicate that integrating STEM and inquiry-based approaches enhances students' cognitive engagement and promotes deep and meaningful learning. This further confirms the importance of the interdisciplinary and practical nature of STEM education.

At the same time, the novelty of this study lies in the application of the STEM approach as a structured model aimed at teaching a specific physics concept (pressure). While many studies consider STEM as a general approach, this study links it directly to subject-specific content and focuses on the development of conceptual understanding.

Conclusion

In this study, the effectiveness of a STEM-based inquiry model (STEM-P Inquiry Model) in teaching the "Pressure" unit in the 7th-grade physics course was experimentally evaluated. The research results showed that the proposed model has a positive effect on students' academic achievement, conceptual understanding, learning motivation, and inquiry skills.

The results of academic achievement demonstrated a significant increase in the experimental group. In addition, the conceptual analysis revealed a reduction in students' misconceptions related to the concept of pressure. This confirms that

the STEM-P model is effective in promoting a deep understanding of scientific concepts.

The findings also showed an increase in students' learning motivation and their interest in the subject. Furthermore, a significant improvement in inquiry skills was observed in the experimental group. This indicates that the STEM approach enhances students' cognitive engagement by making the learning process more active and practice-oriented.

Thus, the STEM-P inquiry model can be considered an effective pedagogical tool in teaching physics. The implementation of the proposed model in general secondary schools can contribute to improving students' scientific understanding and developing their inquiry abilities.

From a practical perspective, the following recommendations should be considered for the effective implementation of the model:

- first, STEM tasks should be prepared and tested in advance before the lesson;

- second, tasks should be purposefully integrated into different stages of the lesson (problem situation, experimental activity, engineering project);

- third, the use of accessible and simple materials should be ensured to promote students' active participation.

However, the study has certain limitations. The research was conducted within a limited sample (44 students) in a single school and over a short period (6 weeks). In addition, the effectiveness of STEM education may depend on the instructional context. Therefore, future research is recommended to be conducted in diverse educational settings and over longer periods.

REFERENCES

1 **Bybee, R. W.** The case for STEM education: Challenges and opportunities [Text]. – Arlington: NSTA Press, 2013. – 111 p.

2 **Portillo-Blanco, A., Deprez, H., De Cock, M., Guisasola, J., Zuza, K.** A systematic literature review of integrated STEM education: Uncovering consensus and diversity in principles and characteristics [Text] // Education Sciences. – 2024. – Vol. 14. – No. 9. – P. 1028. – <https://doi.org/10.3390/educsci14091028>

3 **Amanova, A. K., Butabayeva, L. A., Abayeva, G. A., Umirbekova, A. N., Abildina, S. K., Makhmetova, A. A.** A systematic review of the implementation of STEAM education in schools [Text] // Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education. – 2025. – Vol. 21. – No. 1. – P. em2568. – <https://doi.org/10.29333/ejmste/15894>

4 **Uden, L., Sulaiman, F., Ching G., Rosales, J. J. Jr.** Integrated science, technology, engineering, and mathematics project-based learning for physics learning from neuroscience perspectives [Text] // Frontiers in Psychology. – 2023. – Vol. 14. – P. 1136246. – <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1136246>

5 **Abdurrahman, A., Maulina, H., Nurulsari, N., Sukamto, I., Umam, A. N., Mulyana, K. M.** Impacts of integrating engineering design process into STEM makerspace on renewable energy unit to foster students' system thinking skills [Text] // In Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – No. 4. – P. e15100. – <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15100>

6 **Zhou, S., Richter, A., Wang, Y., Huang, M.** A meta-analysis of STEM integration on student academic achievement [Text] // In Research in Science Education. – 2025. – Vol. 55. – No. 5. – P. 1273–1302. – <https://doi.org/10.1007/s11165-024-10216-y>

7 **Kurt, A., Akinci, M.** The effect of STEM practices on students' attitudes and achievements : A meta-analysis study [Text] // In International Journal of Assessment Tools in Education. – 2025. – Vol. 12. – No. 4. – P. 1148–1169. – <https://doi.org/10.21449/ijate.1459076>

8 **Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., de Jong, T., van Riesen, S. A. N., Kamp, E. T., Manoli, C. C., Zacharia, Z. C., Tsourlidaki, E.** Phases of inquiry-based learning : Definitions and the inquiry cycle [Text] // In Educational Research Review. – 2015. – Vol. 14. – P. 47–61. – <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2015.02.003>

9 **Kelley, T. R., Knowles, J. G.** A conceptual framework for integrated STEM education [Text] // In International Journal of STEM Education. – 2016. – Vol. 3. – Article 11. – <https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>

10 **Saseendran, A., Thomas, M. V.** Design thinking in science and integrated STEM/STEAM education: Trends, challenges, and future directions from a systematic review [Text] // In STEM Education. – 2025. – Vol. 5. – No. 6. – P. 1058–1101. – <https://doi.org/10.3934/steme.2025046>

11 **Syukri, M., Haya, F., Maghfirah, S., Herliana, F., Rasul, M. S., Pratama, H.** STEM-based engineering design process models in physics learning: A systematic literature review [Text] // In European Journal of STEM Education. – 2026. – Vol. 11. – No. 1. – P. 4. – <https://doi.org/10.20897/ejsteme/17784>

12 **Wandi, W., Yuberti, Y., Latifah, S., Saregar, A., Misbah, M.** Theory and practice of conceptual understanding in physics education: A literature review and bibliometric analysis of the recent decades [Text] // In Kasuari : Physics Education Journal. – 2023. – Vol. 6. – No. 2. – P. 37–46.

13 **Kaltakci-Gurel, D., Eryilmaz, A., McDermott, L. T.** Identifying pre-service physics teachers' misconceptions about force and pressure [Text] //

In European Journal of Physics. – 2016. – Vol. 37. – No. 4. – P. 045705. – <https://doi.org/10.1088/0143-0807/37/4/045705>

14 **Ammase, A., Siahaan, P., Fitriani, A.** Identification of junior high school students' misconceptions on solid matter and pressure liquid substances with four-tier test [Text] // In Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1157. – No. 2. – P. 022034. – <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1157/2/022034>

15 **Shadish, W. R., Cook, T. D., Campbell, D. T.** Experimental and quasi-experimental designs for generalized causal inference [Text]. – Boston : Houghton Mifflin, 2002.

16 **Creswell, J. W.** Educational research: Planning, conducting, and evaluating quantitative and qualitative research [Text]. – 5th ed. – Boston : Pearson, 2014.

17 **Duran, L. B., Duran, E.** The 5E instructional model: A learning cycle approach for inquiry-based science teaching [Text]. In The Science Education Review. – 2004. – Vol. 3. – No. 2. – P. 49–58.

18 **Polanin, J. R., Austin, M., Taylor, J. A., Steingut, R. R., Rodgers, M. A., Williams, R.** Effects of the 5E instructional model: A systematic review and meta-analysis [Text] // In AERA Open. – 2024. – Vol. 10. – <https://doi.org/10.1177/23328584241269866>

19 **Negerie, D., Habtamu, T., Tafesse, T.** Effects of the 5E guided inquiry-based learning model on science process skills of secondary school biology students in Mattu town, Ethiopia [Text] // In Discover Education. – 2026. – Vol. 5. – Article 320. – <https://doi.org/10.1007/s44217-026-01351-x>

20 **Cao, X., Lu, H., Wu, Q., Hsu, Y.** Systematic review and meta-analysis of the impact of STEM education on students' learning outcomes [Text] // In Frontiers in Psychology. – 2025. – Vol. 16. – Article 1579474. – <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1579474>

Received 14.05.26.

Received in revised form 29.05.26.

Accepted for publication 06.09.26.

*Г. М. Аралбаева¹, С. Н. Нуркасымова², Қ. Е. Набиева³, Г. М. Кеңес⁴

^{1,2,3,4}Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

14.05.26 ж. баспаға түсті.

29.05.26 ж. түзетулерімен түсті.

06.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

**ҚЫСЫМ ҰҒЫМЫН ОҚЫТУДАҒЫ STEM
НЕГІЗІНДЕГІ ЗЕРТТЕУШІЛІК МОДЕЛЬ**

Бұл зерттеу жұмысында 7-сынып оқушыларына физика пәнінен «Қысым» тарауын оқытуда STEM негізделген зерттеушілік модельдің (STEM-P Inquiry Model) тиімділігі бағаланды. Зерттеудің мақсаты – ұсынылған модельдің оқушылардың қысым ұғымын концептуалдық түсінуіне, академиялық жетістігіне, оқу мотивациясына және зерттеушілік дағдыларына әсерін анықтау. Зерттеуде STEM және зерттеушілік оқыту тәсілдерін біріктіретін, нақты физикалық ұғымды меңгеруге бағытталған педагогикалық модельдің әзірленуі және оның эксперименттік тұрғыдан тексерілуі болып табылады. Зерттеу квази-эксперименттік дизайн негізінде жүргізілді. Зерттеуге жалпы саны 44 оқушы қатысты. Зерттеу нәтижелері эксперименттік топтың оқу жетістігі статистикалық тұрғыдан жоғарылағанын ($p < 0.05$) және модельді қолданғандағы әсер мөлшері жоғары деңгейде болатынын ($d = 0.82$) көрсетті. Сонымен қатар, оқушылардың концептуалдық түсіну деңгейі жақсарып, қате түсініктері азайып, оқу мотивациясымен зерттеушілік дағдылардың дамуы байқалды. Бұл нәтижелер STEM-P моделінің физика пәніндегі күрделі ұғымдарды меңгертуде тиімді педагогикалық құрал екенін растайды. Зерттеу барысында эксперименттік топтағы қате түсініктердің үлесі 35 %-дан 10 %-ға дейін айтарлықтай төмендеп, оқушылардың 78 %-ы зерттеушілік тапсырмаларды өз бетінше орындау деңгейіне жетті. Қорытындылай келе, ұсынылған модельді мектеп тәжірибесінде қолдану оқушылардың ғылыми түсініктерін тереңдетуге және олардың зерттеушілік қабілеттерін дамытуға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: физика білімі, қысым ұғымы, STEM оқыту, зерттеушілік оқыту, STEM-P моделі, оқу мотивациясы, зерттеушілік дағды.

*Г. М. Аралбаева¹, С. Н. Нуркасымова², Қ. Е. Набиева³, Г. М. Кеңес⁴

^{1,2,3,4}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 14.05.26.

Поступило с исправлениями 29.05.26.

Принято в печать 06.09.26.

**ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ STEM-МОДЕЛЬ
ОБУЧЕНИЯ ПОНЯТИЮ ДАВЛЕНИЯ**

В данном исследовании была оценена эффективность исследовательской модели, основанной на STEM (STEM-P Inquiry Model), при обучении разделу «Давление» в курсе физики 7 класса. Цель исследования – определить влияние предложенной модели на концептуальное понимание учащимися понятия давления, их академическую успеваемость, учебную мотивацию и исследовательские навыки. В работе представлена разработка педагогической модели, интегрирующей STEM и исследовательский подход, направленной на усвоение конкретного физического понятия, а также ее экспериментальная проверка. Исследование проводилось на основе квазиэкспериментального дизайна. В исследовании приняли участие 44 учащихся. Результаты показали, что учебные достижения экспериментальной группы статистически значимо повысились ($p < 0.05$), а величина эффекта применения модели оказалась высокой ($d = 0.82$). Кроме того, наблюдалось улучшение уровня концептуального понимания учащихся, снижение количества ошибочных представлений, а также рост учебной мотивации и развитие исследовательских навыков. Полученные результаты подтверждают, что модель STEM-P является эффективным педагогическим инструментом при обучении сложным понятиям в физике. В ходе исследования доля ошибочных представлений в экспериментальной группе снизилась с 35 % до 10 %, а 78 % учащихся достигли уровня самостоятельного выполнения исследовательских заданий. В заключение следует отметить, что внедрение данной модели в школьную практику способствует углублению научного понимания учащихся и развитию их исследовательских способностей.

Ключевые слова: физическое образование, понятие давления, STEM-обучение, исследовательское обучение, модель STEM-P, учебная мотивация, исследовательские навыки.

FTAMP 14.35.07

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/249-263>

***М. Аққағаз¹, С. М. Сеитова²**

^{1,2}І. Жансүгіров атындағы Жетісу университеті,
Қазақстан Республикасы, Талдықорған қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2344-3881>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4352-6355>

*e-mail: akkagaz18@gmail.com

БОЛАШАҚ МҰҒАЛІМДЕРДІҢ ЗЕРТТЕУ ҚҰЗІРЕТТІЛІГІНІҢ ДЕҢГЕЙІН АЙҚЫНДАУ КРИТЕРИЙЛЕРІ

Бүгінгі таңда, болашақ педагогтердің зерттеу дағдыларының дамуы бүгінгі күннің өзекті мәселерінің бірі. Бұл мақалада зерттеу құзыреттілігін дамытуда зерттеу тапсырмаларын ұйымдастыру және болашақ математика мұғалімдерінен зерттеу дағдыларын анықтауға бағытталған. Математика пәнінде зерттеу құзыреттілігін ұйымдастыруда: когнитивтік, рефлексивтік, іс-әрекеттік, мотивациялық сияқты критерийлер арқылы сипатталды. Технологиялық пәндік дағдыларды меңгеруде жасанды интеллект құралдарын қолданылып, зерттеуімізден, болашақ математика мұғалімдердің 40,3 % құрады, осыдан білімгерлердің зерттеу құзыреттілігі мен қатар технологиялық қабылет қалыптасуы тәжірибемізге оң әсерін берді. Ұсынылған жұмыстың мақсаты, болашақ педагогтардың зерттеу құзыреттілігін дамыту түрлерін теориялық тұрғыда талдау, болашақ зерттеуші педагогтердің зерттеу жайлы білімдерінің деңгейін сауалнама арқылы айқындау және олардың зерттеу дағдыларын дамыту бойынша арнайы зерттеу тапсырмалары ұсынылып, нәтижелерін талқыланды. Тапсырмаларды орындау барысында жасанды интеллект құралдары қолданылып, білімгерлердің пәндік білімімен қоса, математикалық тапсырмаларды шешуде жасанды интеллекттің берген анықтамаларын өз бетінше тұжырым жасай алу қабылеті зерттеу жұмысымыздың тиімділігін көрсетті. Сонымен қатар, TRACK моделі яғни технологиялық және педагогикалық дайындық туралы шолу жасалды. Біздің пікірімізше, әр педагогтың зерттеу әрекетінің даму деңгейлері оның білім беруде

кәсіби өсуі мен мотивациялық дағдысы мен жасанды интеллекті дамыған уақытта оны қатар пайдалану білімгердің технологиялық икемділігін арттырады деп санаймыз.

Кілтті сөздер: зерттеу құзыреттілігі, зерттеу компоненттері, зерттеу тапсырмалары, математика мұғалімдері, Track.

Кіріспе

Білім туралы 2022-2024жылғы жолдауында Қасым-Жомарт Кемелұлы Тоқаев «Бүгінгі таңда білім беру заман талабына сай соның ішінде еңбек нарығындағы сұранысқа сай болуы керек. Білімгерлер тек теориялық біліммен шектелмей, оны практикада қолдана алуы қажет» [1] делінген, олай болса болашақ мұғалімнің кәсіби маман болып қалыптасуына бүгінгі таңда жобалық оқыту әдістерін қолданумен қатар зерттеу құзыреттілігін дамыту маңызды. Себебі маман ретінде тек білімге бағыттаушы рөлін ғана емес, өз саласында ғылыми-зерттеу жұмысты жүргізетін, зерттеу әрекетін орындайтын және ақпараттық технологияларды қолдана алуы міндетті шарттардың бірі.

Отандық педагогика зерттеулерінде Ш. Т. Таубаева. «Оқытудың белсенді әдістері, соның ішінде жобалық оқыту, болашақ мұғалімнің зерттеушілік әрекетін қалыптастырудың тиімді тәсілі» деп тұжырымдайды [2]. Ал А.Е. Әбілқасымова «Математика мұғалімін даярлауда қолжетімді педагогикалық технологияларды қолдану оның кәсіби құзыреттілігін арттыратын негізгі талаптардың бірі» деп сипаттайды [3]. Ал, К. Жанпейісова білім беру процесінде заманауи педагогикалық технологияларды қолдану білімгерлердің зерттеушілік белсенділігін арттыруға ықпал ететінін атап өтеді [4].

Білім беруде әсіресе, болашақ математика мұғалімдерінің пәндік құзыреттілігі мен технологиялық қабілетін дамытуды қарастыра отырып, қазіргі кездегі озық әрі қарқынды дамып жатқан моделдердің бірі TRACK-ті зерттеуімізден сипаттаймыз. Бұл ұғымды Мэттью Келлер мен Пунья Мишра 2006 жылы зерттеулерінде енгізген [5]. Track моделіндегі мұғалімнің педагогикалық мазмұндық білімінен, оқыту әдістерінен Шульманның зерттеулерінде бар. Ал, Пирсон, мұғалімдердің мазмұндық білімін дамыта отырып, технологияны енгізуді ұсынған. Осыдан “технологиялық білім” тұжырымы қалыптасты [5]. Болашақ маманның кәсіби маман ретінде орнығу үшін, алдымен зерттеу құзыреттілігі ұғымына бірнеше зерттеушілердің пікірлеріне тоқталсақ. Е.В.Шишкина, математика мұғалімдерінің зерттеу құзыреттілігін оқу танымдық процестік әрекетінде қарастырса [6], ал Л. В. Берсенова болжам жасау, анықтау және нәтижелерді талдау кезеңдерінен құзыреттілік моделін ұсынған [7]. Соңғы зерттеулерден

байқағанымыздай, білім беруде және мұғалімдерді даярлауда: жобаға негізделген оқыту мен технологиялық және педагогикалық дайындық яғни Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK), зерттеу қабілеттері сияқты бөлімдер бөлек зерттелінген, алайда, оларды жасанды интеллектпен қоса болашақ мұғалімдердің зерттеу қабілеті әлі толық зерттелмеген. Осы тұрғыдан, біздің зерттеуімізде осы мәселені алға тартып, осы бағыттағы зерттеу жүргізу маңызды әрі өзекті деп санаймыз.

Материалдар мен әдістері

Зерттеу жұмысымызда теориялық негізі ретінде TRACK тұжырымдамасын алдық, себебі болашақ маманның пәндік, педагогикалық, технологиялық білімдерін біріктіріп, технология ретінде жасанды интеллект құралдары қолданылды. Зерттеуіміз 3 кезеңнен тұрды:

1. Білімгерлердің бастапқы білімін диагностикалау (сауалнама)

Мұғалімдердің зерттеу құзыреттілігінің деңгейін анықталған соң, келесі кезеңде арнайы зерттеу тапсырмалары дайындалды және эксперттерден өңделіп құрылды.

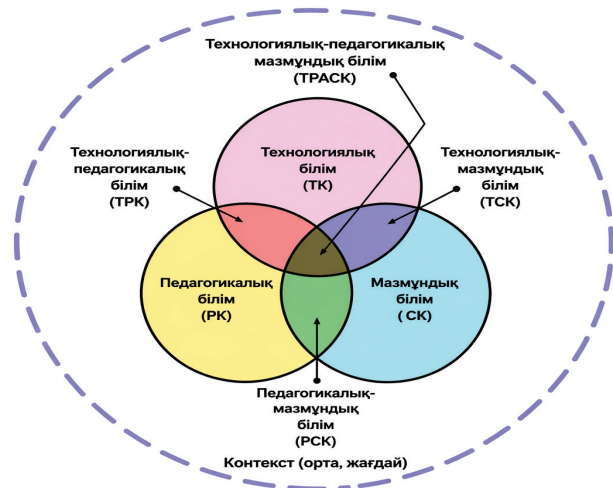
2. Білімгерлерге арнайы әзірленген зерттеу тапсырмаларын ұсындық. Зерттеу тапсырмалары оқу траекториясының негізінде құрылды.

3. Қорытынды және алдыңғы нәтижелерін сараптамалық талдаудан өткіздік.

Математикалық білімді оқытуда жүзеге асыру үшін әртүрлі жүйелер бар. Соладың бірі, шетелдік зерттеуші Мишра және т.б ғалымдар ұсынған: технологиялық, педагогикалық, мазмұнды білім (TPACK) моделі. Бұл модель түрі білім беру технологиясын зерттеуде, теориялық зерттеулердің тұжырымдамасын негіздеуден пайда болды және мына үш негізгі салалардан тұратынын анықталды:

Осы үш байланыстардан жаңа білім пайда болады:

- ТПБ технологиялық педагогикалық білім
- ППБ педагогикалық пәндік білім
- ТПБ технологиялық пәндік білім

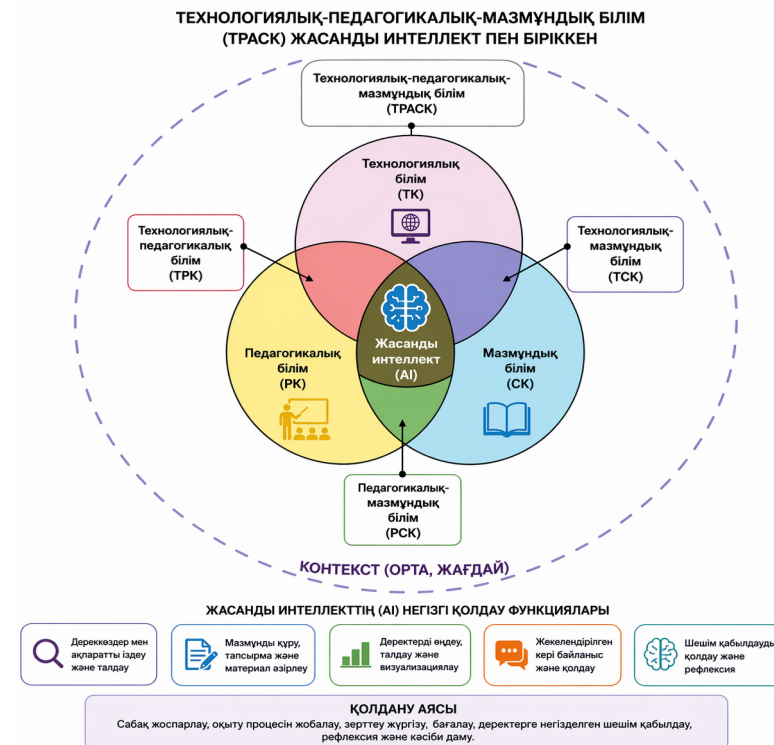


1-сурет – TRACK құрылымы және оның білім компоненттері
(Mishra & Koehler зерттеуі, 2006 жыл негізінде,
<https://www.tpack.org/2020> сайтынан
жылы 15 ақпанында қол жеткізілді)

Бұл модельді пайдалану үшін оқыту процесіне жаңа мүмкіндіктерді енгізуіміз қажет етеді. Себебі осы мүмкіндіктер арқылы болашақ мұғалімдердің технологияның маңыздылығын түсіну үшін әртүрлі дәстүрлі емес жаңа ғылыми әдістерді іздеуге негіз болады деп санаймыз.

Track моделі – мұғалімнің өз пәнін білуі мен қатар оны қалай оқыту керектігін біріктерін оқыту траекториясы. Алайда, технология барлық мәселені шеше алмайды, сондықтан оны қашан және не үшін қолданатынын дұрыс білу керек [8].

Сондықтан математика сабағында АКТ технологияларын интеграциялау үшін алдымен, педагогика, технология, білім мазмұнын сабақтастырып жұмыс істеуі қажет деп сипаттайды. Зерттеулерде, Track моделін пайдаланып іс тәжірибеде, мысалы, шетелдік ғалым Kığaçsılar [9] математика мұғалімдері білім беруде GeoGebra жасанды интеллект пайдаланғанда біршама қиындықтар кездестірген деп, ал Аревало-Дуарте зерттеуінде: білімгерлер технологияның күшті жақтарын түсініп оны жүзеге асыра алады, дегенмен олар мұғалімдердің әртүрлі технологияларды қолдана алатынына сенімсіздіктерін білдірді деп тұжырымдайды [10].



2-сурет – TRACK+AI (жасанды интеллект)

TRACK моделіндегі жасанды интеллект құралында: мұғалімнің педагогикалық-мазмұндық білімін практика жүзінде жасанды интеллект құралдарымен шешім қабылдауды, кері байланыс алуды, нәтижелерді талдау, визуализациялау жасау сияқты міндеттермен сипатталады.

Зерттеу құзіреттілігі өзара байланысты бірнеше компоненттерден тұрады: мотивациялық-құндылық, когнитивтік, әрекеттік-операционалдық және рефлексивтік-бағалау. Бұл компоненттер зерттеу әрекетін тиімді жүзеге асыру үшін қажетті білім, дағды және тұлғалық қасиеттерді біріктіреді. Біздің зерттеуімізде, зерттеу құзіреттілігіне «қатынас, зерттеуге мотивация», немесе «ғылыми қызығушылық» сияқты айырмашылықтарды іздеу жүйелерінен байқадық.

1-кесте – зерттеу құзіреттілігінің құрылымдық компоненттері

Компонент түрлері	шетелдік зерттеулерде	Отандық зерттеулерде
Мотивациялық-құндылық компоненті	қатынас, зерттеуге мотивация [11]	ғылыми қызығушылық, мотивация
Когнитивтік компонент	пәндік білім, зерттеу әдіснамасы [15]	теориялық білім, әдіснамалық білім [12]
Әрекеттік-операционалдық компонент	зерттеу дағдылары, мәселе шешу [13]	практикалық дағдылар, зерттеу әрекеті
Рефлексивтік-бағалау компоненті	рефлексия, өзін-өзі бағалау [14]	өзіндік талдау, рефлексия

Мотивациялық компонент мұғалімнің ғылыми-зерттеу әрекетіне қызығушылықты танымдық және ғылыми ізденіспен сипаттайды. Мұғалімнің зерттеу жұмысына қатысуы көбінесе ғылыми қызметтің маңызын түсіну және зерттеуге деген ішкі мотивацияға байланысты болады [11].

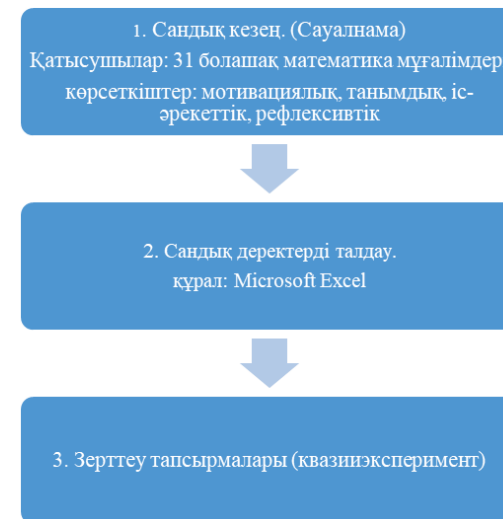
Когнитивтік компонент зерттеу жүргізуге теориялық білім мен ғылыми ұғымдарды меңгеру. Бұл компонентте: зерттеу әдістемесі, ғылыми зерттеу әдістері және ғылыми ақпаратты талдау дағдылары білімгерде қалыптасады [12].

Операциялық іс-әрекеттік компонент зерттеу әрекетін тәжірибеде жүзеге асыру қабілеттерін қамтиды. Білімгер мәселені анықтап, гипотеза құрып, ғылыми эксперимент жүргізіп, алынған деректерді өңдеп, нәтижелерді ғылыми түрде ұсынады [13].

Рефлексивтік компонент зерттеу нәтижелерін талдау, бағалау және ғылыми қорытынды жасау қабілетін білдіреді. Мұғалім өзінің зерттеу әрекетіне сыни көзқараспен карап, ғылыми нәтижелерді талдайды [14].

Шетелдік зерттеуші Фират 2022 жылдың соңынан бастап білім беруде жасанды интеллект пайда болғаннан бері, пайдаланушылар жасанды интеллектті білім беру жүйесінің эволюциясына әкелуі мүмкін және педагогтардың ролін өзгерте алады деп санайды [15].

Зерттеу жұмысымызда сандық және тапсырмалық талдау әдістерін қолдандық. Зерттеуіміз екі кезеңді қамтыды.



3-сурет – Квазиэксперимент құрылымы

№	Ғылыми жоба немесе мақала жазып көрдіңіз бе?	ия 76,5%	жоқ 23,5%
1	Математика сабағында зерттеу сипатындағы тапсырмаларды қолдану қызықты деп ойлаймын	4,87%	36%
2	Мен зерттеу жұмысын болашақ мұғалім үшін маңызды деп санаймын.	3,88%	47,1%
3	Ғылыми зерттеу құзыреттілігі кәсіби дамуым үшін маңызды.	5,9%	50%
4	Жаңа педагогикалық идеяларды зерттеуге қызығамын.	5,9%	59%
5	Мен зерттеу құзыреттілігінің мақсаты мен міндетін анықтай аламын.	2,9%	38,2%

4-сурет – Сауалнама көрсеткіштері

Осы зерттеу дизайнын алған себебіміз, алынған нәтижелерді статистикалық тұрғыдан ауқымды етіп көрсету емес, біріншіден нәтижелерді терең түсіну үшін, екіншіден сипаттамалық талдаулардан математика мұғалімдерінің зерттеу құзыреттілігін қалыптасуына пәндік

және технологиялық дағдыларын көрсету. Зерттеу базасы - Жетісу облысы, Талдықорған қаласы І.Жансүгіров атындағы университеті, күндізгі оқу бөлімінің 2-3 курс студенттері таңдалынды. Зерттеу барысында сауалнамадан болашақ мұғалімдердің зерттеу құзыреттілігінің деңгейі анықталып, білімгерлердің зерттеу компоненттерінің қандай деңгейде анықтау мақсатында сауалнаманың ішкі сенімділігін Кронбах альфа коэффициенті есептелді. Талдау нәтижесінде сенімділік коэффициенті $\alpha = 0,91$ құрады. Демек, алынған нәтижеге сүйеніп біз сауалнаманың жоғары деңгейде екенін және алынған нәтиженің тұрақты деп санаймыз.. Болашақ математика мұғалімдерінің 2-3 курс білімгерлері зерттеуге қатысты. Жалпы саны - 48. Зерттеу құзыреттілігінің сұрақтары төрт компоненттерді қамтыды: мотивациялық, когнитивтік, іс әрекеттік, рефлексивтік. Сауалнама Likert шкаласы (1–5 балл) негізінде құрылды.

Сондай-ақ екінші кезеңде, білімгерлерден зерттеу тапсырмалары алынды, когнитивтік деңгейде математика есептерін өз шешімдерімен шешіп, ал екінші рет сол тапсырмаларды жасанды интеллект құралдары: Geo Gebra, Google Gemini қолданылып екі нәтижелер салыстырылып, талданды. Осылайша, бұл әдістер нәтижелерді толықтырып, болашақ математика білімгерлерінің зерттеу қабілетінің қалай және қандай деңгейде қалыптасатынын анықтауға зерттеу жұмысымызға көмектесті. Сондықтан, бұл әдісіміз толық эксперимент емес, “квазиэксперимент” түрінде өткізілді. Алынған нәтижелерді өңдеуде: сипаттау әдісі мен салыстыру әдісі қолданылды.

Нәтижелер және талқылау

Зерттеу жүргізу кезінде біз алынған деректерді талдау мақсатында екіфакторлы дисперсиялық талдау (ANOVA) қолдандық. Талдау көрсеткіші білімгерлердің нәтижелерінен зерттеу құзыреттілігінің көрсеткіштерінде белгілі бір айырмашылықтардың бар екенін көрсетті, алайда дисперсиялық талдау нәтижелері бойынша респонденттер арасындағы айырмашылықтар статистикалық тұрғыдан маңызды деген тұжырымға келдік ($F = 13,53$; $p < 0,05$). Сол себепті, білімгерлердің зерттеу құзыреттілігі деңгейінің әртүрлі екенін білдіреді.

Сондай-ақ, білімгерлердің басым бөлігі жоғары балл көрсеткені байқалады. Орташа мәндер 3,5 пен 5 аралығында өзгерді, ал зерттеу құзыреттілігінің жалпы деңгейі орта көрсеткіштен жоғары екенін көрсетеді.

Студенттерге арнайы тапсырмалар мен бағалау критерийлері құрылып Жетісу облысы Жетісу жоғары оқу орнындағы білім беру expertінен өтіп талданды. Арнайы әзірленген зерттеу тапсырмалары болашақ математика мұғалімдерінің зерттеу дағдыларын дамыту жолдарын айқындау мақсатында құрылды.

Зерттеу жұмысыздың нәтижелерін өңдеуде Пирсонның хи квадратты статистикалық өңдеуді алдық.

Жалпы студенттер саны: 37

Хи-квадрат статистикасы (χ^2): 10.1622

p-мәні (p-value): 0.0378

Нәтиже: Статистикалық маңызды айырмашылық бар.

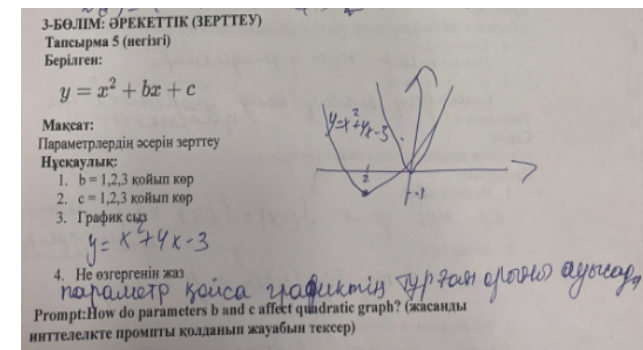
Студенттердің зерттеу құзыреттілігі деңгейлерге біркелкі таралмаған.

Статистикалық өңдеу нәтижелерінен, біздің зерттеуімізде, білімгерлердің зерттеу құзыреттілігінің таралау деңгейі (төмен, орта, жоғары) талданып, $X^2 = 10.16$ көрсеткішін көрсетсе, p-мәні 0.03 мәніне тең. $p < 0.05$ болғандықтан, болашақ мамандардың зерттеу құзыреттілігі деңгейі айырмашылық тұрғыдан кездейсоқ емес екенін ғылыми тұрғыдан дәлелдейді.

Зерттеу тапсырмаларының сапалық деңгейін: когнитивтік, тәжірибелік-зерттеушілік және технологиялық сияқты критерийлерге бөлдік. Мысалға,

- когнитивтік деңгей: білімгерлер $f(-x)=f(x)$ функцияның қасиетін симметриялы түрде беріп қана қоймай, оны визуалды түрде сипаттаған және есептің шартымен байланыстырып, логикалық талдау бере алған. Бұл көрсеткіш білімгерлердің математикалық есептерді абстрактілеу қабілетінің өсу көрсеткішін көрсетеді.

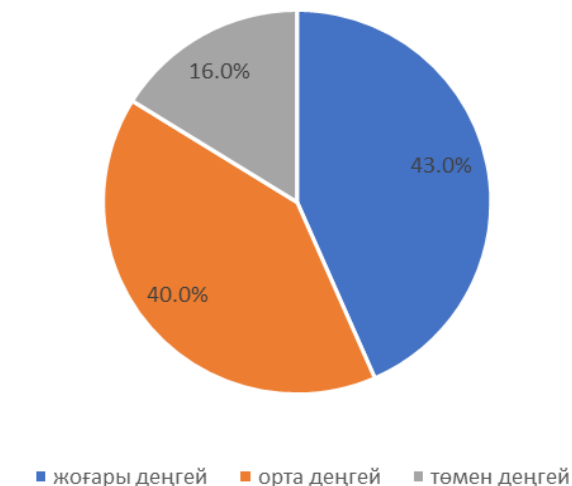
- тәжірибелік-зерттеушілік деңгей: зерттеу тапсырмаларын орындауда $y=x^2+4x-3$ функцияның график әсеріне студенттер коэффициенттер мәндерін өзгерте отырып, параболаның координаталар жазықтығындағы жату нүктелерін өздігінен тұжырымдаған.



5-сурет – А – студентінің орындаған жұмысы

- технологиялық деңгей. Білімгерлердің тапсырмаларды жасауда есепті өз шешімімен шешіп тұжырым берсе, екінші тұрғыдан оны жасанды интеллектпен нәтижені салыстыра отырып «мағынасы бірдей»,

«тез түсінуге көмектесті» деген сияқты пікірлерінен жасанды интеллект құралдарын когнитивтік көмекші құрал ретінде қолдану дағдысының бар екенін анықтадық.



6-сурет – Зерттеу құзыреттілігінің таралау деңгейі

Нәтижелерден студенттердің зерттеу құзыреттілігінің деңгейлері келесідей көрсеткіштер көрсетті: төмен деңгейде 15 студент (40,2 %), орта деңгейде 16 студент (43,2 %) және жоғары деңгейде 6 студент (16,3 %) анықталды (Сурет 1). Алынған пайыздық көрсеткіштер студенттердің жартысынан астамы (83,7 %) зерттеушілік дағдыларды әлі де толық меңгермегенін немесе тек орташа деңгейде ие екенін көрсетеді.

Қорытынды. Қорытындылай келе, білімгерлердің пәндік, мазмұндық білім мен технологиялық критерийлерін ескере отырып арнайы әзірленген тапсырмалар зерттеу дағдыларын анықтап қана қоймай, зерттеуімізге болашақ мамандардың даярлауда маңызды әрі қажетті талаптардың бірін орындауға әсерін берді. Цифрлық технологияларды тиімді қолданудан білімгерлерден, математикалық шешімдерді өз нұсқаларымен шешіп қана шектелмей, оны жасанды интеллект құралдарымен интеграциялап тұжырым жасай алу қабілетінен көрдік. Ең маңызды көрсеткіш зерттеу компоненттерінің бірі іс-әрекеттік және технологиялық дағдылары жоғары болғанымен қатар, зерттеушілік іс әрекет білімгерлердің кәсіби дамуына және математикалық тапсырмаларды шешуде қажет деп санайды

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 **Тоқаев, Қ.-Ж.** Қазақстан халқына Жолдауы [Текст]. – Астана, 2023. – [каз. тілінде].
- 2 **Тәубаева, Ш. Т.** Педагогика [Текст]. – Алматы : Қазақ университеті, 2016. – 340 б.
- 3 **Әбілқасымов, А. Е.** Математиканы оқыту әдістемесі [Текст]. – Алматы : Қазақ университеті, 2013. – 336 б.
- 4 **Жанпейісова, К.** Модульдік оқыту технологиясы [Текст]. – Алматы, 2002. – 176 б.
- 5 **Mishra, P., Koehler, M.** Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge [Текст] // Teachers College Record. – 2006. – Vol. 108, No. 6. – P. 1017–1054.
- 6 **Шишкина, Е. В.** Формирование исследовательской компетентности будущего учителя математики : дис. ... канд. пед. наук [Текст]. – М., 2005. – 180 с.
- 7 **Берсенова, Л. В.** Формирование исследовательской компетентности студентов педагогического вуза : дис. канд. пед. наук [Текст]. – Омск, 2007. – 190 с.
- 8 **Belfiori, V.** Use of the TPACK framework by mathematics teacher training students [Текст] // Acta Latinoamericana de Matemática Educativa. – 2014. – P. 1733–1740.
- 9 **Yerzhanova, G., Autayeva, A., Mazhinov, B., Iralina, M., Nishanbayeva, S.** Features of the development of research competence in future special education teachers [Текст] // Frontiers in Education. – 2025. – Vol. 10. – Article 1610757. – <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1610757>
- 10 **Бейсенбаева, А. А.** Жоғары педагогикалық білім беру теориясы [Текст]. – Алматы : Ғылым, 2010. – 312 б.
- 11 **Belfiori, V.** Use of the TPACK framework by mathematics teacher training students [Текст] // Acta Latinoamericana de Matemática Educativa. – México D.F. : Comité Latinoamericano de Matemática Educativa A.C., 2014. – P. 1733–1740. [Electronic resource] – URL: <http://funes.uniandes.edu.co/6059/1/BelfioriUsoDelMarcoALME2014.pdf> (Дата обращения: 22.11.2019).
- 12 **Kıraççılar, M.** Use of GeoGebra in mathematics education and pre-service teachers' experiences: challenges in technological integration [Текст] // Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry. – 2015. – Vol. 6, No. 4. – P. 1–23.
- 13 **Arévalo-Duarte, A., Cañada-Cañada, F., González-García, F.** The development of technological pedagogical content knowledge in preservice mathematics teachers [Текст] // Journal of New Approaches in Educational

Research. – 2017. – Vol. 6, No. 2. – P. 105–112. – <https://doi.org/10.7821/naer.2017.7.237>.

14 **Ivanenko, N. A., Mustafina, G. M., Sagitova, V. R., Akhmetzyanov, I. G., Khazratova, F. V., Salakhova, I. T., Mokeyeva, E. V.** Basic components of developing teachers' research competence as a condition to improve their competitiveness [Текст] // Review of European Studies. – 2015. – Vol. 7, No. 4. – P. 221–227. – <https://doi.org/10.5539/res.v7n4p221>

15 **Firat, M.** What ChatGPT means for universities: Perceptions of scholars and students [Текст] // Journal of Applied Learning and Teaching. – 2023. – Vol. 6, No. 1. – P. 1–7.

REFERENCES

1 **Tokayev, K.-Zh.** Kazakhstan halkyna Zholdauy [Address to the People of Kazakhstan]. – Astana, 2023. [in Kazakh].

2 **Taubayeva, Sh. T.** Pedagogika [Pedagogy]. – Almaty : Kazakh University, 2016. – 340 p. [in Kazakh].

3 **Abilkasymova, A. E.** Matematikany okytu adistemesi [Methods of Teaching Mathematics]. – Almaty : Kazakh University, 2013. – 336 p. [in Kazakh].

4 **Zhanpeisova, K.** Modul'dik okytu tekhnologiyasy [Modular Learning Technology]. – Almaty, 2002. – 176 p. [in Kazakh].

5 **Mishra, P., Koehler, M.** Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge // Teachers College Record. – 2006. – Vol. 108, No. 6. – P. 1017–1054.

6 **Shishkina, E. V.** Formirovanie issledovatel'skoi kompetentnosti budushchego uchitelya matematiki [Formation of research competence of a future mathematics teacher]: PhD diss. – Moscow, 2005. – 180 p. [in Russian].

7 **Bersenova, L. V.** Formirovanie issledovatel'skoi kompetentnosti studentov pedagogicheskogo vuza [Formation of research competence of pedagogical university students]: PhD diss. – Omsk, 2007. – 190 p. [in Russian].

8 **Belfiori, V.** Use of the TPACK framework by mathematics teacher training students // Acta Latinoamericana de Matemática Educativa. – 2014. – P. 1733–1740.

9 **Yerzhanova, G., Autayeva, A., Mazhinov, B., Iralina, M., Nishanbayeva, S.** Features of the development of research competence in future special education teachers // Frontiers in Education. – 2025. – Vol. 10. – Article 1610757. – <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1610757>

10 **Beisenbayeva, A. A.** Zhogary pedagogikalyk bilim beru teoriyasy [Theory of Higher Pedagogical Education]. – Almaty : Gylym, 2010. – 312 p. [in Kazakh].

11 **Belfiori, V.** Use of the TPACK framework by mathematics teacher training students // Acta Latinoamericana de Matemática Educativa. – México D.F.: Comité Latinoamericano de Matemática Educativa A.C., 2014. – P. 1733–1740. [Electronic resource] – URL: <http://funes.uniandes.edu.co/6059/1/BelfioriUsoDelMarcoALME2014.pdf> (Accessed: 22.11.2019).

12 **Kıraççılar, M.** Use of GeoGebra in mathematics education and pre-service teachers' experiences: challenges in technological integration // Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry. – 2015. – Vol. 6, No. 4. – P. 1–23.

13 **Arévalo-Duarte, A., Cañada-Cañada, F., González-García, F.** The development of technological pedagogical content knowledge in preservice mathematics teachers // Journal of New Approaches in Educational Research. – 2017. – Vol. 6, No. 2. – P. 105–112. – <https://doi.org/10.7821/naer.2017.7.237>.

14 **Ivanenko, N. A., Mustafina, G. M., Sagitova, V. R., Akhmetzyanov, I. G., Khazratova, F. V., Salakhova, I. T., Mokeyeva, E. V.** Basic Components of Developing Teachers' Research Competence as a Condition to Improve Their Competitiveness // Review of European Studies. – 2015. – Vol. 7, No. 4. – P. 221–227. – <https://doi.org/10.5539/res.v7n4p221>

15 **Firat, M.** What ChatGPT means for universities: Perceptions of scholars and students // Journal of Applied Learning and Teaching. – 2023. – Vol. 6, No. 1. – P. 1–7.

18.05.26 ж. баспаға түсті.

25.05.26 ж. түзетулерімен түсті.

06.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*М. Аккагаз¹, С. М. Сеитова²

^{1,2} Университет имени И. Жансугурова,

Республика Казахстан, г. Талдыкорган.

Поступило в редакцию 18.05.26.

Поступило с исправлениями 25.05.26.

Принято в печать 06.09.26.

КРИТЕРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ НАУЧНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ БУДУЩИХ УЧИТЕЛЕЙ

В настоящее время развитие научно-исследовательских навыков у будущих педагогов является одной из наиболее актуальных проблем современности. Целью данной статьи является систематизация исследовательских задач по развитию научно-исследовательской компетентности и выявление научно-исследовательских навыков будущих учителей математики. При формировании научно-исследовательской компетентности в области математики были выделены такие критерии, как когнитивный, рефлексивный, практический и мотивационный. При освоении технологических и предметных навыков использовались инструменты искусственного интеллекта, и наше исследование показывает, что 40,3 % будущих учителей математики используют инструменты ИИ для освоения технологических и предметных навыков; это, в свою очередь, положительно повлияло на наш опыт развития исследовательской компетентности студентов наряду с технологическими навыками. Цель предлагаемой работы – теоретически проанализировать формы развития исследовательской компетентности будущих педагогов. Опрос позволил определить уровень знаний будущих исследователей-педагогов в области научной работы, были предложены конкретные исследовательские задачи для развития их исследовательских навыков; результаты были обсуждены. При выполнении заданий использовались инструменты искусственного интеллекта, и способность студентов самостоятельно делать выводы на основе определений, предоставленных искусственным интеллектом, в дополнение к их предметным знаниям, продемонстрировала эффективность нашего исследования. Кроме того, был проведен обзор модели ТРАСК, а именно технологической и педагогической подготовки. По нашему мнению, исследовательская деятельность каждого педагога.

Ключевые слова: научно-исследовательская компетентность, компоненты научно-исследовательской деятельности, научно-исследовательские задачи, учителя математики, направление.

**M. Akkagaz¹, S. M. Seitova²*

*^{1,2}I. Zhansugurov University,
Republic of Kazakhstan, Taldykorgan.*

Received 18.05.26.

Received in revised form 25.05.26.

Accepted for publication 06.09.26.

CRITERIA FOR ASSESSING THE LEVEL OF RESEARCH COMPETENCE AMONG FUTURE TEACHERS

At present, the development of research skills among future teachers is one of the most pressing issues of our time. The aim of this article is to systematise research tasks related to the development of research competence and to identify the research skills of future mathematics teachers. In the formation of research competence in the field of mathematics, criteria such as cognitive, reflective, practical and motivational were identified. Artificial intelligence tools were utilised in the acquisition of technological and subject-specific skills, and our research indicates that 40.3 % of future mathematics teachers use AI tools to acquire technological and subject-specific skills; this, in turn, has positively influenced our experience of developing students' research competence alongside technological skills. The aim of this study is to theoretically analyse the forms of research competence development among future teachers. The survey enabled us to determine the level of knowledge of future teacher-researchers in the field of scientific work; specific research tasks were proposed to develop their research skills; the results were discussed. Artificial intelligence tools were used in carrying out the tasks, and the students' ability to draw conclusions independently based on the definitions provided by the AI.

Keywords: research competence, components of research activity, research tasks, mathematics teachers, field.

<https://doi.org/10.48081/BTOUPhMath3.2026/264-277>

О. М. Пономарева¹, М. Г. Минин², *А. Ф. Вахгельт³

^{1,2,3}Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
Российская Федерация, г. Томск.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2345-2379>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5848-9080>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1121-3356>

*e-mail: vahgelt@tpu.ru

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ ИНЖЕНЕРНОГО ВУЗА

В статье рассматривается проблема организации непрерывного профессионально-педагогического развития преподавателей инженерного вуза. Представлена многоуровневая система, которая реализуется в Томском политехническом университете на протяжении более 20 лет и постоянно развивается. Главной ее особенностью является то, что она учитывает дифференцированные потребности различных категорий научно-педагогических работников. Для начинающих преподавателей много лет реализовывалась программа «Педагогический минимум», обеспечивающая первичную адаптацию и базовую подготовку к учебной деятельности. Молодые ученые и преподаватели проходили углубленную подготовку по программе «Преподаватель высшей школы». Для активно работающих сотрудников был разработан комплекс краткосрочных курсов повышения квалификации и инновационная модульно-накопительная система. Логическим развитием данной системы в условиях модернизации высшего образования стала трехуровневая модульная структура повышения квалификации (Уровни А, В, С) нового поколения, ориентированная на формирование экспертных компетенций преподавателей в области передового инженерного образования. Ключевым элементом системы выступает «Паспорт преподавателя ТПУ» – кластерная компетентностная модель, интегрирующая психолого-педагогические, научно-исследовательские, организационно-

методические и ценностно-смысловые компетенции, которая служит основой для мониторинга и планирования индивидуальных траекторий профессионального роста преподавателей в условиях технологического лидерства и геополитических вызовов.

Ключевые слова: повышение квалификации преподавателей, компетентностный подход, модульное обучение, непрерывное образование, технический вуз, трехуровневая система.

Введение

Современная российская система высшего образования переживает этап масштабной трансформации, которая затрагивает не только содержательные аспекты обучения, но и саму парадигму организации образовательного процесса. Эти изменения изначально были связаны с переходом на компетентностную модель обучения, а в последние годы с кардинальной перестройкой всей системы высшего образования, переходом на новую образовательную модель, обусловленную стремительными технологическими изменениями, внешними вызовами для России и сложной геополитической обстановкой.

В этих условиях перед техническими университетами стоит задача подготовки инженеров нового типа – специалистов, способных не только решать узкопрофессиональные технические задачи, но и обладающих развитыми «soft skills» (гибкими навыками): критическим мышлением, коммуникативной компетентностью, способностью работать в междисциплинарных командах, адаптироваться к быстро меняющимся условиям профессиональной деятельности, принимать решения в условиях неопределенности и нести ответственность за результаты своей работы. Такой подход требует пересмотра не только содержания образовательных программ, но и методов, форм и технологий обучения, что, в свою очередь, предъявляет принципиально новые требования к профессиональной квалификации самого преподавателя.

Сегодня от преподавателя требуется не просто передавать знания в узконаправленной технической области, а выступать в роли тьютора, модератора, фасилитатора, проектировщика образовательной среды, способного организовать эффективное взаимодействие студентов с информацией, развивать у них навыки самообучения, критического мышления и готовность к непрерывному профессиональному развитию на протяжении всей жизни. Преподаватель должен быть мобильным, открытым к инновациям, владеть современными педагогическими технологиями и уметь интегрировать их в процесс обучения, формируя у студентов не только профессиональные компетенции, но и личностные качества,

необходимые для успешной работы в условиях современного рынка труда и геополитических реалий [10].

Однако процесс адаптации преподавателей к новым ролям происходит неравномерно и сталкивается с рядом объективных трудностей. Традиционная система повышения квалификации, как правило, является дискретной (один раз в пять лет) и не всегда учитывает стремительные изменения в образовательных технологиях и методологии. Кроме того, педагогическое сообщество технических вузов неоднородно: существуют начинающие преподаватели без базовой педагогической подготовки, опытные «предметники», чьи методические подходы могут требовать обновления, и молодые исследователи, совмещающие научную и преподавательскую деятельность. Каждая из этих групп нуждается в специфических форматах и содержании обучения, что делает проблему создания гибкой и многоуровневой системы повышения квалификации особенно актуальной [4; 5].

Целью данной работы является обобщение опыта построения и функционирования многоуровневой системы непрерывного профессионально-педагогического развития преподавателей в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (ТПУ) и представление её эволюции в виде трехуровневой модульной структуры, отвечающей актуальным вызовам инженерного образования. В работе анализируются ключевые элементы этой системы, её методологическая основа, а также практические результаты внедрения для различных категорий научно-педагогических работников инженерного вуза.

Методы и материалы

Многоуровневая система профессионального развития преподавателей. В ответ на вызовы времени в начале 2000х годов в ТПУ была разработана и внедрена многоуровневая система повышения квалификации преподавателей, основанная на принципах непрерывности, дифференциации и практико-ориентированности. Она стала первоначальной основой для последующего развития и формирования современных программ подготовки преподавателей, реализуемых в университете сегодня. В основу системы положена компетентностная модель преподавателя, зафиксированная в документе «Паспорт преподавателя ТПУ», документально оформленного в 2010 г. [3]. Данный документ представляет собой детализированный перечень профессионально-педагогических компетенций, необходимых для эффективной работы в условиях реализации образовательных программ нового поколения (ФГОС 3++). Паспорт был разработан с целью реализации компетентностного подхода к оценке и развитию педагогического профессионализма преподавателей вуза в ТПУ. Его требования предусматривали развитые

способности преподавателя к формированию личностно-ориентированной образовательной среды с приоритетом самостоятельной познавательной деятельности студентов, к организации проектной и исследовательской работы студентов, к проектированию образовательных программ и модулей (дисциплин), к определению целей и планированию результатов обучения, к применению объективных методов и средств для контроля и оценки достижения студентами результатов обучения и целей образовательных программ и др. [3].

Самооценка уровня педагогической деятельности в соответствии с её содержанием и результативностью проводилась по результатам предварительного анкетирования и являлась необходимым этапом движения в направлении повышения степени эффективности профессиональной деятельности. Экспертная оценка могла быть организована по запросу и осуществлялась согласно заданным критериям и индикаторам [13].

Результаты оценивания степени сформированности компетенций преподавателей являлись основанием для определения способов и направлений повышения педагогической квалификации, что, в свою очередь, актуализировало задачу оптимизации вузовской системы повышения квалификации педагогических кадров.

Структура первоначальной системы непрерывного развития преподавателей ТПУ включала в себя три основных уровня, соответствующих стажу и опыту педагогической деятельности сотрудника [1; 4; 5]. Данная трехуровневая система впоследствии стала базой для разработки и внедрения актуальных программ подготовки преподавателей, адаптированных под современные требования – Уровень А, Уровень В и Уровень С.

Первый уровень: подготовка начинающих преподавателей. Для всех преподавателей, впервые приступающих к педагогической деятельности в университете, обязательным было прохождение программы «Педагогический минимум». Основная цель программы – адаптировать молодого специалиста (часто имеющего только техническое образование) к новым условиям работы, познакомить с нормативно-правовой базой, основами педагогической психологии, методикой планирования и проведения учебных занятий. В рамках «Педагогического минимума» слушатели разрабатывали планы первых практических/лабораторных занятий, знакомились с системой организации самостоятельной работы студентов. Данный этап позволял снять первоначальные психологические и методические барьеры и закладывал основу для дальнейшего профессионального роста [5; 6; 7]. Впоследствии на базе этой ступени была разработана программа «Школа молодого преподавателя (Уровень А)», учитывающая современные требования к подготовке начинающих педагогов.

Второй уровень: комплексная подготовка молодых преподавателей и аспирантов. Более глубокое и системное обучение педагогическим компетенциям осуществлялось в рамках дополнительной образовательной программы «Преподаватель высшей школы» (ПВШ). Эта программа, реализовалась в ТПУ с 2001 года и была ориентирована на аспирантов, магистрантов и молодых преподавателей, планирующих связать свою карьеру с высшей школой. Учебный план ПВШ, помимо традиционных психолого-педагогических дисциплин, включал модули по методологии научных исследований, педагогическому проектированию и оценке качества образовательных программ. Важной особенностью программы являлась её ориентация на международные стандарты инженерной педагогики, заданные Международным обществом инженерной педагогики (IGIP) [2]. Что позволяло выпускникам программы быть конкурентоспособными не только на российском, но и на международном образовательном рынке. Данный уровень послужил основой для разработки программы «Школа преподавателя высшего инженерного образования (Уровень В)».

Третий уровень: повышение квалификации активно работающих преподавателей. Для опытных преподавателей, уже имеющих стаж работы, система предлагала два взаимодополняющих пути. Первый – традиционный – представлен набором краткосрочных курсов повышения квалификации (объемом до 72 часов) по приоритетным направлениям: современные образовательные технологии, информатизация образования, вопросы внедрения ФГОС [4]. Второй, инновационный на тот период, путь – это модульно-накопительная система повышения квалификации (МНС ПК), которая была запущенная в ТПУ с 2011 года.

МНС ПК представляла собой набор проблемно-ориентированных модулей (например, «Технологии интерактивного обучения», «Организация самостоятельной работы студентов», «Разработка фондов оценочных средств»). Ключевое отличие данной системы – её гибкость и личностно-ориентированный характер. Преподаватель на основе результатов самооценки или экспертной оценки своих компетенций самостоятельно конструировал индивидуальный образовательный маршрут, выбирая те модули, которые наиболее актуальны для решения его профессиональных задач. Программы модулей носили строго практико-ориентированный характер: слушатели выполняли задания «под заказ» своих кафедр и отделений, разрабатывая реальные дидактические материалы (УМКД, тесты, сценарии занятий). Освоение каждого модуля подтверждалось сертификатом, а при накоплении определенного количества часов (например, 72) выдавалось удостоверение о повышении квалификации. Этот подход позволял оперативно реагировать на образовательные потребности ТПУ и обеспечивал непрерывность

педагогического развития преподавателя [3]. На основе данного уровня впоследствии была разработана программа «Школа «Новое инженерное образование» (Уровень С)», ориентированная на формирование экспертных компетенций и развитие инновационной педагогической деятельности.

Эволюция системы: трехуровневая модульная структура повышения квалификации. Современные реалии и дальнейшее изменение системы высшего образования РФ, а также возрастающие требования к качеству инженерной подготовки потребовали логического развития описанной выше многоуровневой системы непрерывной подготовки преподавателей инженерных вузов. В ответ на вызовы Томский политехнический университет переработал паспорт компетенций преподавателя ТПУ. В обновлённом «Паспорте компетенций преподавателя ТПУ», утвержденном в 2024-2025 учебном году, произошёл переход от простого перечня из 12 компетенций к кластерной структуре, объединяющей психолого-педагогические, научно-исследовательские, организационно-методические и ценностно-смысловые компетенции [11]. В отличие от предыдущей редакции Паспорта, ориентированного преимущественно на соответствие требованиям ФГОС и локальным нормативным актам, новый паспорт вводит сквозные компетенции, связанные с цифровизацией и использованием искусственного интеллекта в образовательном процессе, междисциплинарностью, наставничеством и работой с трудностями в обучении, а также управлением временем и непрерывным саморазвитием. Кроме того, новый Паспорт смещает акцент с простой констатации наличия тех или иных навыков на уровневые индикаторы их сформированности (базовый, продвинутый, экспертный), что позволяет выявлять профессиональные «разрывы» и формировать целевые программы дополнительного профессионального образования. В целом обновлённый документ нацелен не на подготовку преподавателя-транслятора знаний, а на формирование педагога-исследователя, наставника и инноватора, способного обеспечить подготовку инженеров нового поколения в условиях технологического лидерства и геополитических вызовов, что напрямую коррелирует со стратегическими целями университета до 2036 года.

В ответ на новые вызовы и задачи Учебно-научный центр «Системный анализ и управление инженерным образованием» ТПУ с учетом накопленного опыта разработал и внедрил трехуровневую модульную структуру повышения квалификации преподавателей, которая отвечает всем требованиям к подготовке педагогических кадров для технических университетов. Данная структура включает три последовательных уровня, каждый из которых ориентирован на конкретную категорию слушателей и решает специфические задачи профессионального развития [12; 13].

Уровень А (адаптивный) – программа повышения квалификации «Школа молодого преподавателя» (72 ч.). Данный уровень предназначен для молодых специалистов, принятых на работу в вуз, имеющих полное высшее образование (специалитет, магистратура), планируемых для привлечения в будущем к преподавательской деятельности и/или имеющих стаж педагогической деятельности менее 5-ти лет. Основная цель программы – обеспечить первичную адаптацию начинающих преподавателей к образовательной среде университета, познакомить их с нормативной документацией, структурой и анализом рабочей программы дисциплины, а также сформировать базовые педагогические компетенции. Программа «Школа молодого преподавателя (А)» состоит из трех логически связанных модулей, каждый из которых содержит теоретическую часть, презентации и практические задания. По окончании обучения слушатели готовят и защищают выпускную работу, связанную с модернизацией собственной рабочей программы дисциплины либо отдельных её фрагментов. Особое внимание уделяется проектированию и освоению современных технологий обучения в высшей профессиональной школе. Практические задания ориентированы на реализацию процедуры самооценки слушателями особенностей педагогической деятельности и степени развитости профессионально-педагогических компетенций [6; 8; 9].

В рамках программы слушатели проводят самооценку по следующим критериям: ценностное отношение к педагогической деятельности; технолого-педагогическая готовность; творческая активность личности преподавателя; степень развития педагогического мышления; стремление к профессионально-педагогическому совершенствованию. Результаты педагогического эксперимента, проведенного в 2024-2025 году на выборке из 39 начинающих преподавателей, показали, что средние баллы по указанным критериям находятся на уровне ниже максимальных, что свидетельствует о необходимости дальнейшего системного развития данных компетенций. Анкетирование слушателей выявило высокую оценку программы (4-5 баллов из 5) и запрос на её обязательный характер для всех новых преподавателей университета. Анализ рабочих программ дисциплин, выполняемый слушателями, часто выявляет несоответствие фонда оценочных средств заявленным результатам обучения, устаревшее лабораторное оборудование и недостаточную ориентацию целей курса на характер задач профессиональной деятельности выпускника [12; 13].

Уровень В (поддерживающий) – Дополнительная образовательная программа «Школа преподавателя высшего инженерного образования» (72 ч.). Этот уровень ориентирован на преподавателей, уже имеющих опыт чтения лекций и ведения всех видов учебных занятий в вузе и планирующих дальнейшую работу на должностях профессорско-преподавательского

состава. Программа направлена на углубление и систематизацию педагогических знаний, освоение современных образовательных технологий, методов активного и интерактивного обучения, а также на совершенствование навыков проектирования образовательных программ и оценки их качества. Слушатели данного уровня осваивают инструменты экспертной оценки образовательной деятельности, учатся применять объективные методы контроля и оценки достижения студентами результатов обучения [12; 13].

Уровень С (развивающий, экспертный) – Дополнительная образовательная программа «Школа «Новое инженерное образование» (72 ч.). Данный уровень предназначен для преподавателей, выполняющих и/или предполагающих выполнять проекты, целью которых является разработка новых модулей, курсов, дисциплин, лабораторных циклов, программ практики, образовательных технологий, новых образовательных/сетевых программ, обеспечивающих развитие образования в соответствующей области и повышение конкурентоспособности вуза. Программа нацелена на формирование экспертных компетенций в области передового инженерного образования, развитие способности к инновационной педагогической деятельности, проектированию и внедрению новых образовательных моделей, соответствующих мировым трендам и потребностям экономики. Слушатели уровня С участвуют в разработке стратегических документов, создании новых образовательных продуктов и технологий, что позволяет им выступать в роли лидеров образовательных изменений в университете.

За первые два учебных года реализации обновленной уровневой системы непрерывной подготовки преподавателей, выполняющих подготовку инженеров в ТПУ программы на уровнях А, В и С успели пройти более 30 человек, среди них ассистенты, старшие преподаватели, доценты, профессора и научные сотрудники инженерных школ ТПУ (Школа инженерных технологий и робототехники, Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, Школа новых производственных технологий, Школа ядерных технологий, Школа природных ресурсов и т.д.), которые участвуют в образовательном процессе на уровне бакалавриата, специалитета и магистратуры и обеспечивают различные профессиональные и общепрофессиональные дисциплины по направлениям в области общей и ядерной физики, информационных и новых производственных технологий, робототехники, энергетики и др.

Таким образом, предложенная трехуровневая модульная структура является логическим продолжением и развитием ранее описанной системы, обеспечивая непрерывность профессионального роста преподавателя от начальной адаптации до экспертного уровня, что полностью соответствует актуальным требованиям к подготовке педагогических кадров для

технических вузов в условиях модернизации высшего образования и подготовки инженеров нового типа, обладающих как глубокими профессиональными знаниями, так и развитыми гибкими навыками.

Результаты и обсуждение

Обобщая опыт Томского политехнического университета, можно констатировать, что созданная многоуровневая система повышения квалификации, эволюционировавшая в трехуровневую модульную структуру, представляет собой эффективный инструмент управления кадровым потенциалом вуза, позволяющий отвечать на современные вызовы образования, связанные с трансформацией системы высшего образования и необходимостью подготовки инженеров нового типа. Основные результаты и выводы заключаются в следующем:

Дифференцированный и уровневый подход. Разделение системы на уровни для начинающих (Уровень А), опытных (Уровень В) и экспертных (Уровень С) преподавателей позволяет учитывать специфику их профессиональных дефицитов и стартовые условия, избегая «уравнилельного» подхода в обучении. Трехуровневая структура обеспечивает четкую траекторию профессионального роста от адаптации к экспертному уровню, что особенно важно в условиях стремительных изменений образовательной парадигмы.

Практическая ориентированность и непрерывность. Переход от разовых курсов к модульно-накопительной системе и трехуровневой структуре обеспечивает постоянный, а не эпизодический характер профессионального развития. Выполнение слушателями конкретных заданий для своих кафедр/отделений гарантирует применимость полученных знаний в реальной образовательной практике. Самооценка и экспертная оценка компетенций позволяют преподавателям выявлять дефициты и выстраивать индивидуальные образовательные маршруты, формируя в них способность к непрерывному самообразованию [3; 13].

Интеграция международных стандартов и ориентация на передовое инженерное образование. Включение в программы подготовки требований IGIP и ориентация на международные компетенции способствует повышению глобальной конкурентоспособности выпускников и преподавателей университета [2]. Уровень С программы «Новое инженерное образование» целенаправленно готовит лидеров образовательных инноваций, способных разрабатывать и внедрять новые модели обучения, учитывающие как технологические тренды, так и геополитические реалии.

Инструменты управления качеством. Разработка и внедрение «Паспорта преподавателя ТПУ» создало прозрачную и объективную основу для оценки, самооценки и планирования траекторий профессионального развития,

что является важным шагом в переходе к управлению на основе данных [3; 11]. Анализ рабочих программ дисциплин, проводимый слушателями, способствует постоянному совершенствованию учебно-методического обеспечения образовательного процесса и его соответствию современным требованиям.

Выводы

Таким образом, предложенная система, включающая трехуровневую модульную структуру, успешно решает задачу формирования и непрерывного развития профессионально-педагогических компетенций профессорско-преподавательского состава технического университета, что является необходимым условием подготовки конкурентоспособных инженерных кадров, способных работать в условиях постоянных изменений и инноваций, обладающих не только глубокими профессиональными знаниями, но и развитыми гибкими навыками, позволяющими им эффективно решать сложные междисциплинарные задачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Государственные требования к минимуму содержания и уровню подготовки для получения дополнительной квалификации «Преподаватель высшей школы» / Элементы большой науки. – Элементы, 2005. – 2011. [Электронный ресурс]. – URL: <http://elementy.ru/Library9/Treb.htm?context=28887,свободный> (Дата обращения: 14.06.26).
- 2 Приходько, В. М. Отчет: Официальный журнал IGIP– М. : МАДИ , 2006. – № 34. – 51 с.
- 3 Минин, М. Г., Беломестнова, Э. Н., Паканова, В. С. Компетентностно-ориентированная система развития педагогического профессионализма преподавателей инженерного вуза // Инженерное образование. – 2012. – № 11. – С. 48–53.
- 4 Чучалин, А. И., Минин, М. Г., Сафьянников, И. А. Актуальные вопросы подготовки преподавательских кадров технического университета // Высшее образование в России. – 2008. – № 5. – С. 37.
- 5 Костина, Н. И. Профессионально-педагогическая подготовка преподавателя высшей школы США : Дис.канд.пед.наук. – Белгород, 2000. –199 с.
- 6 Бондаревская, Е. В. Педагогика: личность в гуманистических теориях и системах воспитания: учебное пособие / Е.В. Бондаревская, С.В. Кульневич. – М. : Ростов н/Д. – 1999. – 560 с.
- 7 Исаев, И. Ф. Профессионально-педагогическая культура преподавателя: учеб. пособие для студентов вузов. – М. : Академия, 2023. –161 с.

8 **Кузьмина, Н. В.** Профессионализм личности преподавателя и мастера производственного обучения / Н. В. Кузьмина. – М., 1990. – 117 с.

9 **Митина, Л. М.** Психология труда и профессионального развития учителя / Л. М. Митина. – М., 2024.

10 **Исаева, Т. Е.** Компетенции студентов и преподавателей высшей школы: способы формирования и оценивания: Монография / Т.Е. Исаева. – Ростов. гос. ун-т путей сообщения. – Ростов н/Д, 2024. – 152 с.

11 Перечень компетенций «Паспорт преподавателя ТПУ» – Томск : ТПУ, 2025. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nio.tpu.ru/upload/constructor/90c/u9woq0ly6kql9adjnp65cz8pq8dlnocm.pdf> (Дата обращения: 25.07.2026).

12 **Медведев, В. Е., Татур, Ю. Г.** Подготовка преподавателя высшей школы: компетентностный подход // Высшее образование в России. – 2007. – № 11. – 46 с.

13 **Дульзон, А. А., Васильева, О. М.** Модель компетенций преподавателя вуза // Управление качеством образования. – 2009. – С. 29–37.

REFERENCES

1 Gosudarstvenny'e trebovaniya k minimumu sodержaniya i urovnyu podgotovki dlya polucheniya dopolnitel'noj kvalifikacii «Prepodavatel' vy'sshej shkoly» [State requirements for the minimum content and level of training for obtaining the additional qualification «Higher School Teacher»]. (2005–2011). Elements of Big Science. Retrieved June 14, 2026, from [Electronic resource] – <http://elementy.ru/Library9/Treb.htm?context=28887>

2 **Prihodko, V. M.** Otchet [Report]: Official Journal of IGIP, No. 34. Moscow: MADI, 2006. – № 34. – 51 p.

3 **Minin, M. G., Belomestnova, E. N., & Pakanova, V. S.** Kompetentnostno-orientirovannaya sistema razvitiya pedagogicheskogo professionalizma prepodavatelej inzhenerного вуза [Competency-oriented system for developing pedagogical professionalism of engineering university teachers] // Engineering Education. – 2012. – № 11. – P. 48–53.

4 **Chuchalin, A. I., Minin, M. G., & Safyanikov, I. A.** Aktual'ny'e voprosy' podgotovki prepodavatel'skix kadrov tekhnicheskogo universiteta [Topical issues of teacher training at a technical university] // Higher Education in Russia. – 2008. – № 5. – С. 37.

5 **Kostina, N. I.** Professional'no-pedagogicheskaya podgotovka prepodavatelya vy'sshej shkoly' SShA [Professional and pedagogical training of a higher school teacher in the USA] (PhD thesis). – Belgorod, 2000. – 199 p.

6 **Bondarevskaya, E. V., & Kulnevich, S. V.** Pedagogika: lichnost' v gumanisticheskix teoriyax i sistemax vospitaniya: uchebnoe posobie [Pedagogy: Personality in humanistic theories and educational systems]: textbook. Moscow : Rostov-on-Don. – 1999. – 560 p.

7 **Isaev, I. F.** Professional'no-pedagogicheskaya kul'tura prepodavatelya: ucheb. posobie dlya studentov vuzov [Professional and pedagogical culture of a teacher: textbook for university students] // Moscow : Akademiya, 2023. – 161 p.

8 **Kuzmina, N. V.** Professionalizm lichnosti prepodavatelya i mastera proizvodstvenного obucheniya [Professionalism of the teacher and master of industrial training]. Moscow, 1990. – 117 p.

9 **Mitina, L. M.** Psixologiya truda i professional'nogo razvitiya uchitelya [Psychology of labor and professional development of a teacher]. Moscow. – 2024.

10 **Isaeva, T. E.** Kompetencii studentov i prepodavatelej vy'sshej shkoly': sposoby' formirovaniya i ocenivaniya: Monografiya [Competencies of students and teachers of higher education: Methods of formation and assessment: Monograph]. Rostov State University of Railways. Rostov-on-Don, 2024. – 152 p.

11 Perechen' kompetencij «Pasport prepodavatelya TPU» [List of Competencies: «TPU Lecturer Profile»]. – Tomsk : TPU, 2025. [Electronic resource]. – Access mode: <https://nio.tpu.ru/upload/constructor/90c/u9woq0ly6kql9adjnp65cz8pq8dlnocm.pdf> (Date of access: 25.07.2026).

12 **Medvedev, V. E., & Tatur, Yu. G.** Podgotovka prepodavatelya vy'sshej shkoly': kompetentnostny'j podxod [Training of higher school teachers: A competency-based approach] // Higher Education in Russia. – 2007. – № 11. – 46 p.

13 **Dulzon, A. A., & Vasilyeva, O. M.** Model' kompetencij prepodavatelya vuza [Model of university teacher competencies] // Quality Management in Education. – 2009. – P. 29–37.

Поступило в редакцию 09.08.26.

Поступило с исправлениями 09.08.26.

Принято в печать 08.09.26.

*О. М. Пономарева¹, М. Г. Минин², *А. Ф. Вахгельт³*

^{1,2,3}Томбы политехникалык ұлттық университеті,

Ресей Федерациясы, Томбы қ.

09.08.26 ж. баспаға түсті.

09.08.26 ж. түзетулерімен түсті.

08.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ИНЖЕНЕРЛІК УНИВЕРСИТЕТТІҢ ОҚЫТУШЫЛАРЫН ҮЗДІКСІЗ КӘСІБИ ДАМУДЫҢ КӨПДЕҢГЕЙЛІ ҮЛГІСІ

Мақалада инженерлік университет оқытушыларының үздіксіз кәсіби-педагогикалық дамуын ұйымдастыру мәселесі қарастырылады. Томбы политехникалық университетінде 20 жылдан астам уақыт бойы іске асырылып, үнемі дамып келе жатқан көпдеңгейлі жүйесі ұсынылған. Оның басты ерекшелігі – ғылыми-педагогикалық қызметкерлердің әртүрлі санаттарының сараланған қажеттіліктерін ескерілуі. Жас оқытушылар үшін көптеген жылдар бойы оқу әрекетіне бастапқы бейімделуді және негізгі дайындықты қамтамасыз ететін «Педагогикалық минимум» бағдарламасы іске асырылады. Жас ғалымдар мен оқытушылар «Жоғары мектеп оқытушысы» бағдарламасы бойынша тереңдетілген дайындықтан өтті. Белсенді жұмыс істейтін қызметкерлер үшін қысқа мерзімді біліктілікті арттыру курстарының кешені және инновациялық модульдік-жинақтау жүйесі әзірленді. Жоғары білімді жаңғырту жағдайында осы жүйенің логикалық дамуы озық инженерлік білім беру саласында оқытушылардың сараптамалық құзыреттерін қалыптастыруға бағытталған жаңа буындағы біліктілікті арттырудың үш деңгейлі модульдік құрылымы (А, В, С деңгейлері) болды. Жүйенің негізгі элементі – психологиялық-педагогикалық, ғылыми-зерттеу, ұйымдастыру-әдістемелік және құндылық-мағыналық құзыреттерді біріктіретін кластерлік құзыреттілік үлгісі болып табылатын «ТПУ оқытушысының паспорты». Бұл үлгі технологиялық көшбасшылық және геосаяси сын-қатерлер жағдайында оқытушылардың кәсіби өсуінің жеке траекторияларын бақылау және жоспарлау үшін негіз болады.

Кілтті сөздер: оқытушылардың біліктілігін арттыру, құзыреттілік тәсіл, модульдік оқыту, үздіксіз білім беру, техникалық университет, үш деңгейлі жүйе.

O. M. Ponomareva¹, M. G. Minin², *A. F. Vakhguel³

^{1,2,3}National Research Tomsk Polytechnic University,

Russian Federation, Tomsk.

Received 09.08.26.

Received in revised form 09.08.26.

Accepted for publication 08.09.26.

MULTILEVEL MODEL OF CONTINUOUS PROFESSIONAL DEVELOPMENT FOR ENGINEERING UNIVERSITY TEACHERS

The paper addresses the issue of organizing continuous professional and pedagogical development for faculty at an engineering university. It presents a multilevel system that has been implemented at Tomsk Polytechnic University for over 20 years and is continuously evolving. Its main feature is that it accounts for the differentiated needs of various categories of academic staff. For novice teachers, the «Pedagogical Minimum» program has been implemented for many years, ensuring initial adaptation and basic preparation for educational activities. Young scientists and teachers underwent advanced training through the «Higher School Teacher» program. For experienced staff, a set of short-term professional development courses and an innovative module-accumulative system were developed. The logical evolution of this system in the context of higher education modernization has become a new generation three-level modular professional development structure (Levels A, B, C), focused on forming expert competencies of teachers in the field of advanced engineering education. A key element of the system is the «TPU Teacher's Passport» – a cluster-based competency model integrating psychological-pedagogical, research, organizational-methodological, and value-semantic competencies, which serves as a basis for monitoring and planning individual professional growth trajectories for teachers in the context of technological leadership and geopolitical challenges.

Keywords: teacher professional development, competency-based approach, modular training, continuing education, technical university, three-level system.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Абдул Қадыр Рахмун, PhD, профессор, Шукур бизнес әкімшілік университеті, Синдх, 73024, Пәкістан, e-mail: aqadir@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0000-0002-0506-2417>

Аканова Акерке Сапаровна, PhD, Астана IT университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: akerkegansaj1995@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7178-2121>

Алинов Ержан Клышбекұлы, оқытушы, «Computer Science» факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: alinov_yek@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0474-5711>

Аралбаева Гульнара Мырзахановна, PhD, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің қауымдастырылған профессоры, Астана қ., 01000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aralbayevagulnara@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6827-5567>

Акылбекова Айман Дүйсембаевна, PhD, техникалық физика кафедрасының доцент м.а., Физика-техникалық ғылымдар институты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 011000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aiman88_88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1211-8877>

Аубакирова Жания Азаматовна, студент 6B07112 – «Аспап жасау» БББ студенті, «Computer Science» факультеті, «Физика математика және аспап жасау» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhaniyaaubaki0702@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8314-8627>

Али Корух, Физика кафедрасы, Ғылым Факультеті, Сакария университеті, Сакария, Түркия, e-mail: coruh@sakarya.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7362-6173>

Алиголи Ниаеи, Физика кафедрасы, Ғылым Факультеті, Сакария университеті, Сакария, Түркия, e-mail: aliniaei@sakarya.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5580-4266>

Асхатов Арнур Нуржанович, кіші ғылыми қызметкер, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070000, e-mail: ashatovarnur@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6716-9929>

Бердімұратов Нұрбол Ерболұлы, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070002, e-mail: nberdimuratov@vku.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-6880-6439>

Байжұманов Садуакас Дулатович, аға оқытушы, «Computer Science» факультеті, Торайғыров университет, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: baizhumanov_sd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5609-3697>

Бейсенов Мейірбек Қанатұлы, оқытушы, «Computer Science» факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: meirbek.dev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0474-5711>

Бакбергенова Карлыгаш Ажибековна, арнайы пән оқытушысы, жоғары санатты, Астана қаласы әкімдігінің «Техникалық колледжі», Астана қ., 011000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kaga2023@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6702-8195>

Бижигитов Темірхан, физика-математика ғылымдарының кандидаты, профессор, Жаратылыстану ғылымдары факультеті, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080003, Қазақстан Республикасы, e-mail: bizhigitov_temirhan@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1098-6657>

Бауыржан Гүлнұр Бауыржанқызы, PhD, Оқытушы, Еуразия Ұлттық университеті, Астана қ., 10008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bauyrzhan.g.b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8410-6640>

Баяндинова Молдир Болеухановна, PhD, қауымд.профессор, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: shohmanovamb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6699-9097>

Вахгельт Анатолий, Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Ресей Федерациясы, Томск қ., e-mail: vahgelt@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1121-3356>

Даутбеков Мерхат Курметович, ЖШС «PlasmaScience» ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070018, e-mail: merkhatd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0203-6050>

Ержанов Қобыланды Канаевич, Кафедрасының меңгерушісі, PhD, Еуразия Ұлттық университеті, Астана қ., 10008, Қазақстан Республикасы, e-mail: yerzhanov_kk@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0732-2080>

Жумабеков Алмар Жумағалиевич, PhD, профессор, «Computer Science» факультеті, «Физика математика және аспап жасау» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: almar89-89@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2360-3747>

Жасұланұлы Нұрасыл, бакалавриат студенті, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070000, e-mail: nurasylzhasulanuly@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4691-247X>

Зейтова Шолпан Сериковна, физика магистрі, аға оқытушы, «Computer Science» факультеті, «Физика математика және аспап жасау» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zeitova_sholpan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1880-6737>

Корляков Илья Дмитриевич, студент, Инновациялық технологиялар факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ilia.korlyakov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2099-1661>

Кеңес Гүлсім Маратқызы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «6B01510 – Физика пәнінен мұғалімдер даярлау» мамандығының 4 курс студенті, Астана қ., 01000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulsimkenes@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8410-8006>

Кисабекова Асемгуль Агибаевна, PhD, «Математика және физика» білім беру бағдарламасының профессоры, Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kissabekovaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6300-6758>

Қаламбай Мұхағали Токтарбайұлы, PhD, қауымд.профессор, Хериот-Уатт Халықаралық факультеті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, 030000, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: M.Kalambay@hw.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0002-0570-7270>

Кеңесбеков Айдар Бақытбекұлы, PhD, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Қорғаныс және функционалдық жабындар» ғылыми орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5630-9467>

Каирбаева Лимара Санатовна, 6B05301 – «Техникалық физика» мамандығының бакалавры, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Қорғаныс және функционалдық жабындар» ғылыми орталығының кіші ғылыми қызметкері, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: limarakairbaeva52@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6091-1071>

Кочнева Асем Кумаровна, PhD, ғылыми қызметкер, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070000, e-mail: kochnevaasem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7876-9552>

Кусенова Асия Сабирғалиевна, қауымд.профессор, химия ғылымдарының кандидаты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100022, Қазақстан Республикасы, e-mail: asiyaeco@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0497-7014>

Оразымбетова Гулайм Хайруллаевна, информатика магистрі, аға оқытушы, Жаратылыстану ғылымдары факультеті, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080003, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulaiymoraz1981@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2055-7426>

Оспанова Назира Нұрғазықызы, «Ақпараттық технологиялар» кафедраның меңгерушісі, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140013, Қазақстан Республикасы, e-mail: ospanova.n@teachers.tou.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0100-1008>

Мурат Акқағаз, «Математика» мамандығы бойынша докторант, Физика және математика факультеті, І. Жансүгіров атындағы университеті, Талдықорған қ., 040009, Қазақстан Республикасы, e-mail: akkagaz18@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2344-3881>

Мұрал Айбол, «PlasmaScience» ЖШС кіші ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070018, e-mail: aibolm02@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1924-1459>

Минин Михаил, Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Ресей Федерациясы, Томск қ., <https://orcid.org/0009-0003-5848-9080>

Мухаммединова Турдыгул Сакеновна, магистрант, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, 030000, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: tmuhammedinova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-4472-1369>

Маханов Канат Метович, Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ ҚЕАҚ физика-техникалық ғылымдар институтының «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының меңгерушісі, физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Астана қ., 010002, Қазақстан Республикасы, e-mail: makanov@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1263-0734>

Наурызбаева Айша Жетібайқызы, Физика-математика ғылымдарының кандидаты, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, 030000, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 050040, Алматы қ., e-mail: Aisha.Nuryzbaeva@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6653-2948>

Нуур Наби Дахар, Суккур ХБА университеті, Синд, 73024, Пәкістан, e-mail: noornabi@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0009-0004-3499-1954>

Нуркасымова Сауле Нуркасымовна, п.ғ.д., Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің профессоры, Астана қ., 01000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurkassymova_sn@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9835-6862>

Набиева Қаракөз Еркенбекқызы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің 7M01510 – «Физика мұғалімдерін дайындау» мамандығының 1 курс магистранты, Астана қ., 01000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nabievak4@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-7278-2191>

Искакова Анаргүл Батырбаевна, PhD, қауымд.профессор, «Computer Science» факультеті, «Физика математика және аспап жасау» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: anar_is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-8949>

Исимова Бакыт Шайдулаевна, физика магистрі, аға оқытушы, «Computer Science» факультеті, «Физика математика және аспап жасау» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Diary_5@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2868-1231>

Пономарева Ольга, Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Ресей Федерациясы, Томск қ., <https://orcid.org/0000-0003-2345-2379>

Тулегенова Аида Тулегенқызы, Қатты дене және жаңа материалдар технологиясы кафедрасының доценті, Физика-техникалық факультет, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: tulegenova.aida@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5701-6674>

Таймагамбетова Нүргүл Абдразаққызы, 6B05301-Физика білім бағдарламасының 4-курс студенті, физика-математика факультеті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nltm4122@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8830-0054>

Сергеев Даулет Максатович, физика-математика ғылымдарының кандидаты, профессор, Жалпы инженерлік пәндер кафедрасы, Кеңес Одағының екі мәрте Батыры Т. Ж. Бигелдинов атындағы Өуе қорғаныс күштерінің Әскери институты, Ақтөбе қ., 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: serdau82@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7426-3039>

Сагар Чхабрия, Суккур ХБА университеті, Синд, 73024, Пәкістан, e-mail: sagarchhabriya.bsckskdf22@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0009-0002-5416-0045>

Савченко Наталья Каримовна, аға оқытушы, Инновациялық технологиялар факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sav_nata@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3750-1012>

Сейтова Сабырқұл Макашевна, педагогика ғылымдарының докторы, профессор, Физика және математика факультеті, І. Жансүгіров атындағы университеті, Талдықорған қ., 040009, Қазақстан Республикасы, e-mail: seitova.s.m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4352-6355>

Сарсехан Гүлназ Ғалымқызы, Жылуэнергетика кафедрасының оқытушысы, Көлік және энергетика факультеті Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 011000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sarsekhan_gg_3@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7473-5315>

Сүлюбаева Лайла Ғылыммеденовна, PhD, қауымд.профессор, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070018, e-mail: lzhureroва@vku.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>

Сергазина Альмира Мұхамедсабырқызы, докторант, Еуразия Ұлттық университеті, Астана қ., 10008, Қазақстан Республикасы, e-mail: almirasabyrova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9040-113X>

Симакин Михаил Васильевич, қауымд.профессор, оқытушы, Шоқан Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: simakin.mv49@gmail.com, simakin49@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7732-4300>

Серікбайқызы Айнұр, 8D05301 – «Техникалық физика» мамандығының докторанты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Қорғаныс және функционалдық жабындар» ғылыми орталығының кіші ғылыми қызметкері, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: ainura.serikbaikyzy@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7734-9512>

Серікбайқызы Айнұр, PhD докторанты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070000, e-mail: ainura.serikbaikyzy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4623-4681>

Сейтханова Айнұр Кусбековна, PhD, қауымд.профессор, Ө. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ainur1179@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8610-5492>

Салькеева Айжан Каришовна, қауымд.профессор, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды

техникалық университеті, Қарағанды қ., 100024, Қазақстан Республикасы, e-mail: salkeeva58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2277-7959>

Смагулов Жанайдар Кайдарович, доцент, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды қ., 100025, Қазақстан Республикасы, e-mail: smagul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3412-973X>

Хансика Дингана, Сукур ХБА университеті, Синд, 73024, Пәкістан, e-mail: hansseka.bsckskdkf22@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0009-0003-1503-2101>

Цыба Петр Юрьевич, PhD, қауымд.профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 100008, Қазақстан Республикасы, e-mail: tsyba_pyu@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4928-0392> [87017787567](https://orcid.org/0000-0003-4928-0392)

Үсіпов Нұржан Мұсайыпұлы, PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 050040, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: unurzhan55@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2512-3280>

Шакирова Юлия Каримовна, аға оқытушы, Инновациялық технологиялар факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: uliya_sch@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2583-1751> [Қаламбай](https://orcid.org/0000-0003-2583-1751)

Шукиргалиев Бекдаулет Темирболатович, PhD, В. Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, 050020, Алматы қ.; Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, 030000, Ақтөбе қ.; Қазақстан Республикасы, e-mail: Bekdaulet@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4601-7065>

Шакирзянов Рафаэль Иосифович, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ ҚЕАҚ физика-техникалық ғылымдар институтының «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының доценті, Астана қ., 010017, Қазақстан Республикасы, e-mail: shakirzyanov_ri@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9908-3034>

Шанина Замзагул Куатовна, Физика магистрі, аға оқытушы, физика-математика факультеті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zshanina@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6394-4821>

Эльхам Фаттахи, Табриз Университетінің Химия Және Мұнай Инженериясы кафедрасы, Табриз, Иран, e-mail: efattahi00@ms.tabrizu.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0003-3218-461X>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдул Қадыр Рахмун, PhD, профессор, Шукур университет бизнес администрирования, Синдх, 73024, Пакистан, e-mail: aqadir@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0000-0002-0506-2417>

Аканова Акерке Сапаровна, PhD, Астана IT университет, Республика Казахстан, г. Астана, 010000, e-mail: akerkegansaj1995@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7178-2121>

Алинов Ержан Клышбекович, преподаватель, Факультет «Computer Science», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: alinov_yek@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0474-5711>

Аралбаева Гульнара Мырзахановна, PhD, ассоц.профессор Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 01000, Республика Казахстан, e-mail: aralbayevagulnara@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6827-5567>

Аубакирова Жания Азаматовна, студент ОП 6В07112 – «Приборостроение», факультет «Computer Science», кафедра «Физика, математика и приборостроение», г. Торайғыров университет, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhaniyaaubaki0702@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8314-8627>

Акылбекова Айман Дуйсембаевна, PhD, и.о.доцента кафедры Технической физики, институт физико-технических наук, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 011000, Республика Казахстан, e-mail: aiman88_88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1211-8877>

Али Корух, Физический факультет, факультет естественных наук, университет Сакарья, Сакарья, Турция, e-mail: coruh@sakarya.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7362-6173>

Алиголи Ниази, Физический факультет, факультет естественных наук, университет Сакарья, Сакарья, Турция, e-mail: aliniaei@sakarya.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5580-4266>

Асхатов Арнур Нуржанович, младший научный сотрудник, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070000, e-mail: ashatovarnur@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6716-9929>

Бердімұратов Нұрбол Ерболұлы, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,

г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070002, e-mail: nberdimuratov@vku.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-6880-6439>

Байжуманов Садуакас Дулатович, ст. преподаватель, Факультет «Computer Science», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: baizhumanov_sd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5609-3697>

Бакбергенова Карлыгаш Ажибековна, Преподаватель специальных дисциплин, высшая категория «Технический колледж» акимата г. Астана, 011000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kaga2023@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6702-8195>

Бейсенов Меирбек Канатович, преподаватель, Факультет «Computer Science», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: meirbek.dev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0474-5711>

Бижигитов Темирхан, кандидат физико-математических наук, профессор, Факультет естественных наук, Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080003, Республика Казахстан, e-mail: bizhigitov_temirhan@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1098-6657>

Бауыржан Гүлнур Бауыржановна, PhD, преподаватель, Евразийский национальный университет, кафедра космической техники и технологий, г. Астана, 10008, Республика Казахстан, e-mail: bauyrzhan.g.b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8410-6640>

Баяндинова Молдир Болеухановна, PhD, ассоц.профессор, Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: shohmanovamb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6699-9097>

Вахгельт Анатолий, национальный исследовательский Томский политехнический университет, Российская Федерация, г. Томск, e-mail: vahgelt@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1121-3356>

Даутбеков Мерхат Курметович, научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070018, e-mail: merkhatd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0203-6050>

Жумабеков Алмар Жумагалиевич, PhD, профессор, факультет «Computer Science», кафедра «Физика, математика и приборостроение», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: almar89-89@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2360-3747>

Жасұланұлы Нұрасыл, студент бакалавриата, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, 070000, e-mail: nurasylzhasulanuly@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4691-247X>

Зейтова Шолпан Сериковна, магистр физики, старший преподаватель, факультет «Computer Science», кафедра «Физика, математика и приборостроение», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zeitova_sholpan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1880-6737>

Ержанов Кобыланды Канаевич, PhD, заведующий кафедрой, Евразийский национальный университет, г. Астана, 10008, Республика Казахстан, e-mail: yerzhanov_kk@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0732-2080>

Искакова Анаргүль Батырбаевна, PhD, ассоц.профессор, факультет «Computer Science», кафедра «Физика, математика и приборостроение», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: anar_is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-8949>

Исимова Бакыт Шайдулаевна, магистр физики, старший преподаватель, факультет «Computer Science», кафедра «Физика, математика и приборостроение», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: Diary_5@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2868-1231>

Корляков Илья Дмитриевич, студент, Факультет инновационных технологий, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: ilia.korlyakov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2099-1661>

Кенес Гүлсім Мараткызы, студентка 4 курса образовательной программы «6B01510 – Подготовка учителей физики» Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 01000, Республика Казахстан, e-mail: gulsimkenes@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8410-8006>

Кисабекова Асемгүль Агибаевна, PhD, профессор ОП Математика и физика, Павлодарский педагогический университет имени А. Маргулана, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: kissabekovaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6300-6758>

Каламбай Мухагали Токтарбайұлы, PhD, ассоц.профессор, Хериот-Уатт Международный факультет, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, 030000, г. Актобе, Республика Казахстан, e-mail: M.Kalambay@hw.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0002-0570-7270>

Кенесбеков Айдар Бакытбекұлы, PhD, ведущий научный сотрудник научного центра «Защитные и функциональные покрытия» в Восточно-Казахстанском техническом университете имени Д. Серикбаева, г. Усть-

Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5630-9467>

Каирбаева Лимара Санатовна, Бакалавр специальности 6B05301 – «Техническая физика», младший научный сотрудник научного центра «Защитные и функциональные покрытия» в Восточно-Казахстанском техническом университете имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: limarakairbaeva52@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6091-1071>

Кочнева Асем Кумаровна, PhD, научный сотрудник, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070000, e-mail: kochnevaasem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7876-9552>

Кусенова Асия Сабиргалиевна, кандидат химических наук, ассоц.профессор, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100022, Республика Казахстан, e-mail: asiyaeco@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0497-7014>

Оспанова Назира Нургазыевна, Заведующая кафедрой «Информационные технологии», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140013, Республика Казахстан, e-mail: ospanova.n@teachers.tou.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0100-1008>

Оразымбетова Гулайм Хайруллаевна, магистр информатики, старший преподаватель, Факультет естественных наук, Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080003, Республика Казахстан, e-mail: gulaiymoraz1981@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2055-7426>

Мурат Аккагаз, докторант по специальности «Математика», Факультет физики и математики, И. Жансугуров университет, Талдыкорган к., 040009, Республика Казахстан, e-mail: akkagaz18@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2344-3881>

Минин Михаил, национальный исследовательский Томский политехнический университет, Российская Федерация, г. Томск, <https://orcid.org/0009-0003-5848-9080>

Мурал Айбол, младший научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070018, e-mail: aiholm02@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1924-1459>

Мухаммединова Турдыгул Сакеновна, магистрант, Актыбинский региональный университет имени К. Жубанова, 030000, г. Актобе, Республика Казахстан, e-mail: tmuhammedinova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-4472-1369>

Маханов Канат Метович, кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника, электроника и телекоммуникации» Института физико-технических наук ЕНУ имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010002, Республика Казахстан, e-mail: makanov@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1263-0734>

Наурызбаева Айша Жетібаевна, кандидат физико-математических наук, Актыбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: Aisha.Nuryzbaeva@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6653-2948>

Нуыр Наби Дахар, Sukkur IBA University, Синд 73024, Пакистан, e-mail: noornabi@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0009-0004-3499-1954>

Нуркасымова Сауле Нуркасымовна, доктор педагогических наук, профессор Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 01000, Республика Казахстан, e-mail: nurkassymova_sn@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9835-6862>

Набиева Каракөз Еркенбековна, магистрант 1 курса образовательной программы 7M01510 – «Подготовка учителей физики» Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 01000, Республика Казахстан, e-mail: nabievak4@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-7278-2191>

Пономарева Ольга, национальный исследовательский Томский политехнический университет, Российская Федерация, г. Томск, <https://orcid.org/0000-0003-2345-2379>

Таймагамбетова Нүргүл Абдразакқызы, студент 4-го курса образовательной программы 6B05301 – Физика, физико-математический факультет, Актыбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: nltm4122@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8830-0054>

Түлегенова Аида Түлегенқызы, доцент кафедры физики твердого тела и технологии новых материалов, физико-технических факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: tulegenova.aida@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5701-6674>

Сергеев Даулет Максатович, кандидат физико-математических наук, профессор, кафедра общетехнических дисциплин, Военный институт Сил Воздушной обороны имени дважды Героя Советского Союза Т. Я. Бегельдинова, г. Актобе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: serdau82@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7426-3039>

Сагар Чхабрия, университет Суккур ИБА, Синд, 73024, Пакистан, e-mail: sagarchhabriya.bsckskdf22@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0009-0002-5416-0045>

Савченко Наталья Каримовна, ст.преподаватель, Факультет инновационных технологий, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: sav_nata@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3750-1012>

Сеитова Сабыркул Макашевна, доктор педагогических наук, профессор, Факультет физики и математики, И. Жансугуров университет, г. Талдыкорган, 040009, Республика Казахстан, e-mail: seitova.s.m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4352-6355>

Сарсехан Гульназ Галымовна, преподаватель кафедры Теплоэнергетики, Факультет транспорта и энергетики, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 011000, Республика Казахстан, e-mail: sarsekhan_gg_3@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7473-5315>

Сулубаева Лайла Гылыммеденовна, PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070018, e-mail: lzhureroва@vku.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>

Симакин Михаил Васильевич, ассоц.профессор, преподаватель, Кокшетауский университет имени Шокана Уалиханова, г. Кокшетау, 020000, Республика Казахстан, e-mail: simakin.mv49@gmail.com, simakin49@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7732-4300>

Сергазина Альмира Мухмедсабыровна, докторант, Евразийский национальный университет, г. Астана, 10008, Республика Казахстан, e-mail: almirasabyrovna@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9040-113X>

Сейтханова Айнур Кусбековна, PhD, ассоц.профессор, Павлодарский педагогический университет имени Ә. Марғұлан, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ainur1179@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8610-5492>

Серікбайқызы Айнұр, докторант специальности 8D05301 – «Техническая физика», младший научный сотрудник научного центра «Защитные и функциональные покрытия» в Восточно-Казахстанском техническом университете имени Д. Серикбаева, г. Усть Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: ainura.serikbaikyzy@gmail.com, <https://orcid.org/009-0005-7734-9512>

Серікбайқызы Айнұр, PhD, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070000, e-mail: ainura.serikbaikyzy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4623-4681>

Салькеева Айжан Каришовна, ассоц.профессор, кандидат физико-математических наук, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100024, Республика Казахстан, e-mail: salkeeva58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2277-7959>

Смагулов Жанайдар Кайдарович, кандидат физико-математических наук, доцент, Карагандинский университет имени академика Е. А. Букетова, г. Караганда, 100025, Республика Казахстан, e-mail: smagul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3412-973X>

Хансика Дхингана, университет Суккур ИБА, Синд, 73024, Пакистан, e-mail: hanseeka.bsckskdf22@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0009-0003-1503-2101>

Цыба Петр Юрьевич, PhD, ассоц.профессор кафедры, Евразийский национальный университет, г. Астана, 10008, Республика Казахстан, e-mail: tsyba_pyu@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4928-0392> 87017787567

Үсіпов Нұржан Мұсайыпұлы, PhD, Казахстан, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, 050040, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: A.unurzhan55@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2512-3280>

Шакирова Юлия Каримовна, ст.преподаватель, Факультет инновационных технологий, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: uliya_sch@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2583-1751>

Шукиргалиев Бекдаulet Темирболатович, PhD, Астрофизический институт имени В. Г. Фесенкова, 050020, г. Алматы, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, 030000, г. Актобе, Республика Казахстан, e-mail: Bekdaulet@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4601-7065>

Шакирзянов Рафаэль Иосифович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010017, Республика Казахстан, e-mail: shakirzyanov_ri@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9908-3034>

Шанина Замзагул Куатовна, Магистр физики, старший преподаватель, физико-математический факультет, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: zshanina@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6394-4821>

Эльхам Фаттахи, Department of Chemical & Petroleum Engineering, University of Tabriz, Тебриз, Иран, e-mail: coruh@sakarya.edu.tr, efattahi00@ms.tabrizu.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0003-3218-461X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abdul Qadir Rahimoon, PhD, Professor, Sukkur IBA University, Sindh 73024, Pakistan, e-mail: aqadir@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0000-0002-0506-2417>

Akanova Akerke Saparova, PhD, Астана IT University, Republic of Kazakhstan, Astana, 010000, e-mail: akerkegansaj1995@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7178-2121>

Alinov Yerzhan Klyshbekovich, Lecturer, Faculty of «Computer Science», Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: alinov_yek@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0474-5711>

Aralbayeva Gulnara Myrzakhanovna, PhD, Associate Professor of L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aralbayevagulnara@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6827-5567>

Akylbekova Aiman, PhD, Acting Associate Professor, Department of Technical Physics, Institute of Physical and Technical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 011000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aiman88_88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1211-8877>

Aubakirova Zhaniya, student of the EP 6B07112 – «Instrument Engineering», Faculty of Computer Science, Department of Physics, Mathematics and Instrument Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhaniyaaubaki0702@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8314-8627>

Ali Coruh, Department of Physics, Faculty of Science, University of Sakarya, Sakarya, Turkey, e-mail: coruh@sakarya.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7362-6173>

Aligholi Niaei, Department of Physics, Faculty of Science, University of Sakarya, Sakarya, Turkey, e-mail: aliniaei@sakarya.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5580-4266>

Askhatov Arnur Nurzhanovich, Junior Researcher, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070000, e-mail: ashatovarnur@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6716-9929>

Berdimuratov Nurbol Erboluli, leading researcher at the Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070002, e-mail: nberdimuratov@vku.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-6880-6439>

Bayzhumanov Saduakas Dulatovich, Senior lecturer, Faculty of «Computer Science», Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: baizhumanov_sd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5609-3697>

Beisenov Meirbek Kanatovich, Lecturer, Faculty of «Computer Science», Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: meirbek.dev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0474-5711>

Bakbergenova Karlygash Azhibekovna, Teacher of special disciplines, highest category «Technical College» of the Akimat of Astana, 011000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kaga2023@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6702-8195>

Bizhigitov Temirhan, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, professor, Faculty of Natural Sciences, Taraz University named after M. H. Dulati, Taraz, 080003, Republic of Kazakhstan, e-mail: bizhigitov_temirhan@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1098-6657>

Bauyrzhan Gulnur, PhD, Lecturer, Eurasian National University, Astana, 10008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bauyrzhan.g.b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8410-6640>

Bayandina Moldir Boleukhanovna, PhD, Associate Professor, S. Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: shohmanovamb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6699-9097>

Vakhguelt Anatoli, National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation, Tomsk, e-mail: vahgelt@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1121-3356>

Dautbekov Merkhata Kurmetovich, Researcher, PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070018, e-mail: merkhata@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0203-6050>

Zhumabekov Almar, PhD, Professor, Faculty of Computer Science, Department of Physics, Mathematics and Instrument Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: almar89-89@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2360-3747>

Zhasulanuly Nurassyl, bachelor's student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070000, e-mail: nurassylzhasulanuly@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4691-247X>

Elham Fattahi, Department of Chemical & Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, e-mail: efattahi00@ms.tabrizu.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0003-3218-461X>

Yerzhanov Kobylandy, PhD, Head of the Department, Eurasian National University, Astana, 10008, Republic of Kazakhstan, e-mail: yerzhanov_kk@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0732-2080>

Zeitova Sholpan Serikovna, Master of physics, Senior Lecturer, Faculty of Computer Science, Department of Physics, Mathematics and Instrument Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zeitova_sholpan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1880-6737>

Iskakova Anargul, PhD, Associate Professor, Faculty of Computer Science, Department of Physics, Mathematics and Instrument Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: anar_is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-8949>

Isimova Bakyt Shaidulaevna, Master of physics, Senior Lecturer, Faculty of Computer Science, Department of Physics, Mathematics and Instrument Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: Diary_5@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2868-1231>

Kissabekova Assemgul, PhD, Professor of the Mathematics and Physics Educational Program, A. Margulan Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kissabekovaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6300-6758>

Korlyakov Ilya Dmitrievich, student, Faculty of Innovative Technologies, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ilia.korlyakov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2099-1661>

Kenes Gulsim Maratkyzy, 4th-year student of the educational program «6B01510 – Physics Teacher Training» at L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gulsimkenes@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8410-8006>

Kalambay Mukhagali, PhD, Associate Professor, Heriot-Watt International Faculty, K. Zhubanov Aktobe Regional University, 030000, Aktobe, Republic of Kazakhstan, e-mail: M.Kalambay@hw.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0002-0570-7270>

Kengesbekov Aidar, PhD, Leading Researcher at the Scientific Center «Protective and Functional Coatings» at the D. Serikbayev East State Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: buitkenovd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5630-9467>

Kairbaeva Limara Sanatovna, Bachelor student of the specialty 6B05301 – «Technical Physics», Junior researcher at the Scientific Center «Protective and Functional Coatings» at the D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: limarakairbaeva52@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6091-1071>

Kochneva Asem Kumarovna, PhD student, researcher, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070000, e-mail: kochnevaasem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7876-9552>

Kussenova Assiya, Associate Professor, Candidate of Chemical Sciences, Saginov Karaganda technical university, Karaganda, 100022, Republic of Kazakhstan, e-mail: asiyaeco@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0497-7014>

Ospanova Nazira Nurgaziyevna, Head of the Department of «Information Technology», Toraighyrov University, Pavlodar, 140013, Republic of Kazakhstan, e-mail: ospanova.n@teachers.tou.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0100-1008>

Orazymbetova Gulaim, Master of Computer Science, Senior Lecturer, Faculty of Natural Sciences, Taraz University named after M. H. Dulati, Taraz, 080003, Republic of Kazakhstan, e-mail: gulaiymoraz1981@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2055-7426>

Murat Akkagaz, Doctoral student in «Mathematics», Faculty of Physics and Mathematics, after named Zhansugurov University, Taldykorgan, 040009, Republic of Kazakhstan, e-mail: akkagaz18@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2344-3881>

Minin Mikhail, National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation, Tomsk, <https://orcid.org/0009-0003-5848-9080> **Noor Nabi Dahar**, Sukkur IBA University, Sindh 73024, Pakistan, e-mail: noornabi@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0009-0004-3499-1954>

Mural Aibol, Junior researcher of PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070018, e-mail: aibolm02@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1924-1459>

Mukhammedinova Turdygul, MSc student, K. Zhubanov Aktobe Regional University, 030000, Aktobe, Republic of Kazakhstan, e-mail: tmuhammedinova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-4472-1369>

Makhanov Kanat, Department of Radio Engineering. Electronics and Telecommunications. L. N. Gumilyov Eurasian National University, candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Astana, 010002, Republic of Kazakhstan, e-mail: makhanov@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1263-0734>

Naurzbayeva Aisha, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, K. Zhubanov Aktobe Regional University, 030000, Aktobe, Republic of Kazakhstan, Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: Aisha.Nuryzbaeva@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6653-2948>

Nurkasymova Saule Nurkasymovna, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurkassymova_sn@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9835-6862>

Nabiyeva Karakoz Yerkenbekkyzy, 1st-year Master's student of the educational program 7M01510 – «Physics Teacher Training» at L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nabievak4@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-7278-2191>

Ponomareva Olga, National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation, Tomsk, <https://orcid.org/0000-0003-2345-2379>

Tulegenova Aida, Associate Professor, Department of Solid State Physics and New Materials Technology, Physical and Technical Faculty, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: tulegenova.aida@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5701-6674>

Tsyba Pyotr Yurevich, PhD in Physics, Associate Professor of the Department, Eurasian National University, Astana, 10008, Republic of Kazakhstan, e-mail: tsyba_pyu@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4928-0392>

Taimagambetova Nurgul Abdrazakqyzy, 4th year student of the 6B05301-Physics educational program, Faculty of Physics and Mathematics, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe 030000, Republic of Kazakhstan e-mail: nltm4122@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8830-0054>

Sarsekhan Gulnaz, Teacher, Department of Thermal Energy, Faculty of Transport and Energy, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 011000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sarsekhan_gg_3@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7473-5315>

Sagar Chhabriya, Sukkur IBA University, Sindh 73024, Pakistan, e-mail: sagarchhabriya.bsckdkf22@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0009-0002-5416-0045>

Savchenko Natalia Karimovna, Senior Lecturer, Faculty of Innovative Technologies, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sav_nata@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3750-1012>

Seitova Sabyrkul Makashevna, Doctor of pedagogic sciences, professor, Faculty of Physics and Mathematics, after named Zhansugurov University, Taldykorgan, 040009, Republic of Kazakhstan, e-mail: seitova.s.m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4352-6355>

Sulyubaeva Laila Gylymmeddenovna, PhD, Associate Professor, senior Researcher at the Research Center for «Surface Engineering and Tribology» of the East Kazakhstan University named after Sarsen Amanzholov, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070018, e-mail: lzhurerova@vku.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>

Simakin Mikhail Vasilievich, Associate Professor, Lecturer of the Department, Shokan Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: simakin.mv49@gmail.com, simakin49@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7732-4300>

Sergazina Almira Muhamedsabyrovna, Doctoral student, Eurasian National University, Astana, 10008, Republic of Kazakhstan, e-mail: almirasabyrovna@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9040-113X>

Serikbaikyzy Ainur, Doctoral student of the specialty 8D05301 – «Technical Physics», Junior researcher at the Scientific Center «Protective and Functional Coatings» at the D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: ainura.serikbaikyzy@gmail.com, <https://orcid.org/009-0005-7734-9512>

Seitkhanova Ainur, PhD, Associate Professor, Margulan University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ainur1179@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8610-5492>

Serikbaikyzy Ainur, PhD student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070000, e-mail: ainura.serikbaikyzy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4623-4681>

Salkeyeva Aizhan, Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Abylbas Saginov Karaganda technical university, Karaganda, 100024, Republic of Kazakhstan, e-mail: salkeyeva58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2277-7959>

Smagulov Zhanaidar, Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Karaganda University named after Academician E. A. Buketov, Karaganda, 100025, Republic of Kazakhstan, e-mail: smagul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3412-973X>

Segeyev Daulet, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of General Engineering Disciplines, T Begeldinov Aktobe Aviation Institute, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: serdau82@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7426-3039>

Hanseeka Dhingana, Sukkur IBA University, Sindh 73024, Pakistan, e-mail: hanseeka.bsckdkf22@iba-suk.edu.pk, <https://orcid.org/0009-0003-1503-2101>

Ussipov Nurzhan, PhD, Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: unurzhan55@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2512-3280>

Shukirgaliyev Bekdaulet, PhD, Fesenkov Astrophysical Institute, 050020, Almaty; K. Zhubanov Aktobe Regional University, 030000, Aktobe, Republic of Kazakhstan, e-mail: Bekdaulet@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4601-7065>

Shakirova Yulia Karimovna, Senior Lecturer, Faculty of Innovative Technologies, Abylbas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: uliya_sch@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2583-1751>

Shakirzyanov Rafael, Candidate of Physical and Mathematical, Sciences lecturer, Department of Radio Engineering. Electronics and Telecommunications, L. N. Gumilev Eurasian National University, Astana, 010017, Republic of Kazakhstan, e-mail: shakirzyanov_ri@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9908-3034>

Shanina Zamzagul, Master of Physics, Senior Lecturer, Faculty of Physics and Mathematics, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zshanina@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6394-4821>

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ
«ВЕСТНИК ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА»
СЕРИЯ: ФИЗИКА, МАТЕМАТИКА И
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ»**

Редакционная коллегия просит авторов руководствоваться следующими правилами при подготовке статей для опубликования в журнале.

Научные статьи, представляемые в редакцию журнала должны быть оформлены согласно базовым издательским стандартам по оформлению статей в соответствии с ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», пристатейных библиографических списков в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

* В номер допускается не более одной рукописи от одного автора либо того же автора в составе коллектива соавторов.

* Количество соавторов одной статьи не более 5.

* Степень оригинальности статьи должна составлять не менее 60 % (согласно решению редакционной коллегии).

* Направляемые статьи не должны быть ранее опубликованы, не допускается последующее опубликование в других журналах, в том числе переводы на другие языки.

* Решение о принятии рукописи к опубликованию принимается после проведения процедуры рецензирования.

* Двойное рецензирование (слепое) проводится конфиденциально, автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.

* Квитанция об оплате предоставляется после принятия статей к публикации. Стоимость публикации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге.

* докторантам НАО «Торайғыров университет» и иностранным авторам (без казахстанских соавторов) публикация в журнале бесплатно.

* Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензирование 1 раз. Ответственность за содержание статьи несет автор.

Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.

Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

Датой поступления статьи считается дата получения редакцией ее окончательного варианта.

Статьи публикуются по мере поступления. Журнал формируется исходя из количества не более 30 статей в одном номере.

Периодичность издания журналов – 4 раза в год (ежеквартально).

Сроки подачи статьи:

- первый квартал до 10 февраля;
- второй квартал до 10 мая;
- третий квартал до 10 августа;
- четвертый квартал до 10 ноября.

Научный журнал «Вестник Торайғыров университета», «Наука и техника Казахстана» выпускается с периодичностью 4 раза в год в сетевом (электронном) формате в следующие установленные сроки выхода номеров журнала:

- первый номер выпускается до 30 марта текущего года;
- второй номер – до 30 июня;
- третий номер – до 30 сентября;
- четвертый номер – до 30 декабря.

Статью (электронную версию и квитанции об оплате) следует направлять на сайтах:

- <https://vestnik.tou.edu.kz/>
- <https://vestnik-pm.tou.edu.kz/>

Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.

Автор, который внес наибольший интеллектуальный вклад в подготовку рукописи (при двух и более соавторах), является автором-корреспондентом и обозначается «*».

Авторы из разных учебных заведений указываются цифрами ^{1,2}.

Для осуществления процедуры двойного рецензирования (слепого), авторам необходимо отправлять два варианта статьи: первый – с указанием личных данных, второй – без указания личных данных. При нарушении принципа слепого рецензирования статья не рассматривается.

Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, в электронном варианте со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для Windows» (в форматах .doc, .docx, .rtf).

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы должен составлять **не менее 7 и не более 12 страниц печатного текста**. Поля страниц – 30 мм со всех сторон листа; Текст статьи: кегль – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка).

Структура научной статьи включает название, аннотация, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список использованных источников (литературы) к каждой статье, включая романизированный (транслитерированный латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.

Статья должна содержать:

1. **МРНТИ** (Межгосударственный рубрикатор научной технической информации);

2. **DOI** – после МРНТИ в верхнем правом углу (присваивается и заполняется редакцией журнала);

3. **Инициалы** (имя, отчество) **Фамилия** автора (-ов) – на казахском, русском и английском языках (жирным шрифтом, по центру);

Автор, который внес наибольший интеллектуальный вклад в подготовку рукописи (при двух и более соавторах), является автором-корреспондентом и обозначается «*».

Авторы из разных учебных заведений указываются цифрами ^{1,2}.

4. **Аффилиация** (организация (место работы (учебы)), страна, город) – на казахском, русском и английском языках. Полные данные об аффилиации авторов представляются в конце журнала;

5. **Название статьи** должно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В название статьи необходимо вложить информативность, привлекательность и уникальность (не более 12 слов, прописными буквами, жирным шрифтом, по центру, на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий);

6. **Аннотация** – краткая характеристика назначения, содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Должна отражать основные и ценные, по мнению автора, этапы, объекты, их признаки и выводы проведенного исследования. Дается на казахском, русском и английском либо немецком языках (рекомендуемый объем аннотации на языке публикации – не менее 150, не более 300 слов, курсив, нежирным шрифтом, кегль – 12 пунктов, абзацный отступ слева и справа 1 см, см. образец);

7. **Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования (оформляются на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий; кегль – 12 пунктов, курсив, отступ слева-справа – 1 см.). Рекомендованное количество ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке (см. образец);

8. **Основной текст статьи** излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- **Введение** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов). Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

- **Материалы и методы** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов). Должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

- **Результаты и обсуждение** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов). Приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами, анализами и выводами.

- **Информацию о финансировании** (при наличии) (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).

- **Выводы** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).

Выводы – обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

- **Список использованных источников** (жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре) включает в себя:

Статья и список использованных источников должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.5-98; ГОСТ 7.1-2003 (см. образец).

Очередность источников определяется следующим образом: сначала последовательные ссылки, т.е. источники на которые вы ссылаетесь по очередности в самой статье. Затем дополнительные источники, на которых нет ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые параллельно. *Объем не менее 10, не более чем 20 наименований* (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки), преимущественно за последние 10–15 лет.

В случае наличия в списке использованных источников работ на кириллице (на казахском и русском языках), необходимо представить список литературы в двух вариантах: 1) в оригинале (указываются источники на русском, казахском и английском либо немецком языках); 2) романизированный вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках), то есть транслитерация латинским алфавитом. см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) *Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Онлайн сервис Транслитерация по ГОСТу – <https://transliteration-online.ru/>

Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.

Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом: автор(-ы) (транслитерация либо англоязычный вариант при его наличии) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название при его наличии) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

• **Иллюстрации, перечень рисунков** и подрисовочные надписи к ним представляют по тексту статьи. В электронной версии рисунки и иллюстрации представляются в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi.

• **Математические формулы** должны быть набраны в Microsoft Equation Editor (каждая формула – один объект).

На отдельной странице (после статьи)

В электронном варианте приводятся **полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail** (номера телефонов для связи редакции с авторами, не публикуются);

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

ОБРАЗЕЦ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

МРНТИ 04.51.59

DOI xxxxxxxxxxxxxxx

С. К. Антикеева*, С. К. Ксембаева

Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СОЦИАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ ЧЕРЕЗ КУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

В данной статье представлена теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, которая разработана в рамках докторской диссертации «Формирование личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации». В статье приводятся педагогические аспекты самого процесса моделирования, перечислены этапы педагогического моделирования. Представлены методологический, процессуальный (технологический) и инструментальный уровни модели, ее цель, мониторинг сформированности искомых компетенций, а также результат. В модели показаны компетентностный, личностно-ориентированный и практико-ориентированный педагогические подходы, закономерности, принципы, условия формирования выбранных компетенций; описаны этапы реализации процесса формирования, уровни сформированности личностных и профессиональных компетенций. В разделе практической подготовки предлагается интерактивная работа в системе слушатель-преподаватель-группа, подразумевающая личное участие каждого специалиста, а также открытие первого в нашей стране Республиканского общественного объединения «Национальный альянс профессиональных социальных работников». Данная модель подразумевает под собой дальнейшее совершенствование и самостоятельное развитие личностных и профессиональных компетенций социальных работников. Это позволяет увидеть в модели эффективность реализации курсов повышения квалификации, формы, методы и средства работы.

Ключевые слова: теоретическая модель, компетенции, повышение квалификации, социальные работники.

Введение

Социальная работа – относительно новая для нашей страны профессия. Поэтому обучение социальных работников на современной стадии не характеризуется наличием достаточно разработанных образовательных стандартов, которые находили бы выражение в формулировке педагогических целей, в содержании, технологиях учебного процесса.

Продолжение текста публикуемого материала

Материалы и методы

Теоретический анализ научной психолого-педагогической и специальной литературы по проблеме исследования; анализ законодательных и нормативных документов по открытию общественных объединений; анализ содержания программ курсов повышения квалификации социальных работников; моделирование; анализ и обобщение педагогического опыта; опросные методы (беседа, анкетирование, интервьюирование); наблюдение; анализ продуктов деятельности специалистов; эксперимент, методы математической статистики по обработке экспериментальных данных.

Продолжение текста публикуемого материала

Результаты и обсуждение

Чтобы понять объективные закономерности, лежащие в основе процесса формирования и развития личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, необходимо четко представлять себе их модель.

Продолжение текста публикуемого материала

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации содержит три уровня ее реализации.

Продолжение текста публикуемого материала

Список использованных источников

- 1 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : сущность, эффективность и неопределенность [Текст] // Педагогика. – 2003. – № 4. – С. 22.
- 2 **Кузнецова, А. Г.** Развитие методологии системного подхода в отечественной педагогике : монография [Текст]. – Хабаровск : Изд-во ХКИППК ПК, 2001. – 152 с.
- 3 **Каропа, Г. Н.** Системный подход к экологическому образованию и воспитанию (На материале сельских школ) [Текст]. – Минск, 1994. – 212 с.
- 4 **Штофф, В. А.** Роль моделей в познании [Текст] – Л. : ЛГУ, 1963. – 128 с.

5 **Таубаева, Ш.** Методология и методика дидактического исследования : учебное пособие [Текст]. – Алматы : Казак университеті, 2015. – 246 с.

6 **Дахин, А. Н.** Моделирование компетентности участников открытого образования [Текст]. – М. : НИИ школьных технологий 2009. – 290 с.

7 **Дахин, А. Н.** Моделирование в педагогике [Текст] // Идеи и идеалы. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – С. 11–20.

8 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование: монография [Текст]. – Новосибирск : Изд-во НИПКиПРО, 2005. – 230 с.

9 **Аубакирова, С. Д.** Формирование деонтологической готовности будущих педагогов к работе в условиях инклюзивного образования : дисс. на соиск. степ. д-ра филос. (PhD) по 6D010300 – Педагогика и психология [Текст] – Павлодар, 2017. – 162 с.

10 **Арын, Е. М., Пфейфер, Н. Э., Бурдина, Е. И.** Теоретические аспекты профессиональной подготовки педагога XXI века : учеб. пособие [Текст]. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова; СПб. : ГАФКиСим. П. Ф. Лесгафта, 2005. – 270 с.

References

1 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie: suschnost, effektivnost i neopredelennost [Pedagogical modeling : essence, effectiveness, and uncertainty] [Text]. In Pedagogiy. – 2003. – № 4. – P. 22.

2 **Kuznetsova, A. G.** Razvitie metodologii sistemnogo podhoda v otechestvennoi pedagogike [Development of the system approach methodology in Russian pedagogy : monograph] [Text]. – Khabarovsk : Izd-vo KhK IPPK PK, 2001. – 152 p.

3 **Karopa, G. N.** Sistemnyi podhod k ekologicheskomu obrazovaniyu i vospitaniyu (Na materiale selskih shkol) [The systematic approach to environmental education and upbringing (Based on the material of rural schools)] [Text] – Minsk, 1994. – 212 p.

4 **Shtoff, V. A.** Rol modelei v poznanii [The role of models in cognition] [Text] – L. : LGU, 1963. – 128 p.

5 **Taubayeva, Sh.** Metodologiya i metodika didakticheskogo issledovaniya : uchebnoe posobie [Methodology and methods of educational research : a tutorial] [Text] – Almaty : Kazak University, 2015. – 246 p.

6 **Dahin, A. N.** Modelirovanie kompetentnosti uchastnikov otkrytogo obrazovaniya [Modeling the competence of open education participants] [Text] – Moscow : NII shkolnyh tehnologii, 2009. – 290 p.

7 **Dahin, A. N.** Modelirovanie v pedagogike [Modeling in pedagogy] [Text]. In Idei i idealy. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – P. 11–20.

8 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : monographia [Pedagogical modeling : monograph] [Text]. – Novosibirsk : Izd-vo NIPKiPRO, 2005. – 230 p.

9 **Aubakirova, S. D.** Formirovaniye deontologicheskoi gotovnosti buduschih pedagogov k rabote v usloviyah inklusivnogo obrazovaniya : dissertatsiya na soiskanie stepeni doctora filosofii (PhD) po specialnosti 6D010300 – Pedagogika i psihologiya. [Formation of deontological readiness of future teachers to work in inclusive education : dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD) in the specialty 6D010300- Pedagogy and psychology] [Text] – Pavlodar, 2017. – 162 p.

10 **Aryn, E. M., Pfeifer, N. E., Burdina, E. I.** Teoreticheskie aspekty professionalnoi podgotovki pedagoga XXI veka : ucheb. posobie [Theoretical aspects of professional training of a teacher of the XXI century : textbook] [Text] – Pavlodar : PGU im. S. Toraigyrov PSU; St.Petersburg. : GAFKiS im. P. F. Lesgafta, 2005. – 270 p.

С. К. Антикеева, С. К. Ксембаева*

Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

БІЛІКТІЛІКТІ АРТТЫРУ КУРСТАРЫ АРҚЫЛЫ ӘЛЕУМЕТТІК ҚЫЗМЕТКЕРЛЕРДІҢ ҚҰЗІРЕТТІЛІКТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл мақалада «Әлеуметтік қызметкерлердің біліктілігін арттыру курстары арқылы тұлғалық және кәсіби құзіреттіліктерін қалыптастыру» докторлық диссертация шеңберінде әзірленген біліктілікті арттыру курстары арқылы әлеуметтік қызметкерлердің тұлғалық және кәсіби құзіреттілігін қалыптастырудың теориялық моделі ұсынылған. Мақалада модельдеу процесінің педагогикалық аспектілері, педагогикалық модельдеудің кезеңдері келтірілген. Модельдің әдіснамалық, процессуалдық (технологиялық) және аспаптық деңгейлері, оның мақсаты, қажетті құзіреттердің қалыптасу мониторингі, сондай-ақ нәтижесі ұсынылған. Модельде құзіреттілікке, тұлғаға бағытталған және практикаға бағытталған педагогикалық тәсілдер, таңдалған құзіреттерді қалыптастыру заңдылықтары, қағидаттары, шарттары көрсетілген; қалыптасу процесін іске асыру кезеңдері, жеке және кәсіби құзіреттердің қалыптасу деңгейлері сипатталған. Практикалық дайындық бөлімінде тыңдаушы-оқытушы-топ жүйесінде интерактивті жұмыс ұсынылады, ол әр маманның жеке қатысуын, сондай-ақ елімізде алғашқы «кәсіби әлеуметтік қызметкерлердің ұлттық альянсы» республикалық қоғамдық бірлестігінің ашылуын білдіреді. Бұл модель

әлеуметтік қызметкерлердің жеке және кәсіби құзыреттерін одан әрі жетілдіруді және тәуелсіз дамытуды білдіреді. Бұл модельде біліктілікті арттыру курстарын іске асырудың тиімділігін, жұмыс нысандары, әдістері мен құралдарын көруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: теориялық модель, құзыреттілік, біліктілікті арттыру, әлеуметтік қызметкерлер.

S. K. Antikeyeva*, S. K. Ksembaeva
Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

THEORETICAL MODEL OF FORMATION COMPETENCIES OF SOCIAL WORKERS THROUGH PROFESSIONAL DEVELOPMENT COURSES

This article presents a theoretical model for the formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses, which was developed in the framework of the doctoral dissertation «Formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses». The article presents the pedagogical aspects of the modeling process itself, and lists the stages of pedagogical modeling. The methodological, procedural (technological) and instrumental levels of the model, its purpose, monitoring the formation of the required competencies, as well as the result are presented. The model shows competence-based, personality-oriented and practice-oriented pedagogical approaches, patterns, principles, conditions for the formation of selected competencies; describes the stages of the formation process, the levels of formation of personal and professional competencies. The practical training section offers interactive work in the listener-teacher-group system, which implies the personal participation of each specialist, as well as the opening of the first Republican public Association in our country, the national Alliance of professional social workers. This model implies further improvement and independent development of personal and professional competencies of social workers. This allows you to see in the model the effectiveness of the implementation of advanced training courses, forms, methods and means of work.

Keywords: theoretical model, competencies, professional development, social workers.

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Антикеева Самал Канатовна «Педагогика және психология» мамандығы бойынша докторант Торайғыров университеті, Гуманитарлық және әлеуметтік ғылымдар факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Антикеева Самал Канатовна докторант по специальности «Педагогика и психология», Торайғыров университет, Факультет гуманитарных и социальных наук, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Samal Kanatovna Antikeyeva doctoral student in «Pedagogy and psychology», Toraighyrov University, Faculty of Humanities and Social Sciences, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00

**ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА
В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ
«ВЕСТНИК ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА»
СЕРИЯ: ФИЗИКА, МАТЕМАТИКА И
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ»**

Редакционная коллегия научных журналов НАО «Торайғыров университет» «Вестник Торайғыров университета», «Наука и техника Казахстана» и научно-популярного журнала «Краеведение» в своей профессиональной деятельности придерживаются принципов и норм Публикационной этики научных журналов НАО «Торайғыров университет». Публикационная этика разработана в соответствии с международной публикационной этической нормой Комитета по публикационной этике (COPE), этическими принципами публикации журналов Scopus (Elsevier), Кодекса академической честности НАО «Торайғыров университет».

Публикационная этика определяет нормы, принципы и стандарты этического поведения редакторов, рецензентов и авторов, меры по выявлению конфликтов интересов, неэтичного поведения, инструкции по изъятию (ретракции), исправлению и опровержению статьи.

Все участники процесса публикации, соблюдают принципы, нормы и стандарты публикационной этики.

Качество научного журнала обеспечивается исполнением принципов участников процесса публикации: равенства всех авторов, принцип конфиденциальности, однократные публикации, авторства рукописи, принцип оригинальности, принцип подтверждения источников, принцип объективности и своевременности рецензирования.

Права и обязанности членов редакционных коллегий научных журналов НАО «Торайғыров университет» «Вестник Торайғыров университета», «Наука и техника Казахстана» и научно-популярного журнала «Краеведение» определены СО СМК 8.12.3-20 Управление научно-издательской деятельностью.

Права и обязанности рецензентов

Рецензенты научных журналов «Вестник Торайғыров университета», «Наука и техника Казахстана», научно-популярного журнала «Краеведение», обязаны руководствоваться принципом объективности.

Персональная критика в адрес автора(-ов) рукописи недопустима. Рецензент должен аргументировать свои замечания и обосновывать свое решение о принятии рукописи или о ее отклонении.

Национальность, религиозная принадлежность, политические или иные взгляды автора(-ов) не должны приниматься во внимание и учитываться в процессе рецензирования рукописи рецензентом(-ами).

Экспертная оценка, составленная рецензентом должна способствовать принятию решения редакцией о публикации и помогать автору улучшить рукопись.

Решение о принятии рукописи к публикации, возвращение работы автору на изменение или доработку, либо решение об отклонении от публикации принимается редколлегией опираясь на результаты рецензирования.

Принцип своевременности рецензирования. Рецензент обязан предоставить рецензию в срок, определенный редакцией, но не позднее 2-4 недель с момента получения рукописи на рецензирование. Если рассмотрение статьи и подготовка рецензии в назначенные сроки невозможны, то рецензент должен незамедлительно уведомить об этом научного редактора.

Рецензент, который считает, что его квалификация не соответствует либо недостаточна для принятия решения при рецензировании предоставленной рукописи должен незамедлительно сообщить об этом научному редактору и отказаться от рецензирования рукописи.

Принцип конфиденциальности со стороны рецензента. Рукопись, предоставленная рецензенту на рецензирование должна рассматриваться как конфиденциальный материал. Рецензент имеет право демонстрировать ее и/или обсуждать с другими лицами только после получения письменного разрешения со стороны научного редактора журнала и/или автора(-ов).

Информация и идеи научной работы, полученные в ходе рецензирования и обеспечения публикационного процесса, не должны быть использованы рецензентом(-ами) для получения личной выгоды.

Принцип подтверждения источников. Рецензент должен указать научные работы, которые оказали бы влияние на исследовательские результаты рассматриваемой рукописи, но не были приведены автором(-ами). Также рецензент обязан обратить внимание научного редактора на значительное сходство или совпадение между рассматриваемой рукописью и ранее опубликованной работой, о котором ему известно.

Если у рецензента имеются достаточные основания полагать, что в рукописи содержится плагиат, некорректные заимствования, ложные и сфабрикованные материалы или результаты исследования, то он не должен допустить рукопись к публикации и проинформировать научного редактора журнала о выявленных нарушениях принципов, стандартов и норм публикационной и научной этики.

Права и обязанности авторов

Публикационная этика базируется на соблюдении принципов:

Однократность публикации. Автор(-ы) гарантируют что представленная в редакцию рукопись статьи не была представлена для рассмотрения в другие издания. Представление рукописи одновременно в нескольких журналах/изданиях неприемлемо и является грубым нарушением принципов, стандартов и норм публикационной этики.

Авторство рукописи. Лицо, которое внесло наибольший интеллектуальный вклад в подготовку рукописи (при двух и более соавторах), является автором-корреспондентом и указывается первым в списке авторов.

Для каждой статьи должен быть назначен автор для корреспонденции, который отвечает за подготовку финальной версии статьи, коммуникацию с редколлекцией, должен обеспечить включение всех участников исследования (при количестве авторов более одного), внесших в него достаточный вклад, в список авторов, а также получить одобрение окончательной версии рукописи от всех авторов для представления в редакцию для публикации. Все авторы, указанные в рукописи/статье, несут ответственность за содержание работы.

Принцип оригинальности. Автор(-ы) гарантирует, что результаты исследования, изложенные в рукописи, представляют собой оригинальную самостоятельную работу, и не содержат некорректных заимствований и плагиата, которые могут быть выявлены в процессе.

Авторы несут ответственность за публикацию статей с признаками неэтичного поведения, плагиата, самоплагиата, самоцитирования, фальсификации, фабрикация, искажения данных, ложного авторства, дублирования, конфликта интересов и обмана.

Принцип подтверждения источников. Автор(ы) обязуется правильно указывать научные и иные источники, которые он(и) использовал(и) в ходе исследования. В случае использования каких-либо частей чужих работ и/или заимствования утверждений другого автора(-ов) в рукописи должны быть указаны библиографические ссылки с указанием автора(-ов) первоисточника. Информация, полученная из сомнительных источников не должна использоваться при оформлении рукописи.

В случае, если у рецензентов, научного редактора, члена(-ов) редколлекции журнала возникают сомнения подлинности и достоверности результатов исследования, автор(-ы) должны предоставить дополнительные материалы для подтверждения результатов или фактов, приводимых в рукописи.

Исправление ошибок в процессе публикации. В случае выявления ошибок и неточностей в работе на любой стадии публикационного процесса авторы обязуются в срочном порядке сообщить об этом научному редактору и оказать помощь в устранении или исправлении ошибки для публикации

на сайте журнала соответствующей коррекции (Erratum или Corrigendum) с комментариями. В случае обнаружения грубых ошибок, которые невозможно исправить, автор(-ы) должен(-ны) отозвать рукопись/статью.

Принцип соблюдения публикационной этики. Авторы обязаны соблюдать этические нормы, связанные с критикой или замечаниями в отношении исследований, а также в отношении взаимодействия с редакцией по поводу рецензирования и публикации. Несоблюдение этических принципов авторами расценивается как грубое нарушение этики публикаций и дает основание для снятия рукописи с рецензирования и/или публикации.

Конфликт интересов

Конфликт интересов, по определению Комитета по публикационной этике (COPE), это конфликтные ситуации, в которых авторы, рецензенты или члены редколлекции имеют неявные интересы, способные повлиять на их суждения касательно публикуемого материала. Конфликт интересов появляется, когда имеются финансовые, личные или профессиональные условия, которые могут повлиять на научное суждение рецензента и членов редколлекции, и, как результат, на решение редколлекции относительно публикации рукописи.

Главный редактор, член редколлекции и рецензенты должны оповестить о потенциальном конфликте интересов, который может как-то повлиять на решение редакционной коллегии. Члены редколлекции должны отказаться от рассмотрения рукописи, если они состоят в каких-либо конкурентных отношениях, связанных с результатами исследования автора(-ов) рукописи, либо если существует иной конфликт интересов.

При подаче рукописи на рассмотрение в журнал, автор(-ы) заявляет о том, что в содержании рукописи указаны все источники финансирования исследования; также указывают, какие имеются коммерческие, финансовые, личные или профессиональные факторы, которые могли бы создать конфликт интересов в отношении поданной на рассмотрение рукописи. Автор(ы), в письме при наличии конфликта интересов, могут указать ученых, которые, по их мнению, не смогут объективно оценить их рукопись.

Рецензент не должен рассматривать рукописи, которые могут послужить причинами конфликта интересов, проистекающего из конкуренции, сотрудничества или других отношений с кем-либо из авторов, имеющих отношение к рукописи.

В случае наличия конфликта интересов с содержанием рукописи, ответственный секретарь должен известить об этом главного редактора, после чего рукопись передается другому рецензенту.

Существование конфликта интересов между участниками в процессе рассмотрения и рецензирования не значит, что рукопись будет отклонена.

Всем заинтересованным лицам необходимо, по мере возможности избегать возникновения конфликта интересов в любых вариациях на всех этапах публикации. В случае возникновения какого-либо конфликта интересов тот, кто обнаружил этот конфликт, должен незамедлительно оповестить об этом редакцию. То же самое касается любых других нарушений принципов, стандартов и норм публикационной и научной этики.

Неэтичное поведение

Неэтичным поведением считаются действия авторов, редакторов или издателя, в случае самостоятельного предоставления рецензии на собственные статьи, в случае договорного и ложного рецензирования, в условиях обращения к агентским услугам для публикации результатов научного исследования, лжеавторства, фальсификации и фабрикация результатов исследования, публикация недостоверных псевдо-научных текстов, передачи рукописи статей в другие издания без разрешения авторов, передачи материалов авторов третьим лицам, условия когда нарушены авторские права и принципы конфиденциальности редакционных процессов, в случае манипуляции с цитированием, плагиатом.

Теруге 15.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

7,50 Mb RAM

Шартты баспа табағы 10,01. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4604

Сдано в набор 15.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.

Электронное издание

7,50 Mb RAM

Усл.печ.л. 10,01. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4604

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университеті» КЕ АҚ

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университеті» КЕ АҚ

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

+7(718)267-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik.tou.edu.kz

https://vestnik-pm.tou.edu.kz/