



D. Serikbayev
**EAST
KAZAKHSTAN
TECHNICAL
UNIVERSITY**



**EKTU
ISTC**
XII Халықаралық ғылыми-
техникалық конференция
XII International scientific and
technical conference



Жасанды интеллект және инновациялар: жаңа сынақтар мен болашақтың инженерлік шешімдері

*Цифрландыру және жасанды интеллект жылына арналған студенттер,
магистранттар, докторанттар және жас ғалымдардың XII Халықаралық
ғылыми-техникалық конференциясының*
МАТЕРИАЛДАРЫ



Искусственный интеллект и инновации: новые вызовы и инженерные решения будущего

Artificial Intelligence and Innovation: New Challenges and Engineering Solutions for the Future

МАТЕРИАЛЫ

*XII Международной научно-технической
конференции студентов, магистрантов,
докторантов и молодых ученых,
посвященной Году цифровизации и
искусственного интеллекта*

PROCEEDINGS

*of the XII International Scientific and Technical
Conference of Students, Master's Students,
Doctoral Candidates, and Young Scientists,
dedicated to the Year of Digitalization and
Artificial Intelligence*

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
«Д. СЕРІКБАЕВ АТЫНДАҒЫ ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН
ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ» КЕАҚ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
НАО «ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Д. СЕРИКБАЕВА»

**«ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ЖӘНЕ ИННОВАЦИЯЛАР:
ЖАҢА СЫНАҚТАР МЕН БОЛАШАҚТЫҢ ИНЖЕНЕРЛІК ШЕШІМДЕРІ»**

Цифрландыру және жасанды интеллект жылына арналған
студенттер, магистранттар, докторанттар және жас ғалымдардың
XII Халықаралық ғылыми-техникалық конференциясының
МАТЕРИАЛДАРЫ
9, 10 сәуір 2026 жыл

I бөлім

**«ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ИННОВАЦИИ:
НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ БУДУЩЕГО»**

МАТЕРИАЛЫ
XII Международной научно-технической конференции студентов,
магистрантов, докторантов и молодых ученых, посвященной
Году цифровизации и искусственного интеллекта
9, 10 апреля 2026 г.

Часть I

**«ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND INNOVATION:
NEW CHALLENGES AND ENGINEERING SOLUTIONS
FOR THE FUTURE»**

PROCEEDINGS
of the XII International Scientific and Technical Conference of Students,
Master's Students, Doctoral Candidates, and Young Scientists, dedicated to the
Year of Digitalization and Artificial Intelligence
April 9-10, 2026

Part I

УДК 004.8
ББК 32.813
Ж 33

Главный редактор: к.т.н. С.Ж. Рахметуллина
Зам. главного редактора: к.э.н. Ж.Т. Конурбаева

Редакционная коллегия: Байгереев С.Р. PhD, Мухамедова А.И. ст.преп., Ескермесов Д.К. PhD, Ерболатова Г.У. PhD, Тураров А.К. PhD, Әскербекова Ж.Ә. PhD, Оналбаева Ж.С. PhD, Әділқанова М.Ә. PhD, Төреханова М.Т. ст.преп., Капкенова М.Т.

Жасанды интеллект және инновациялар: жаңа сынақтар мен болашақтың
Ж 33 **инженерлік шешімдері:** Цифрландыру және жасанды интеллект жылына арналған студенттер, магистранттар, докторанттар және жас ғалымдардың **ХІІ Халықаралық ғылыми-техникалық** конференциясының материалдары, 9, 10 сәуір 2026 ж. = **Искусственный интеллект и инновации: новые вызовы и инженерные решения будущего:** Материалы ХІІ Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых, посвященной году цифровизации и искусственного интеллекта, 9, 10 апреля 2026 г. – Өскемен: ШҚТУ, 2026. – І б. – 484 б. – қазақша, орысша, ағылшынша.
ISBN 978-601-208-918-9 (І б.)
ISBN 978-601-208-917-2

В сборник включены научные статьи, посвящённые актуальным вопросам применения искусственного интеллекта в различных отраслях: транспорте и транспортной технике, технической физике и материаловедении, математике и вычислительной технике, металлургии и обогащении полезных ископаемых, а также механике и металлообработке в машиностроении. В представленных работах рассматриваются современные методы и подходы к использованию технологий искусственного интеллекта, направленные на повышение эффективности, точности и инновационного потенциала научных и производственных процессов.

Сборник рассчитан на студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых вузов.

УДК 004.8
ББК 32.813

Научное издание

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ИННОВАЦИИ: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ БУДУЩЕГО

Материалы ХІІ Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых, посвященной году цифровизации и искусственного интеллекта (ВКТУ, 9, 10 апреля 2026 г.)

Часть I

Сборник издан методом прямого копирования авторских статей

Ответственный за выпуск *О.Н. Николаенко*

Редактор *С.С. Мамыраздыкова*

Подписано в печать 20.04.2026. Формат 60х84/16. Печать ризографическая. Бумага офсетная.
Усл.печ.л. 28,13. Уч.-изд.л. 28,17. Тираж 20. Заказ № 150-2026. Цена договорная.

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева
070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69.

ISBN 978-601-208-918-9 (І б.)
ISBN 978-601-208-917-2

© ВКТУ им. Д. Серикбаева, 2026

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ИНЖЕНЕРИИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ СЛОЖНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПРЕДЕЛЁННОГО ИНТЕГРАЛА И МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

УДК 519.8 (075.8)

П.Ю. Абакумова^{1*}, Р.О. Мухамедова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Абакумова Полина Юрьевна,
e-mail: abakumova.2007@internet.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается методика определения центра тяжести сложных строительных конструкций на основе применения определённого интеграла. Показана роль интегральных методов в расчётах составных и криволинейных элементов сооружений. Дополнительно анализируется применение технологий искусственного интеллекта при автоматизации вычислений, оптимизации геометрических параметров и повышении точности инженерных расчётов. На примере комбинированной конструкции «прямоугольное основание - параболическая надстройка» продемонстрирован алгоритм определения координат центра тяжести и возможности его автоматизации с использованием интеллектуальных систем.

Ключевые слова: определённый интеграл, центр тяжести, строительная механика, искусственный интеллект, BIM-моделирование, устойчивость сооружений.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях развития современной архитектуры и строительства всё чаще применяются конструкции сложной геометрической формы. Арочные перекрытия, сводчатые элементы, комбинированные железобетонные системы требуют точных расчётов статических характеристик. Одним из ключевых параметров, определяющих устойчивость и безопасность сооружения, является положение центра тяжести.

Для простых геометрических тел координаты центра тяжести определяются по известным формулам. Однако при проектировании криволинейных или составных конструкций возникает необходимость использования методов математического анализа. Определённый интеграл позволяет вычислять площади, статические моменты и координаты центра тяжести фигур произвольной формы.

Классические аналитические методы основаны на применении определённого интеграла. Однако в условиях цифровизации строительной отрасли активно внедряются технологии искусственного интеллекта (ИИ), позволяющие автоматизировать вычисления и проводить оптимизацию конструктивных решений.

Цель исследования - показать взаимосвязь интегральных методов и интеллектуальных алгоритмов при определении центра тяжести сложных строительных конструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологическую основу исследования составляет аппарат математического анализа, в частности определённый интеграл и теория статических моментов площади.

Для плоской однородной фигуры, ограниченной функцией

$$y = f(x), a \leq x \leq b$$

площадь определяется выражением:

$$S = \int_a^b f(x) dx$$

Координаты центра тяжести вычисляются по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{S} \int_a^b x f(x) dx$$

$$\bar{y} = \frac{1}{2S} \int_a^b (f(x))^2 dx$$

Для составных конструкций используется принцип аддитивности:

$$\bar{y} = \frac{\sum S_i y_i}{\sum S_i}, \quad \bar{x} = \frac{\sum S_i x_i}{\sum S_i}$$

В качестве расчетной модели рассмотрена составная конструкция, состоящая из:

1. Прямоугольного основания шириной 4 м и высотой 1 м;
2. Параболической надстройки, заданной функцией

$$y = 3 - \frac{x^2}{4}, \quad x \in (-2; 2)$$

Надстройка расположена на высоте 1 м от основания. Материал конструкции однородный.

Определение площадей элементов

Площадь прямоугольника:

$$S_1 = 4$$

Площадь параболической части:

$$S_2 = \int_{-2}^2 \left(3 - \frac{x^2}{4} \right) dx = \frac{32}{3} \approx 9,33$$

Общая площадь конструкции:

$$S = S_1 + S_2 \approx 13,33$$

Определение координат центров тяжести

Для прямоугольника:

$$x_1 = 0, \quad y_1 = 0,5$$

Для параболической части: $x_2 = 0$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{2S_2} \int_{-2}^2 \left(3 - \frac{x^2}{4}\right)^2 dx \approx 1,35$$

С учётом расположения надстройки:

$$y_2 = 1 + 1,35 = 2,35$$

Общий центр тяжести:

$$\bar{y} = \frac{S_1 y_1 + S_2 y_2}{S_1 + S_2} = 1,85$$

Итоговые координаты:

$$(\bar{x}, \bar{y}) = (0; 1,85)$$

Полученные результаты показывают, что добавление массивной надстройки существенно повышает положение центра тяжести конструкции. Увеличение высоты центра тяжести приводит к росту опрокидывающего момента и требует усиления фундамента и опорных элементов.

Интегральный метод позволяет учитывать произвольную геометрию элементов и обеспечивает математическую строгость расчётов. В современных CAD- и BIM-системах данные вычисления выполняются численно, однако их теоретической основой остаётся аппарат определённого интеграла.

Таким образом, интегральный подход является универсальным инструментом анализа устойчивости сложных строительных систем.

Применение искусственного интеллекта в расчётах

Современные BIM-системы и инженерные платформы используют алгоритмы машинного обучения для:

- ✓ распознавания геометрических форм;
- ✓ автоматического разбиения сложной конструкции на конечные элементы;
- ✓ численного интегрирования;
- ✓ оценки положения центра тяжести в реальном времени.

ИИ позволяет работать не только с аналитически заданными функциями, но и с трёхмерными цифровыми моделями произвольной формы.

Оптимизация геометрии

Методы искусственного интеллекта применяются для: минимизации массы конструкции при сохранении устойчивости, поиска оптимального положения центра тяжести, снижения материалоемкости, адаптации конструкции к ветровым и сейсмическим нагрузкам. Алгоритмы могут варьировать параметры функции (например, коэффициенты параболы) и автоматически вычислять изменение координат центра тяжести через встроенные процедуры интегрирования.

Прогностический анализ устойчивости

Нейросетевые модели позволяют прогнозировать:

- ✓ риск опрокидывания,
- ✓ изменение центра тяжести при реконструкции,
- ✓ влияние неравномерной плотности материалов.

Таким образом, ИИ расширяет возможности классического интегрального подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определённый интеграл представляет собой эффективный математический инструмент для определения центра тяжести сложных строительных конструкций.

На основе рассмотренного примера установлено, что:

- ✓ интегральный метод обеспечивает точное вычисление площадей и статических моментов;
- ✓ составные конструкции требуют применения принципа аддитивности;
- ✓ изменение геометрических параметров существенно влияет на устойчивость сооружения.

Применение интегральных методов способствует повышению надёжности инженерных расчётов и безопасности строительных объектов. В то время как интеграция методов искусственного интеллекта позволяет:

- ✓ автоматизировать вычисления;
- ✓ оптимизировать конструктивные решения;
- ✓ повысить безопасность и экономическую эффективность проектов.

Таким образом, синтез математического анализа и интеллектуальных технологий представляет собой перспективное направление развития строительной инженерии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Фихтенгольц, Г. М. Основы математического анализа. Часть 1 : учебник для вузов / Г. М. Фихтенгольц. — 18-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2026. - 448 с.
- Молотников, В. Я. Теория упругости и пластичности : учебное пособие для вузов / В. Я. Молотников, А. А. Молотникова. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2026. — 532 с.
- Степин, П. А. Сопротивление материалов : учебное пособие для СПО / П. А. Степин. - 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2026. — 320 с.
- Шапошников, Н. Н. Строительная механика : учебник для вузов / Н. Н. Шапошников, Р. Е. Кристалинский, А. В. Дарков ; под редакцией Н. Н. Шапошников. — 18-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2026. — 692 с.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ В СФЕРЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

УДК 629.113:620.17

Г.С. Абдильдинова^{1*}, А.С. Муздыбаева¹

¹НАО «ВКТУ им. Д. Серикбаева», Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Абдильдинова Гульдана Сиязбековна, e-mail:

dg_kunim@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются технологии эффективной зарядки электромобилей на основе сопоставительного анализа существующих методов. На основе актуальных данных о развитии инфраструктуры зарядных станций в Казахстане проведён анализ, включающий обзор мировых методов быстрой и интеллектуальной зарядки, сравнение их преимуществ и ограничений, а также оценку применимости данных подходов в условиях Казахстана. Показано, что наиболее перспективным направлением является переход от универсальных режимов зарядки к адаптивным алгоритмам, учитывающим параметры SOC, SOH, температуру и внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи. Предлагается схема адаптивной зарядки, ориентированная на повышение безопасности, снижение деградации аккумуляторов и более рациональное использование существующей зарядной инфраструктуры.

Ключевые слова: методы, электромобиль, аккумуляторная батарея, быстрая зарядка, адаптивная зарядка, интеллектуальная зарядка, зарядные станции.

ВВЕДЕНИЕ

Расширение рынка электромобилей сопровождается быстрым ростом спроса на эффективные и безопасные технологии зарядки. Для пользователей электромобилей приоритетным является сокращение времени зарядки, тогда как для производителей и операторов инфраструктуры критически важны ресурс аккумулятора, безопасность и стабильность работы батареи в разных температурных режимах.

Основное противоречие современного этапа развития электромобильного транспорта заключается в необходимости совмещать высокую скорость зарядки с минимизацией деградации аккумуляторных батарей. Стандартные алгоритмы зарядки, как правило, ориентированы на достижение заданного уровня заряда, но недостаточно учитывают индивидуальное состояние батареи. В результате ускоренная зарядка может сопровождаться повышенным тепловыделением, ростом внутреннего сопротивления и ускоренным старением аккумулятора.

В связи с этим возрастает научный интерес к методам интеллектуальной зарядки, в которых процесс управления строится на основе непрерывного мониторинга состояния батареи. Ключевыми показателями становятся:

- 1) уровень заряда (SOC);
- 2) состояние здоровья батареи (SOH);
- 3) температура ячеек;
- 4) внутреннее сопротивление;
- 5) допустимая зарядная мощность.

Такой подход позволяет перейти от универсального профиля зарядки к адаптивному режиму, более щадящему для батареи и более эффективному для пользователя.

Проблема исследования. Несмотря на активное развитие электромобильного транспорта и расширение сети зарядных станций, проблема эффективной и безопасной зарядки аккумуляторных батарей остаётся актуальной. Большинство современных зарядных станций используют стандартные режимы быстрой зарядки, ориентированные на сокращение времени зарядки и не учитывающие текущее состояние аккумулятора.

Научная гипотеза. Отсутствие учета таких параметров, как уровень заряда (SOC), ресурс батареи (SOH), температура и внутреннее сопротивление, может приводить к ускоренной деградации аккумуляторных батарей, снижению их емкости и сокращению срока службы. Разработка адаптивных методов зарядки, основанных на мониторинге показателей работоспособного состояния аккумуляторных батарей позволит оптимизировать процесс зарядки электромобилей.

Для Казахстана проблема особенно актуальна из-за сочетания нескольких факторов: резкоконтинентальный климат, большие расстояния между городами, неоднородный парк электромобилей и доминирование разных стандартов разъемов. В холодных условиях ограничение зарядной мощности и предварительная термоподготовка батареи становятся критически важными. Следовательно, внедрение адаптивной зарядки может дать для Казахстана не только технический, но и экономический эффект за счет снижения износа батарей и повышения надежности дальних поездок.

Таблица 1. Сводный анализ по Казахстану

Параметр	Текущее состояние	Проблема	Перспективное решение
Инфраструктура	Сеть активно растет в городах и на трассах	Неравномерное покрытие по регионам	Развитие магистральных коридоров и узлов быстрой зарядки
Стандарты разъемов	GB/T и CCS2 доминируют; CHAdeMO ограничен	Неоднородность парка и потребность в адаптерах	Мультистандартные станции
Алгоритмы зарядки	Преобладают стандартные режимы	Слабый учет состояния батареи	Интеллектуальная адаптивная зарядка
Климатические условия	Высокая сезонная амплитуда температур	Риск ухудшения зарядки зимой и летом	Температурно-управляемые профили
Научно-техническая база	Исследования формируются	Недостаток локальных прототипов BMS	Локализация исследований и пилотные проекты

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные исследования в области зарядки литий-ионных батарей можно условно разделить на две группы: методы диагностики и оценки состояния батареи и методы непосредственного управления процессом зарядки.

К первой группе относятся модельные методы, основанные на эквивалентных схемах и фильтрах Калмана, импедансные методы, анализ зарядных кривых и методы машинного обучения. Эти подходы используются для оценки SOC и SOH, прогнозирования деградации и обнаружения аномальных режимов работы аккумуляторной батареи.

Ко второй группе относятся стратегии зарядки. Наиболее распространённым промышленным подходом является режим CC–CV, при котором сначала поддерживается постоянный ток, а затем постоянное напряжение. Наряду с ним применяются многоступенчатая зарядка, импульсная зарядка, температурно-управляемые режимы и более сложные интеллектуальные стратегии, основанные на оптимизации и прогнозировании.

Исследования в области аккумуляторных технологий для электромобилей также включают активное изучение литий-железо-фосфатных аккумуляторов (LiFePO_4), которые рассматриваются как одна из наиболее безопасных и долговечных разновидностей литий-ионных батарей. Данный тип аккумуляторов отличается использованием катодного материала на основе фосфата железа, что обеспечивает высокую термическую стабильность, устойчивость к перегреву и длительный срок эксплуатации.

Одной из особенностей литий-железо-фосфатных батарей является их повышенная безопасность и устойчивость к термическому разгоранию по сравнению с другими типами литий-ионных аккумуляторов, такими как NMC или NCA. Благодаря этим свойствам LFP-батареи широко применяются в электромобилях, электрических автобусах и стационарных системах хранения энергии. Кроме того, они характеризуются большим количеством циклов заряд-разряд, что делает их привлекательными для эксплуатации в условиях интенсивного использования.

Однако по сравнению с другими литий-ионными технологиями литий-железо-фосфатные батареи обладают более низкой удельной энергоёмкостью, что может приводить к увеличению массы аккумуляторного блока или сокращению запаса хода транспортного средства. Тем не менее развитие технологий управления батареями и оптимизация режимов зарядки позволяют частично компенсировать данный недостаток.

Таблица 2. Сравнительная характеристика литий-ионных и литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей

Параметр	Литий-ионные батареи (Li-ion, NMC/NCA)	Литий-железо-фосфатные батареи (LiFePO_4)
Катодный материал	Оксиды никеля, марганца, кобальта или алюминия	Фосфат железа (LiFePO_4)
Удельная энергоёмкость	Высокая (150–250 Wh/kg)	Средняя (120–160 Wh/kg)
Срок службы (циклы заряд-разряд)	1000–2000 циклов	3000–6000 циклов
Безопасность	Более чувствительны к перегреву	Высокая термическая стабильность
Риск термического разгона	Относительно высокий	Значительно ниже
Скорость зарядки	Высокая, но возможна деградация при быстрых режимах	Хорошая устойчивость к быстрой зарядке
Рабочий температурный диапазон	Широкий, но чувствительны к высоким температурам	Более стабильны при высоких температурах
Стоимость производства	Более высокая из-за содержания кобальта	Ниже благодаря использованию железа
Основные области применения	Электромобили с большим запасом хода, электроника	Электромобили, электробусы, системы хранения энергии

В современных исследованиях также рассматриваются особенности зарядки LFP-батарей, включая применение адаптивных алгоритмов управления зарядкой,

температурного контроля и методов мониторинга состояния батареи. Эти подходы позволяют повысить эффективность эксплуатации аккумуляторов, обеспечить стабильность их работы и продлить срок службы в электротранспортных системах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа современных научных публикаций и технологических решений в области зарядки электромобилей были систематизированы основные методы управления процессом зарядки аккумуляторных батарей, различающиеся принципом формирования зарядного профиля, уровнем адаптивности к состоянию батареи и требованиями к системе управления батареями (BMS). Основные характеристики и особенности наиболее распространённых стратегий зарядки, а также их эффективность, безопасность и влияние на деградацию аккумулятора представлены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительный анализ современных методов зарядки электромобилей

Метод	Принцип	Преимущества	Ограничения	Применимость
CC-CV	Постоянный ток с переходом к постоянному напряжению	Простота, промышленная зрелость, совместимость с большинством BMS	Не учитывает индивидуальный SOH; на высоком токе ускоряет старение	Базовый стандарт для AC и DC зарядки
Многоступенчатая CC	Ток изменяется по нескольким ступеням	Лучше контролирует нагрев и ресурс батареи	Требует точной настройки для разных типов батарей	Перспективен для управляемой быстрой зарядки
Импульсная зарядка	Чередование импульсов тока и пауз	Может снижать поляризацию и перегрев	Нет единого отраслевого стандарта; эффект зависит от химии батареи	Чаще используется в исследованиях
Температурно-управляемая зарядка	Мощность зарядки подстраивается под температурный режим	Снижает риск перегрева и литиевого осаждения	Нужны точные датчики и тепловая модель	Актуальна для холодного и жаркого климата
MPC/оптимизационная зарядка	Управление строится на модели батареи и целевой функции	Балансирует время зарядки и деградацию	Высокая вычислительная сложность, требовательность к модели	Перспективна для продвинутых BMS
ML/RL-интеллектуальная зарядка	Режим формируется на основе обученных моделей и телеметрии	Высокая адаптивность, возможность персонализации профиля	Нужны качественные данные и валидация безопасности	Перспективна для облачных и цифровых BMS
Health-aware fast charging	Профиль зарядки корректируется по SOC, SOH, температуре и сопротивлению	Сокращает деградацию при быстрой зарядке	Требует развитой диагностики и связи EV-EVSE	Наиболее перспективен для электромобилей нового поколения

Сравнение показывает, что мировая практика постепенно смещается от универсальных режимов CC-CV к интеллектуальным стратегиям, в которых алгоритм зарядки зависит не только от целевого SOC, но и от текущего состояния батареи. Наиболее перспективными направлениями являются temperature-aware и health-aware fast charging, а также методы на основе MPC и машинного обучения. Схема предлагаемого адаптивного метода показана на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема адаптивной зарядки на основе мониторинга состояния аккумуляторной батареи

Предлагаемый подход предполагает непрерывный мониторинг параметров батареи, оценку ограничений по температуре и деградации, выбор оптимального режима зарядки и обратную связь для обновления модели состояния. Такая схема может быть реализована как на уровне бортовой BMS, так и при взаимодействии автомобиля с зарядной станцией.

Эффективная зарядка электромобиля должна определяться не максимально доступной мощностью станции, а оптимальной мощностью, вычисляемой в реальном времени на основе мониторинга работоспособного состояния аккумуляторной батареи. Иными словами, ключ к повышению эффективности заключается не только в развитии сети быстрых станций, но и во внедрении интеллектуальных алгоритмов, способных учитывать индивидуальные особенности конкретной батареи.

Предлагаемый метод зарядки можно описать следующим образом: на этапе начала сессии и в ходе самой зарядки система определяет SOC, SOH, температуру и внутреннее сопротивление батареи; на основе этих данных вычисляются ограничения и выбирается безопасный профиль зарядки; далее мощность и ток корректируются динамически с учетом риска перегрева, литиевого осаждения и ускоренной деградации; при изменении состояния батареи алгоритм обновляет режим зарядки. Таким образом, достигается баланс между скоростью зарядки, безопасностью и сроком службы батареи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный объединенный анализ показал, что мировая эволюция технологий зарядки идет в направлении интеллектуальных, адаптивных и health-aware стратегий. Простые универсальные методы, такие как CC-CV, остаются отраслевым стандартом, но уже не полностью отвечают требованиям долгосрочного сохранения ресурса батареи при росте мощности зарядной инфраструктуры.

Для Казахстана наиболее рациональной траекторией развития является сочетание экстенсивного роста инфраструктуры с качественным переходом к более интеллектуальным протоколам зарядки. С учетом климатических условий, распределенности сети и неоднородности парка электромобилей внедрение адаптивной зарядки на основе мониторинга SOC, SOH, температуры и сопротивления является перспективным направлением как для научных исследований, так и для практической модернизации зарядных станций и BMS.

Разработка и внедрение таких решений позволит повысить эффективность использования существующих зарядных мощностей, уменьшить деградацию аккумуляторных батарей и создать основу для более устойчивой и безопасной экосистемы электромобильности в Казахстане.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках диссертационного исследования на тему «Исследование и разработка метода эффективной зарядки электромобилей на основе мониторинга показателей работоспособного состояния аккумуляторных батарей» по образовательной программе 8D07104 Транспорт, транспортная техника и технологии.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы научной статьи не использовали инструменты искусственного интеллекта (ИИ) на различных этапах подготовки своей работы, включая помощь в написании текста, редактировании, проверке фактов, а также анализе данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bose B., Niasar M., Andersen P., et al. Study on Li-ion battery fast charging strategies. Journal of Energy Storage, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105324>
- Bu Y., et al. Adaptive Health-Aware Fast Charging Strategy for Lithium-Ion Batteries. Energies, 2025. <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/23/6251>
- Tang K., et al. The State of Health Estimation of Lithium-Ion Batteries: A Review. World Electric Vehicle Journal, 2025. <https://www.mdpi.com/2032-6653>
- Petrella A., et al. Fast estimation of lithium-ion battery state of health using time-series classification. Journal of Energy Storage, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118747>
- Xia B., et al. SOH estimation of lithium-ion batteries with local health indicators under fast charging. Energy, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137617>
- АО "NC "KazAvtoJol". На республиканских автодорогах активно развивается сеть электрозарядных станций. 20.08.2025. URL:<https://ru.qaj.kz>
- Astana Hub. Популярные зарядные разъемы для электромобилей в Казахстане. 05.02.2025. URL:<https://astanahub.com/ru/blog/razbiraem-populiarnye-zariadnye-raziomy-dlia-elektromobilei-v-kazakhstane>

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ЧЕРЕЗ ОПТИМИЗАЦИЮ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ

УДК 621.9

Д.С.Азизов¹, Ә.Қ.Курганов², К.К.Комбаев^{1*}, К. Е.Апбазов¹

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

²Казахстанский университет технологии и бизнеса, Астана, Казахстан

*Автор-корреспондент: Комбаев Куат Курганович, e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В работе представлено экспериментальное исследование влияния режимов электроэрозионной обработки на формирование микроструктуры и распределение микротвёрдости поверхности инструментальной стали Х12МФ. Обработка выполнялась методом проволоочно-вырезной электроэрозионной резки на станке DK7745 с использованием латунной проволоки диаметром 0,18 мм в диэлектрической среде на водной основе. Рассмотрены два технологических режима: чистовой и интенсивный, отличающиеся параметрами импульсного напряжения, тока разряда и длительности импульсов.

Проведён металлографический анализ, позволивший выявить особенности морфологии поверхностного слоя, характер распределения карбидных фаз и степень термического воздействия при различных режимах обработки. Установлено, что чистовой режим способствует формированию мелкозернистой мартенситной структуры с равномерно распределёнными карбидами и минимальным развитием эрозионных кратеров. Интенсивный режим приводит к увеличению размеров кратеров, формированию зон переплавления и повторной кристаллизации, а также к структурной неоднородности.

Результаты измерения микротвёрдости показали, что чистовой режим обеспечивает более высокие и стабильные значения по глубине поверхностного слоя, тогда как интенсивный режим характеризуется их снижением и значительной вариативностью. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации режимов электроэрозионной обработки для повышения эксплуатационных характеристик штамповой оснастки.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка; проволоочно-вырезная обработка; сталь Х12МФ; микроструктура; микротвёрдость; режимы обработки.

ВВЕДЕНИЕ

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) представляет собой высокоэффективный нетрадиционный метод обработки электропроводящих материалов, основанный на локальном разрушении поверхности заготовки под воздействием импульсных электрических разрядов. В отличие от традиционных лезвийных методов обработки, ЭЭО является бесконтактным процессом, позволяющим получать детали сложной геометрической формы с высокой точностью размеров и качеством поверхности. Существенным преимуществом метода является возможность обработки материалов практически любой твердости без значительных механических нагрузок на инструмент и заготовку [1].

В промышленной практике применяются два основных вида электроэрозионной обработки: объемное электроэрозионное копирование и проволоочно-вырезная обработка. При объемной

обработке формирование поверхности осуществляется с использованием профилированного электрода инструмента, который постепенно внедряется в заготовку и воспроизводит заданную геометрию полости, рисунок 1. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, в свою очередь, использует тонкую проводящую проволоку в качестве электрода-инструмента, что обеспечивает высокую гибкость при формировании сложных контуров и профилей, рисунок 1А. Электрод-инструмент (I) служит проводящим рабочим элементом, через который подаются импульсы электрического разряда и который постепенно перемещается в направлении заготовки. Обрабатываемая деталь (II) представляет собой электропроводящий материал, поверхность которого разрушается под воздействием последовательных электрических разрядов [2].

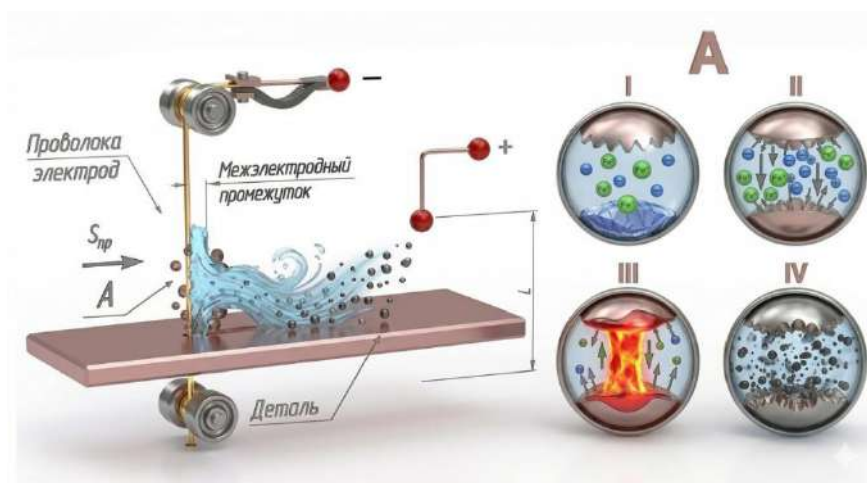


Рисунок 1. Основные схемы электроэрозионной обработки.

Между электродом и заготовкой формируется межэлектродный промежуток (III), заполненный диэлектрической жидкостью, в котором происходят процессы ионизации среды, образование плазменного канала и удаление продуктов эрозии. Подача управляемых электрических импульсов осуществляется от генератора импульсного питания (IV), обеспечивающего необходимые условия для возникновения разрядов и стабильного протекания процесса электроэрозионной обработки.

Независимо от типа процесса, механизм электроэрозионного разрушения материала остается одинаковым. Между электродом-инструментом и заготовкой формируется межэлектродный промежуток, заполненный диэлектрической жидкостью. При подаче импульсного напряжения происходит ионизация среды и образование плазменного канала проводимости. В зоне разряда возникает локальное повышение температуры, вызывающее плавление и частичное испарение материала поверхности. После прекращения импульса образовавшийся газоплазменный пузырь разрушается, и расплавленный металл удаляется из зоны обработки потоком диэлектрической жидкости в виде мелкодисперсных частиц, рисунок 2.

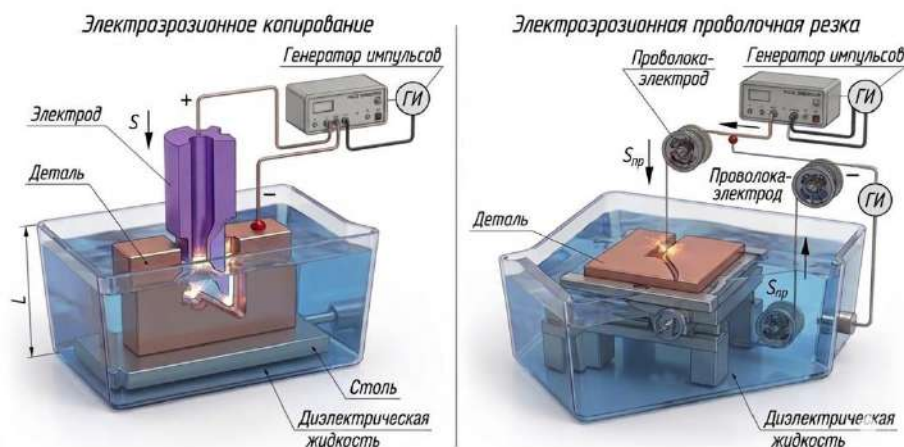


Рисунок 2. Схема формирования плазменного канала и удаления расплавленного металла при электроэрозионной обработке.

Интенсивность съема материала и износ инструмента зависят от параметров электрического импульса, полярности электродов и свойств используемых материалов. При прямой полярности заготовка выступает в роли анода, а инструмент — катода, тогда как при обратной полярности распределение зарядов меняется. Для повышения стойкости инструмента обычно применяются материалы с высокой эрозионной устойчивостью, такие как графит или медь [3].

Таким образом, электроэрозионная обработка представляет собой сложный электрофизический процесс, включающий явления электрического пробоя, формирования плазменного канала, локального плавления и удаления материала. Благодаря высокой точности и возможности обработки труднообрабатываемых материалов ЭЭО широко используется при изготовлении пресс-форм, штампов, режущего инструмента и других деталей сложной конфигурации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках настоящего исследования были проведены экспериментальные работы по изготовлению элементов штамповой оснастки — матрицы и пуансона, предназначенных для технологического процесса получения заготовок шпинделя. В качестве материала заготовок шпинделя использовалась коррозионно - стойкая мартенситная сталь 14Х17Н2, широко применяемая для изготовления ответственных деталей машин, работающих в условиях повышенных нагрузок и коррозионного воздействия. Химический состав и свойства данной стали регламентируются требованиями ГОСТ 5632–2014 [4].

Для изготовления штамповой оснастки применялась труднообрабатываемая инструментальная штамповая сталь Х12МФ, согласно ГОСТ 5950–2000, обладающая высокой износостойкостью, твердостью и сопротивлением пластической деформации. Данный материал широко используется для изготовления штампов холодной деформации, матриц и пуансонов, применяемых в технологических процессах формообразования металлических заготовок.

Формирование рабочих контуров матрицы и пуансона осуществлялось методом проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на станке DK7745. В качестве электрода-инструмента использовалась латунная проволока диаметром 0,18 мм. В процессе обработки применялась диэлектрическая рабочая жидкость на основе водного раствора. Управление параметрами процесса осуществлялось посредством программируемого генератора импульсов станка [5].

Основные технологические режимы электроэрозионной обработки, применяемые при изготовлении штамповой оснастки, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы электроэрозионной обработки на станке DK7745, использованные при исследовании микроструктуры.

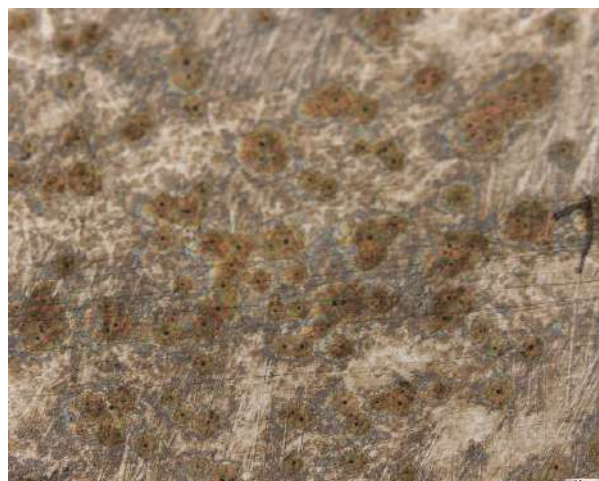
Параметр обработки	Обозначение	Режим 1 (чистовой)	Режим 2 (интенсивный)
Напряжение импульса	U	65 В	75 В
Ток разряда	I	2 А	4 А
Длительность импульса	Ton	6 мкс	12 мкс
Пауза между импульсами	Toff	40 мкс	20 мкс
Диаметр проволоки	d	0,18 мм	0,18 мм
Скорость подачи проволоки	Vw	6 м/мин	9 м/мин
Скорость резания	Vc	85 мм ² /мин	115 мм ² /мин
Рабочая жидкость	—	водный диэлектрик	водный диэлектрик
Толщина обрабатываемой заготовки	h	25 мм	25 мм

Исследования проводились в лаборатории Smart Engineering Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева. Для проведения металлографического анализа из обработанных заготовок были вырезаны образцы размером 10 × 10 × 25 мм. Подготовка образцов включала механическую шлифовку и полировку с последующим травлением для выявления структурных составляющих материала [6].

Исследование микроструктуры проводилось с использованием оптического металлографического микроскопа Olympus BX51. Наблюдения выполнялись при различных увеличениях, что позволило оценить особенности структурного состояния материала, характер распределения фаз и возможные изменения микроструктуры после электроэрозионной обработки. Полученные микрофотографии использовались для анализа морфологии структуры и оценки влияния технологических параметров обработки на структурное состояние материала. Микротвердость поверхности измеряли по методу Виккерса, в соответствии со стандартами ST SEV 469-77 и ISO 6508-86. В качестве индентора использовался конический алмазный наконечник с углом вершины 120°, а значения твердости округлялись до ближайших 0,5 единиц. Полученные данные обрабатывались и графически представлены с помощью Microsoft Excel [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты микроструктурного анализа обработанных образцов представлены на рисунке 3. На микрофотографиях, рисунок 3 а, б показана структура поверхности стали после электроэрозионной обработки при различных режимах обработки.



а) чистовой режим обработки;

б) интенсивный режим обработки.

Рисунок 3. Микроструктура поверхности стали X12МФ после электроэрозионной резки.

На рисунке 3а представлена микроструктура поверхности образца из стали X12МФ, обработанного в мягком (чистовом) режиме электроэрозионной обработки. Сталь X12МФ относится к инструментальным высокоуглеродистым мартенситным сталям с содержанием хрома около 12 % и углерода 1,4–1,5 %. В исходном состоянии в её матрице мартенсита присутствуют дискретные карбидные фазы Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , VC и Mo_2C , которые формируют твёрдую и износостойкую структуру.

При мягком режиме ЭЭО на поверхности наблюдаются мелкие эрозионные кратеры диаметром примерно 2–5 мкм. Карбидные включения видны как тёмные дисперсные фазы, равномерно распределённые по поверхности. Локальное плавление материала ограничено, что сохраняет мелкозернистую структуру мартенситной матрицы и исходное распределение карбидов. Быстрое охлаждение в диэлектрической среде формирует тонкий переплавленный слой (до 2–3 мкм), не вызывая значительных термических напряжений. Такая структура обеспечивает высокую твёрдость и износостойкость обработанного слоя.

На рисунке 3б показана микроструктура поверхности той же стали, обработанной при более интенсивном режиме ЭЭО. В этом случае наблюдается более выраженный рельеф поверхности с крупными кратерами диаметром около 10–20 мкм и локальными зонами переплавленного металла толщиной до 10 мкм. Повышение тока разряда и длительности импульса приводит к более интенсивному плавлению материала, частичному растворению мелких карбидов и перераспределению легирующих элементов. Повторная кристаллизация расплавленного металла формирует грубозернистый поверхностный слой с локальной неоднородностью твёрдости. На поверхности также могут появляться микродефекты, вызванные быстрым охлаждением переплавленных зон.

Сравнительный анализ микроструктур на рисунке 3 (а, б) показывает, что режимы электроэрозионной обработки существенно влияют на морфологию и фазовое распределение поверхности стали X12МФ. Мягкий режим обеспечивает сохранение дискретных карбидных фаз Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , VC , Mo_2C , мелкозернистую мартенситную матрицу и минимальные кратеры, что благоприятно для твёрдости и износостойкости. Интенсивный режим увеличивает размеры кратеров, формирует зоны повторной кристаллизации, перераспределяет карбиды и создаёт грубозернистый слой с локальными дефектами. Данные структурные особенности находят прямое отражение в распределении микротвёрдости, представленном на рисунке 4.

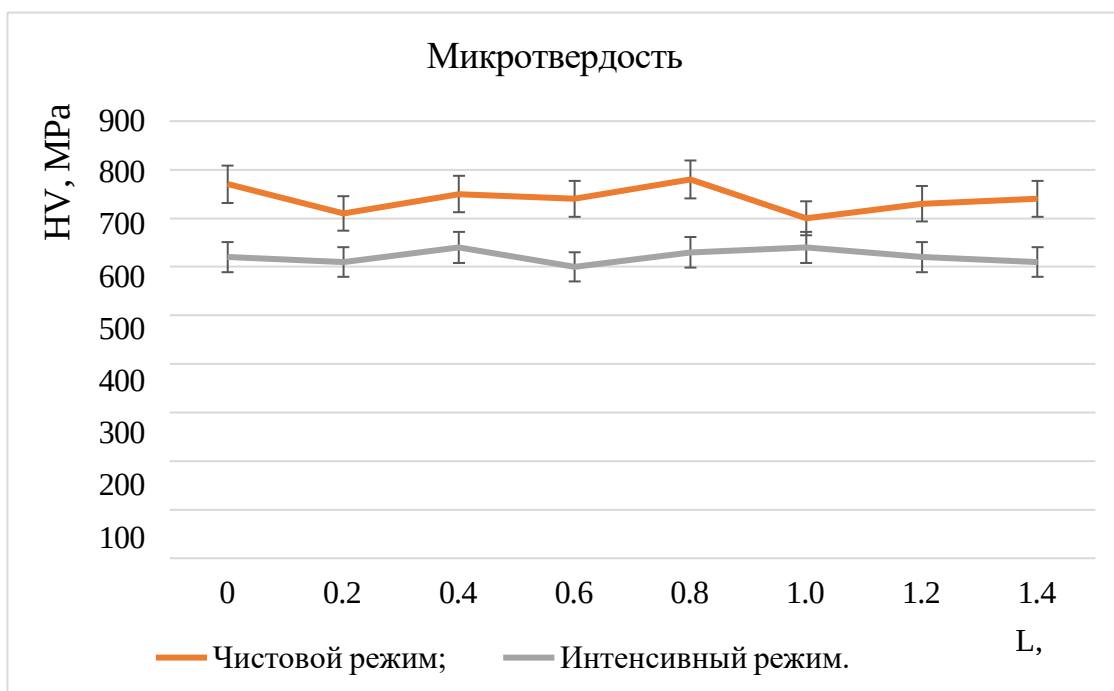


Рисунок 4. Профиль микротвёрдости по глубине после ЭЭО стали X12МФ

Распределение микротвёрдости по глубине поверхностного слоя, рисунок 4 демонстрирует характерные различия между чистовым и интенсивным режимами электроэрозионной обработки. В приповерхностной зоне (до ~0,2–0,3 мкм) наблюдаются максимальные значения микротвёрдости, достигающие порядка 800–900 HV, что связано с формированием закалённого слоя и высокой концентрацией упрочняющих фаз.

Для чистового режима характерно относительно плавное снижение микротвёрдости с увеличением глубины, при этом значения остаются более стабильными и равномерными по всему исследуемому слою. Это указывает на формирование однородной мелкозернистой структуры с равномерным распределением карбидных фаз.

В случае интенсивного режима кривая микротвёрдости имеет более выраженный неравномерный характер: после высоких значений на поверхности наблюдается резкое снижение и последующие колебания по глубине. В отдельных зонах микротвёрдость существенно уменьшается, что свидетельствует о структурной неоднородности, наличии зон повторной кристаллизации, термического разупрочнения и локальных дефектов.

На глубинах свыше ~1,0–1,2 мкм значения микротвёрдости для обоих режимов постепенно сближаются, приближаясь к характеристикам основного материала. В целом, полученные зависимости подтверждают, что чистовой режим обеспечивает формирование более стабильного и упрочнённого поверхностного слоя, тогда как интенсивный режим приводит к его разупрочнению и структурной неоднородности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволило установить влияние режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на микроструктуру и микротвёрдость стали X12МФ: показано, что чистовой режим формирует однородный мелкозернистый мартенситный слой с кратерами ~2–5 мкм, переплавленным слоем до 2–3 мкм и стабильной микротвёрдостью ~800–900 HV,

тогда как интенсивный режим приводит к увеличению кратеров до ~10–20 мкм, росту переплавленного слоя до ~10 мкм, структурной неоднородности и снижению микротвёрдости; научная новизна заключается в установлении количественной взаимосвязи между параметрами импульсного режима и характеристиками поверхностного слоя, что вносит вклад в развитие представлений о структурообразовании при ЭО; практическая значимость состоит в обосновании выбора чистового режима для повышения износостойкости и качества поверхности штамповой оснастки; ограничением является рассмотрение ограниченного набора режимов обработки; перспективы дальнейших исследований связаны с расширением диапазона параметров ЭО, а также изучением остаточных напряжений, трещинообразования и эксплуатационных характеристик обработанных поверхностей.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО

ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке работы использовалась система искусственного интеллекта ChatGPT для редактирования текста, улучшения стиля и структурирования материала. Все научные результаты, анализ и выводы выполнены авторами самостоятельно; использование ИИ носило вспомогательный характер и не повлияло на достоверность исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gu L., Zhu Y., Zhang F. et al. Mechanism Analysation and Parameter Optimisation of Electro Discharge Machining of Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy // Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 32, pp. 773–781. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.023.
2. Shastri R.K. Reviewing performance measures of the die-sinking EDM process // Nanomaterials. 2022. Vol. 12, № 3, p. 384. DOI: 10.3390/nano12030384. — описывает принципы EDM и его безконтактный характер.
3. Shastri R.K. A critical review on different aspects of electric discharge machining // Materials Today: Proceedings. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.748.
4. Азизов Д. С., Кылымбеков Н. К., Комбаев К. К. Определение оптимальных режимов электроискровой обработки конструкционной легированной стали для повышения поверхностных физико-механических свойств // Материалы XI Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», посвященной 80-летию Кульсеитова Ж. О., 10–11 апреля 2025 г., Часть I. - Усть-Каменогорск: Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. С. Серикбаева, 2025. - С. 14–18.
5. Kombayev, K., Kozhakhmetov, Y., Yerbolat, D., Dauletkhanov, Y., Kim, V., Kaidar, A., Ishangaliyev, A., & Khoshnaw, F. (2026). Influence of cutting parameters and assist gases on the laser cutting quality of 09G2S (S355J2, EN 10025-2) structural steel. Results in Surfaces and Interfaces, 22, 100716. <https://doi.org/10.1016/j.rsi.2025.100716>
6. Gridunov, I., Kombayev, K., Wieleba, W., & Muzdybayeva, A. (2025). Studying the effect of the electrolyte plasma modification method on the mechanical and tribological properties of the crankshaft steel samples surface. International Review of Mechanical Engineering, 19(6), 272. <https://doi.org/10.15866/ireme.v19i6.25958>
7. K. Kombayev, F. Khoshnaw, G. Uazyrkhanova, and G. Moldabayeva, "Experimental and mathematical modelling investigation of plasma electrolytic oxidation (PEO) for surface hardening of 20Ch steel," Materials, vol. 17, no. 24, p. 6043, 2024, doi: 10.3390/ma17246043.

СРАВНЕНИЕ И ВЫБОР ПРИМЕНЯЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РОБОТА

УДК 004.896

Е.А. Айдарханов^{1*}, Д.М. Мырзабекова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Айдарханов Елжас Бақытбекұлы, e-mail:
yelzhas.a.b@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье представлен сравнительный анализ конструктивных решений мобильных платформ для интеллектуального робота сервисного назначения, предназначенного для эксплуатации в закрытых помещениях. Цель исследования заключается в обосновании выбора рациональной конструкции мобильного шасси на основе инженерных расчетов устойчивости, оценки энергоэффективности и технологичности реализации. Рассмотрены четырехколесные, гусеничные, омни-колесные и дифференциальные схемы. Выполнены расчеты коэффициента статической устойчивости и анализ динамической устойчивости при разгоне и торможении. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения дифференциальной конструкции с двумя ведущими колесами для сервисного интеллектуального робота.

Результаты работы позволяют обосновать выбор оптимальной механической базы для интеграции систем искусственного интеллекта и технического зрения.

Ключевые слова: мобильный робот, интеллектуальная система, дифференциальный привод, устойчивость, робот-гида, автономная навигация.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие сервисной робототехники является важным направлением цифровой трансформации современного общества. Мобильные интеллектуальные роботы применяются в образовательных учреждениях, музеях, медицинских центрах и логистических комплексах. Конструктивная схема мобильной платформы оказывает решающее влияние на устойчивость, маневренность, точность позиционирования и энергоэффективность системы. Современное развитие робототехники требует создания мобильных систем, способных не только перемещаться в пространстве, но и эффективно взаимодействовать с окружающей средой. Актуальность данной темы обусловлена ростом потребности в сервисных и инспекционных роботах для Индустрии в Республике Казахстан. Выбор конструкции является фундаментальным этапом, так как механические ограничения напрямую влияют на возможности программного обеспечения и алгоритмов ИИ.

Целью данной работы является сравнительный анализ существующих конструкций мобильных роботов и разработка методики выбора оптимального шасси для конкретных эксплуатационных задач. Гипотеза исследования заключается в том, что для многофункциональных интеллектуальных систем наиболее перспективными являются гибридные или специализированные колесные платформы (например, с колесами Илона), обеспечивающие максимальную маневренность.

Цель исследования — выполнить сравнительный анализ конструктивных решений мобильных платформ и обосновать выбор оптимальной схемы для интеллектуального робота.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования рассмотрены следующие типы мобильных платформ: четырехколесная классическая схема, гусеничная платформа, омни-колесная конструкция и дифференциальная платформа с двумя ведущими колесами.

Для оценки устойчивости использовались методы статического и динамического анализа. Коэффициент статической устойчивости определяется выражением:

$$K_{уст} = b / (2h_{цм})$$

При ширине базы $b = 0.44$ м и высоте центра масс $h_{цм} = 0.5$ м получаем $K_{уст} = 0.44$.

Условие устойчивости выполняется при $K_{уст} > 0,3$. Таким образом, платформа обладает достаточным запасом статической устойчивости.

Динамическая устойчивость при разгоне определяется условием: $m \cdot a \cdot h_{цм} \leq m \cdot g \cdot (b/2)$. После преобразования получаем допустимое ускорение:

$$a_{доп} \leq g \cdot (b/2) / h_{цм} = 4.32 \text{ м/с}^2.$$

Для проведения исследования были проанализированы три основных типа локомоции мобильных роботов.

1. Колесные платформы: Рассматривались дифференциальные схемы, системы с управляемыми колесами (Ackermann steering) и всенаправленные (omni-directional) платформы. Используемое ПО: MATLAB/Simulink для моделирования кинематики и ROS (Robot Operating System) для тестов навигации.

2. Гусеничные платформы: Изучались модели с жесткой и адаптивной подвеской, предназначенные для преодоления лестничных маршей и завалов.

3. Шагающие системы: Анализировались четырехногие (quadruped) системы в контексте их устойчивости на неровных поверхностях.

Оценка конструкций проводилась по следующим критериям:

- * Коэффициент сцепления с поверхностью.
- * Удельное энергопотребление на 1 метр пути.
- * Радиус разворота (маневренность).
- * Сложность алгоритмической реализации движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ показал, что гусеничная конструкция обладает высокой проходимостью, однако характеризуется повышенным энергопотреблением. Омни-колесная платформа обеспечивает максимальную маневренность, но требует сложных алгоритмов управления и увеличивает стоимость проекта.

Дифференциальная схема обеспечивает разворот на месте, простоту управления и достаточную устойчивость при компактных габаритах.

Таблица 1. Сравнение параметров платформы

Параметр	Дифференциальная	Гусеничная
Маневренность	Высокая	Средняя
Устойчивость	Достаточная	Высокая
Энергоэффективность	Высокая	Низкая
Сложность управления	Низкая	Средняя

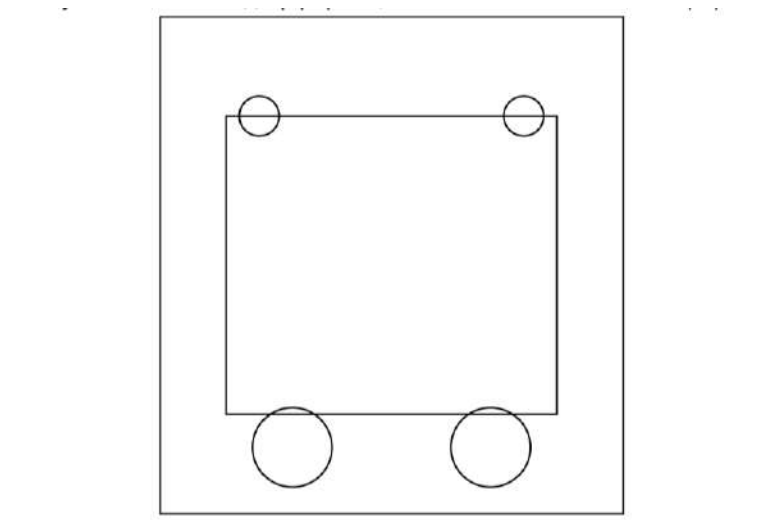


Рисунок 1. Схема дифференциальной мобильной платформы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа установлено, что для мобильного интеллектуального робота сервисного назначения рациональным является применение дифференциальной конструкции. Проведенные инженерные расчеты подтверждают достаточный запас статической и динамической устойчивости.

Проведенное исследование подтвердило, что универсальной конструкции для мобильного робота не существует. В соответствии с поставленными задачами было определено:

1. Для интеллектуальных систем внутри помещений оптимальным выбором является всенаправленная колесная платформа.
2. Для задач мониторинга территорий с нестабильным рельефом необходимо использование гусеничного привода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abedin, B., Meske, C., Junglas, I., & others. (2022). Designing and managing human-AI interactions. *Information Systems Frontiers*, 24, 691–697.
- Schwab, K. (2016). The fourth industrial revolution. World Economic Forum.
- Shevyakova, A., Petrenko, Y., et al. (2023). Building competencies for Industry 4.0: Suggestions from Kazakhstan experience. *Communications of International Proceedings*.
- Хайруллина, М. В., Сейсинбинова, А. А. (2019). Проблемы формирования государственной политики инновационного развития Казахстана и России. *Вестник ЕНУ им. Л. Н. Гумилева*.

2D LiDAR ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ РОБОТ-ГИД МАРШРУТЫН ЖОСПАРЛАУҒА АРНАЛҒАН ТИІМДІ САНДЫҚ АЛГОРИТМДЕРДІ ҚҰРУ

ӨОК 519.6:519. 85

Е.М. Айдарханов^{1*}, Ж.Т. Рахметуллина¹

¹Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен қаласы

*Корреспондент-автор: Айдарханов Елжан Мұратбекұлы, e-mail: elzhan.a@mail.ru

Түйіндеме. Бұл мақалада 2D LiDAR сенсоры бар мобильді робот-гидтің музей, көрме залы немесе оқу ғимараты сияқты ішкі кеңістікте автономды навигациясын қамтамасыз ететін сандық алгоритмдер жиыны ұсынылады. Ұсынылған шешім LiDAR деректерін алдын ала өңдеу, карта құру және локализация, кедергілер аймағын кеңейту (inflation), графтық модельге түрлендіру және маршрутты жоспарлау (A*; динамикалық ортада D* Lite) кезеңдерінен тұрады. Негізгі қолданбалы үлес – робот-гид үшін адамдарға қауіпсіз қашықтықты қамтамасыз ететін inflation радиусын сандық түрде таңдау әдістемесі және оның маршрут сапасына әсерін өлшенетін метрикалармен (SR, L, T_plan, R, C_min) талдау.

Түйінді сөздер: 2D LiDAR, робот-гид, маршрут жоспарлау, A*, D* Lite, occupancy grid, inflation радиусы, қауіпсіз дистанция.

КІРІСПЕ

Робот-гидтер сервистік робототехникадағы маңызды қолданбалардың біріне айналды: музейде келушілерге бағыт көрсету, көрме залында экспонаттар арасында жүргізу, оқу ғимараттарында кабинеттерге жеткізу және қоғамдық кеңістіктерде ақпараттық навигация қызметін атқару. Мұндай сценарийлерде робот адамдармен бір ортада қозғалады, демек қауіпсіздік пен әлеуметтік қолайлылық негізгі талап болады. Маршрутты жоспарлау міндеті тек «ең қысқа жолды» табумен шектелмейді: робот адамға қолайсыз жақындауды болдырмауы, күтпеген кедергілерге жедел жауап беруі, тар дәліздерде өтімділікті жоғалтпауы және қозғалысты бірқалыпты орындауы қажет.

Бұл жұмыстың мақсаты – 2D LiDAR негізіндегі робот-гид навигациясына арналған сандық алгоритмдер архитектурасын ұсыну және ең маңызды параметрлердің бірі болып саналатын inflation радиусын (адамға қауіпсіз дистанция) формальды түрде таңдау әдістемесін негіздеу.

Глобалды жоспарлау карта белгілі болғанда мақсатқа дейінгі жолды есептейді. Граф теориясына негізделген классикалық әдістерге Dijkstra және A* жатады. Dijkstra оптималды шешім береді, бірақ есептеу шығыны жоғары болуы мүмкін. A* эвристика арқылы іздеуді бағыттады және практикада тиімді баланс береді.

Динамикалық ортада толық қайта жоспарлау жиі тоқтауға әкеледі, сондықтан инкременталды қайта жоспарлауға бейім D* Lite қолданылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Робот күйі $x_t = (x_t, y_t, \theta_t)$, басқару әсерлері $u_t = (v_t, \omega_t)$. 2D LiDAR өлшеулері $z_t = \{(r_i, \alpha_i)\}_{i=1..n}$. Орта occupancy grid карта ретінде беріледі: $M \in \{0, 1, -1\}^{N \times N}$.

Тәжірибелік деректер ағындары: /scan (LiDAR), /odom (одометрия), /tf (түрлендірулер), қажет болса /cmd_vel. LiDAR үшін диапазон және медианалық сүзгі қолданылады.

LiDAR өлшеулері картаға түсірілмес бұрын декарттық координаттарға түрлендіріледі:

$$x_i = r_i \cos(\alpha_i), \quad y_i = r_i \sin(\alpha_i)$$

Робот-гид үшін inflation радиусы robot өлшемін ғана емес, адамның жеке кеңістігін сақтауды да қамтамасыз етеді. Сондықтан r_{infl} үш компонентпен анықталады: r_{robot} (роботтың тиімді радиусы), r_{human} (адамға жайлы дистанция) және σ_{loc} (локализация қателігі).

Ұсынылатын сандық ереже:

$$r_{infl} = r_{robot} + r_{human} + k \cdot \sigma_{loc}$$

Мұнда $k \geq 1$ (әдетте 1.5–2). Ашық залдарда r_{human} көбіне 0.6–0.8 м, тар дәліздерде 0.35–0.5 м диапазонында таңдалады. σ_{loc} локализация модулінің статистикасынан бағаланады. r_{infl} тым үлкен болса өтімділік төмендеп SR азаюы мүмкін; r_{infl} тым кіші болса C_{min} төмендеп, адамға қолайсыз жақындау қаупі өседі.

A* алгоритмі үшін бағалау функциясы:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

Динамикалық ортада D* Lite алдыңғы есептеулерді қайта пайдаланып, маршрутты жылдам жаңартады. Бұл robot-гидтің жиі тоқтап қалуын азайтады.

Екі сценарий қарастырылады: S1 – статикалық орта (кедергілер тұрақты), S2 динамикалық орта (адам немесе уақытша тосқауыл пайда болады). Әр сценарийде бірдей мақсат нүктелері қолданылып, әр маршрут бірнеше рет қайталанады. Өзгеретін факторлар: жоспарлау әдісі (A* немесе D* Lite) және inflation радиусының нұсқалары.

Негізгі метрикалар: SR (нүктеге жету үлесі), L (маршрут ұзындығы), T_{plan} (жоспарлау уақыты), R және T_{replan} (қайта жоспарлау), C_{min} (қауіпсіздік индексі). Осы шартты берілгендер негізінде 1-ші, 2-ші кестелер құрастырылады.

Кесте 1. Радиус бойынша салыстыру

Нұсқа	r_{infl} (м)	SR (%)	C_{min} (м)	L (м)	Ескерту
A (үлкен)	0.88	92	0.62	19.8	Өтімділік төмендеуі мүмкін
B (баланс)	0.68	100	0.49	18.6	Баланс орташа
C (кіші)	0.55	100	0.34	17.9	Қауіпсіздік төмендеуі мүмкін

Кесте 2. Алгоритмдер бойынша салыстыру

Сценарий	Әдіс	SR (%)	T _{plan} (мс)	L (м)	C_{min} (м)
S1	A*	100	22	18.4	0.55
S1	D* Lite	100	24	18.7	0.55
S2	A* (қайта есептеу)	90	41	19.6	0.46
S2	D* Lite	97	43	19.9	0.47
Әдіс (S2)		R (рет)	T _{replan} (мс)	Нәтиже	
A* (қайта есептеу)		2	35	Толық қайта жоспарлау	
D* Lite		2	12	Инкременталды қайта жоспарлау	

Алгоритмдік тәжірибе (модельдік). Inflation әсерін сандық көрсету үшін бірдей картада (resolution=0.05 м/ұяшық) A* жоспарлау орындалды. Үш нұсқа салыстырылды: (A) кіші $r_{infl}=0.55$ м, (B) дәліздік $r_{infl}=0.68$ м, (C) залдық $r_{infl}=0.88$ м. Әр нұсқа үшін маршрут ұзындығы L, жоспарлау уақыты T_{plan} және қауіпсіздік маржасы C_{min} бағаланды. T_{plan} өлшемі миллисекундпен берілген (бірдей компьютер/параметрлер жағдайында).

Берілгендер бойынша $k\sigma_{loc} = 2 \cdot 0.05 = 0.10$ м. Сонда:
 1) Ашық зал үшін: $r_{infl} = 0.18 + 0.60 + 0.10 = 0.88$ м.
 2) Тар дәліз үшін: $r_{infl} = 0.18 + 0.40 + 0.10 = 0.68$ м.
 Бұл таңдаулар роботтың геометриялық өлшемін, адамның комфорт аймағын және

локализация қателігін бір формулаға біріктіреді, яғни параметр «көз мөлшермен» емес, есеппен анықталады.

Шешімі:

$$r_{infl} = r_{robot} + r_{human} + k \cdot \sigma_{loc}$$

Дифференциалды жетекті робот-гид ішкі кеңістікте (дәліздер мен ашық зал) қозғалады. Роботтың тиімді радиусы $r_{robot}=0.18$ м. Локализацияның орташа қателігі $\sigma_{loc}=0.05$ м. Сенімділік коэффициенті $k=2$ деп алынады. Адамға жайлы дистанция екі режимде таңдалады: (1) ашық зал: $r_{human}=0.60$ м, (2) тар дәліз: $r_{human}=0.40$ м. Талап: роботтың жоспарланған маршруты бойында кедергілерге (және адамға) дейінгі минималды қашықтық C_{min} кемінде 0.45 м болсын, ал өтімділік (маршрут табылуы) бұзылмасын.

Есептің шарты.

Бұл бөлімде робот-гид үшін inflation радиусын сандық түрде таңдау және оның маршрутқа әсерін бағалау бойынша нақты есеп қарастырылады. Есептеу нәтижелері «ақпараттық сипаттама» емес, нақты шешім мен өлшемдер ретінде ұсынылады.

Құжатта 2D LiDAR негізіндегі робот-гид үшін маршрут жоспарлау архитектурасы және адамға қауіпсіз дистанцияны қамтамасыз ететін inflation радиусын таңдау ережесі ұсынылды. A^* статикалық ортада тиімді, ал динамикалық ортада D^* Lite қайта жоспарлау уақытын азайтып, қозғалыстың тұрақтылығын арттырады, зерттеу нәтижелері 3-кестеде көрсетілген.

Кесте 3. Талдау нәтижесі

Нұсқа	r_{infl} (м)	Маршрут табылды	L (м)	T _{plan} (мс)	C_{min} (м)
A	0.55	Иә	17.9	21	0.34
B	0.68	Иә	18.6	23	0.49
C	0.88	Жоқ (дәлізде өтімсіз)	-	-	-

НӘТИЖЕЛЕРДІ ТАЛДАУ

(A) нұсқасында r_{infl} кіші болғандықтан маршрут табылды және қысқа, бірақ $C_{min}=0.34$ м талап етілген 0.45 м-ден төмен, яғни робот адамға тым жақындауы мүмкін. (B) нұсқасында $C_{min}=0.49$ м болып, қауіпсіздік шарты орындалады, ал маршрут табылуы сақталады. (C) нұсқасында ашық зал үшін есептелген r_{infl} өте үлкен болғандықтан тар дәлізде өтетін аймақ жабылып, жоспарлау мүмкін болмайды. Осылайша, бір ғана тұрақты r_{infl} мәнін барлық кеңістікке қолдану тиімсіз екені көрінеді: параметр кеңістік типіне (зал/дәліз) бейімделуі тиіс.

ҚОРЫТЫНДЫ

Робот-гид үшін тиімді радиусын $r_{infl} = r_{robot} + r_{human} + k \cdot \sigma_{loc}$ формуласы арқылы таңдау параметрді сандық негіздеуге мүмкіндік береді. Тәжірибелік салыстыру көрсеткендей, дәліздік режимде $r_{human} \approx 0.40$ м (берілген параметрлерде $r_{infl}=0.68$ м) қауіпсіздік ($C_{min} \geq 0.45$ м) және өтімділік балансын береді. Ашық залдарда r_{human} -ды арттыру орынды, бірақ тар аймақтарда оны локалды түрде төмендету қажет. Бұл бөлім мақалаға авторлық нәтиже ретінде енгізіледі: есеп, шешім, салыстыру және практикалық ұсыныс.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: ЖОҚ
ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ
ХАБАРЛАМА: пайдаланылмаған.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). Introduction to algorithms (3rd ed.). MIT Press.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269–271.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100–107.
- Koenig, S., & Likhachev, M. (2002). D* Lite. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (pp. 476–483).
- Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *International Journal of Robotics Research*, 5(1), 90–98.
- LaValle, S. M. (2006). *Planning algorithms*. Cambridge University Press.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУЛЬДОЗЕРНОГО ОТВАЛА С ВЫСТУПАЮЩИМ СРЕДНИМ НОЖОМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

УДК 621.878.23-14

А.К. Айтказина^{1*}, М.В. Дудкин¹, Б.Қ. Аукенова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Айтказина Аяжан Калелхановна, aaytkazina@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается повышение эффективности процесса копания грунта бульдозерами за счёт совершенствования конструкции рабочего органа — отвала с выступающим средним ножом. Целью исследования является количественная оценка влияния геометрических параметров отвала и свойств грунта на сопротивление копанию и энергоёмкость процесса на основе комплексного аналитического, экспериментального и интеллектуального подходов.

В качестве методов исследования использованы положения механики грунтов, сравнительный анализ традиционных и модернизированных рабочих органов, а также методы обработки экспериментальных данных.

Основные результаты включают сравнительную оценку эффективности традиционного отвала и отвала с выступающим средним ножом при равенстве площадей вырезаемой стружки, введение относительных коэффициентов эффективности и затягивания, а также определение рациональных геометрических параметров и режимов работы. Установлено, что при одинаковых максимальных усилиях копания энергоёмкость процесса может существенно различаться, что подтверждает необходимость учёта полного цикла заглубления рабочего органа.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к анализу процесса копания, сочетающем классические аналитические методы и инструменты искусственного интеллекта, а также в разработке критериев оценки эффективности рабочих органов с изменённой геометрией. Практическая значимость результатов состоит в возможности снижения энергозатрат и повышения производительности землеройных машин.

Ключевые слова: бульдозер, отвал, выступающий средний нож, резание грунтов, форма отвала, призма волочения.

ВВЕДЕНИЕ

Теория копания грунтов рабочими органами землеройных и землеройно-транспортных машин представляет собой сформировавшуюся систему научных знаний, объединяющую положения механики грунтов, теории резания и разрушения связных и сыпучих сред, а также результаты аналитических и экспериментальных исследований процессов взаимодействия рабочего органа с грунтом.

Существенный вклад в развитие данной теории внесён работами отечественных и зарубежных исследователей, в которых предложены расчетные зависимости получены аналитическим и экспериментальным путем и с достаточной точностью описывают количественные характеристики процесса копания грунта бульдозерами, оснащенными отвалами классической формы. При этом в большинстве исследований предполагается универсальность предлагаемых моделей. Однако практический опыт эксплуатации землеройных машин показывает, что наибольшая сходимость расчетных и экспериментальных данных достигается, как правило, лишь для определенных типов грунтов и конкретных геометрических

параметров рабочих органов.

Современные направления развития землеройной техники связаны с поиском конструктивных решений, обеспечивающих снижение энергоёмкости процесса копания. Одним из таких решений являются отвалы с выступающим средним ножом, включая шарнирно-сочленённые конструкции. Их применение позволяет изменить характер стружкообразования, снизить боковые потери грунта и перераспределить силы сопротивления. Однако существующие теоретические подходы, как правило, оценивают процесс копания только по максимальным нагрузкам, не учитывая энергоёмкость по всей траектории заглубления.

Существенным ограничением существующих подходов является то, что процесс копания грунта рабочими органами бульдозеров и других землеройно-транспортных машин циклического действия, как правило, оценивается лишь для конечной, наиболее нагруженной стадии, характеризующейся максимальными силами сопротивления копанию. Такой подход достаточен для определения мощности двигателя и тягового усилия машины, однако не позволяет проводить корректную сравнительную оценку рабочих органов с измененными геометрическими параметрами. При этом нередко оказывается, что при одинаковом максимальном усилии копания энергоёмкость процесса существенно различается для разных конструкций рабочих органов.

К числу таких рабочих органов относятся отвалы бульдозеров с выступающим средним ножом, включая цельные неподвижные конструкции и подвижные шарнирно-сочленённые отвалы, в которых выступающий средний нож формируется за счет косоугольного складывания боковых секций. Несмотря на достаточно широкое промышленное применение, данные конструкции до настоящего времени остаются недостаточно изученными с позиций механики взаимодействия «грунт – рабочий орган» и энергетической эффективности процесса копания (Mohamed и др., 2024; Doudkin и др., 2021; Doudkin и др., 2022).

Промышленные реализации SIGMA-отвалов, представленные ведущими мировыми производителями, подтверждают практическую целесообразность применения выступающего среднего ножа. В частности, отвал SIGMADOZER, представленный компанией Komatsu в 2008 году, стал одной из первых серийных реализаций данной концепции. Его конструкция ориентирована на концентрацию процессов резания и накопления грунта в центральной части отвала (рисунок 1), что приводит к изменению характера формирования стружки и призмы волочения грунта, снижению бокового просыпания и уменьшению сопротивления копанию.

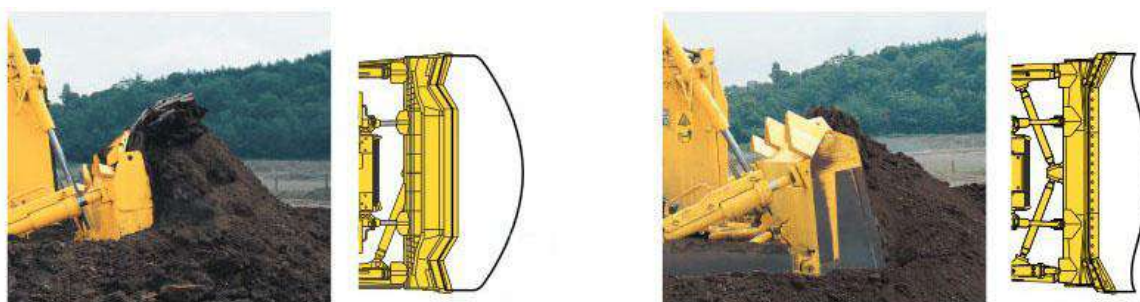


Рисунок 1. Длина призмы волочения отвала: а) SIGMADOZER; б) традиционного

С механической точки зрения повышение эффективности отвала с выступающим средним ножом обусловлено перераспределением горизонтальной и вертикальной

составляющих сопротивления копанию, уменьшением площади контакта стружки грунта с лобовой поверхностью отвала и снижением сил трения при подъеме грунта. Для шарнирно-сочлененных отвалов (рисунок 2) дополнительный эффект достигается за счет приподнимания внешних нижних углов боковых секций, в результате чего основной объем грунта направляется к центральной части отвала.

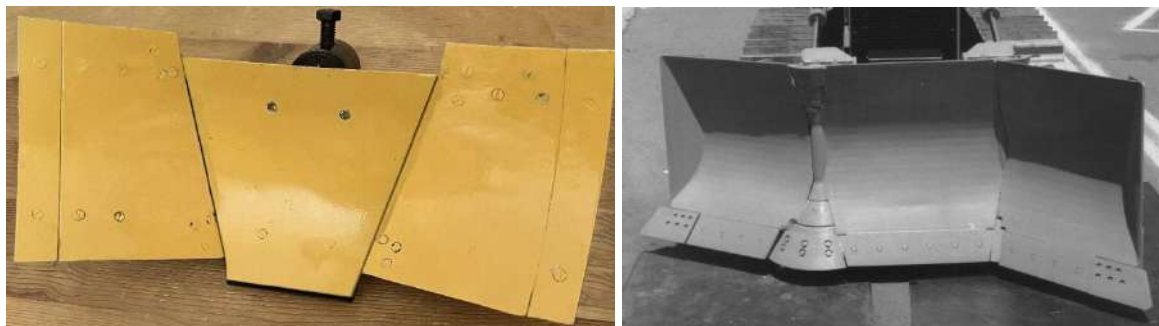


Рисунок 2. Бульдозерные отвалы с шарнирно-сочлененными секциями

Несмотря на наличие отдельных экспериментальных и эксплуатационных данных, в настоящее время отсутствует единый аналитический подход, позволяющий количественно оценить влияние геометрических параметров выступающего среднего ножа, глубины копания и физико-механических свойств грунта на сопротивление копанию и энергоемкость процесса. Недостаточно исследованы также вопросы самозаглубления отвала и устойчивости его работы при различных режимах копания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на основе теоретического анализа и физико-математического моделирования на экспериментальном стенде.

На теоретическом этапе анализа эффективности бульдозера, оборудованного шарнирно-сочлененным отвалом с возможностью преобразования в выступающий средний нож, в качестве показателя можно использовать коэффициент эффективности процесса копания ($K_{\text{эф.коп}}$), отражающий изменение сопротивления грунта копанию при применении нового шарнирно-сочлененного бульдозерного оборудования.

$$K_{\text{эф.коп}} = \frac{\Delta P}{P_T} \quad (1)$$

где,

$$\Delta P = P_T - P_{\text{всн}} \text{ или } K_{\text{эф.коп}} = 1 - \frac{P_{\text{всн}}}{P_T}$$

P_T — функция, определяющая параметр процесса (сопротивление копанию), без наличия интенсифицирующего эффекта;

$P_{\text{всн}}$ — функция, определяющая сопротивление копанию при наличии интенсифицирующего эффекта шарнирно-сочлененного отвала с выступающим средним ножом.

Анализ выполнен на основе положений механики сыпучей среды, обладающей сцеплением, и теории резания грунтов. Грунт в расчетах моделировался как однородная изотропная среда, характеризующаяся следующими основными параметрами: объемным весом, сцеплением, углами внутреннего и внешнего трения. Представляя грунт в виде теоретической модели, используемой в статике сыпучей среды, обладающей сцеплением, величину горизонтальной составляющей сопротивления копанию - P_{01} можно записать в виде функции от влияющих

параметров (Coetzee, 2024).

Многофакторная зависимость исследована методами математического моделирования с использованием разработанного алгоритма определения эффективности процесса копания бульдозера с выступающим средним ножом (ВСН) (рисунок 3). Расчеты позволяют определить рациональные значения коэффициента ширины среднего ножа $K_{ВСН}$ в зависимости от глубины копания и типа грунта.

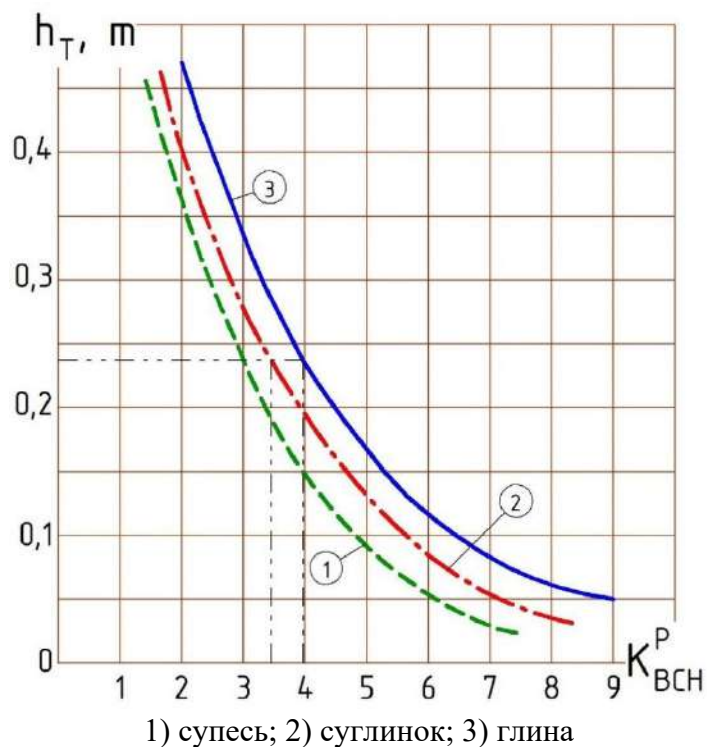


Рисунок 3. Зависимость рациональных значений коэффициента ширины среднего ножа от глубины копания и вида грунта

Это свидетельствует о необходимости уменьшения ширины режущей кромки при увеличении прочности грунта.

Анализ показывает, что $K_{ВСН}$ увеличивается с ростом прочности грунта и глубины копания. Например, при глубине копания 0,25 м для супеси $K_{ВСН} = 3$, а для глины $K_{ВСН} = 4$.

Результаты математического моделирования позволяют определить рациональные параметры выступающего среднего ножа и углы резания для различных грунтов и глубин копания, обеспечивая повышение эффективности процесса.

Экспериментальные исследования рациональной области применения, параметров и режимов работы бульдозера с выступающим средним ножом (ВСН) проводились на стенде физико-математического моделирования рабочих процессов землеройно-транспортных машин в лаборатории кафедры «Дорожные машины» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (рисунок 4) (Doudkin и др., 2021; Doudkin и др., 2022)



Рисунок 4. Процесс стружкообразования: а) с тонкой стружкой грунта ($0,1H_{отв}$); б) При рациональной толщине стружки $0,15 H_{отв}$

Для определения рациональной глубины копания средним ножом проведены эксперименты при глубинах $h_b = 0,1$; $0,15$ и $0,20$ от $H_{отв}$. (рисунок 4). При h_b от $0,1H_{отв}$ до $0,15H_{отв}$ стружка недостаточно прочная, что требует дополнительной энергии. При $h_b = 0,15H_{отв}$ процесс стружкообразования протекает оптимально. Дальнейшее увеличение глубины вызывает рост горизонтальной составляющей сопротивления на 20% , обусловленный усилением резания, при этом путь набора призмы уменьшается, повышая производительность. Рекомендуемая глубина резания ВСН составляет $0,15-0,20 H_{отв}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено следующее:

1. Оптимальная глубина заглубления ВСН составляет $0,15-0,20$ высоты отвала;
2. Удельная работа копания уменьшается за счёт сокращения площади контакта пласта грунта с рабочей поверхностью отвала;
3. Увеличивается объём призмы волочения в центральной части и снижаются боковые потери грунта;
4. Производительность бульдозера возрастает на $10-15\%$ при сохранении устойчивости машины.

Полученные результаты подтверждают, что отвалы с выступающим средним ножом значительно повышают эффективность бульдозерных работ, особенно в условиях плотных грунтов. Снижение сопротивления копанию и увеличение объема перемещаемого материала обусловлены принципиально иной схемой взаимодействия с грунтом, где центральная часть отвала эффективно собирает и перемещает грунт, минимизируя боковые потери. Это контрастирует с поведением традиционных отвалов, для которых потери грунта в боковые валики возрастают с увеличением угла резания.

Важным аспектом является зависимость эффективности от типа грунта. В сыпучих и переувлажненных грунтах применение отвала с выступающим средним ножом может даже увеличить усилие копания по сравнению с традиционными

отвалами, что делает его нерациональным. Однако для плотных связных грунтов наблюдается значительный выигрыш в эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование подтвердило необходимость адаптивного изменения параметров работы отвала (ширины выступающего ножа, глубины копания, угла резания) в зависимости от конкретных грунтовых условий. Было показано, что для каждого типа грунта существуют рациональные диапазоны этих параметров, которые обеспечивают максимальную эффективность. В частности, увеличение глубины копания выше оптимальной (0.15-0.20 высоты отвала) приводит к значительному росту горизонтального сопротивления, что снижает общую производительность.

Преимуществами предложенного решения являются уменьшение сопротивления копанию, рациональное распределение нагрузок и возможность регулирования угла резания. К ограничениям относятся усложнение конструкции шарнирно сочленённого механизма и необходимость точной настройки системы управления.

Дальнейшее изучение и внедрение адаптивных систем управления параметрами отвала, способных оперативно корректировать режимы работы в зависимости от изменяющихся условий, позволит реализовать максимальный потенциал эффективности бульдозеров с выступающим средним ножом.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования, связанные с публикацией, финансируются Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан - грант AP22684640 – «Разработка шарнирно-сочлененной конструкции бульдозерного отвала с разноуровневым изменением геометрии».

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают признательность коллегам за помощь в проведении экспериментов и обработке данных.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Инструменты искусственного интеллекта (ИИ) ChatGPT использовались при редактировании текста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Z. Guo, S. Zhang, L. Ni. A Comprehensive Study on the Mechanical Properties of Bulldozing Plate Soil Engaging Surface Based on the Entropy-Weighted Grey Relational Analysis Method . IEEEAccess, VOLUME 11, 2023, p. 78000-78016 <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.327926>
- Mohamed A.A. Abdeldayem, Mehari Z. Tekeste. Scaling law modeling artificial soil-to-bulldozer blade interaction. Journal of Terramechanics. Volume 116, December 2024, 101001. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2024.101001>
- Doudkin, M., Kim, A., Aukenova, B., Radenkov, R., Saveliev, A., Andryukhov, N. Experimental Studies on the Interaction Process with the Environment of an Adaptable Bulldozer Blade with Variable Geometry. International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol. 15, N. 11, 2021. – P. 554-565. <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i11.21756>
- Doudkin, M., Kim, A., Aukenova, B., Radenkov, R., Saveliev, A., Andryukhov, N. Theoretical investigations of the process of interaction with the environment of a bulldozer blade with variable geometry. Journal of Applied Engineering Science. – Vol.20, No 3, 2022, 986, - p. 798-807. <https://doi.org/10.5937/jaes0-37210>
- ChatGPT - чат гпт <https://chatgpt.com/>

ИНЖЕНЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ВЫБОРА РЕЖИМОВ ПРОКАЛКИ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ СВИНЦОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 669.4:669.5:66.061.34:004.8

Ә.Е. Алпысов^{1*}, Р.А. Рамазанова¹

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

*Автор-корреспондент: Алпысов Әсер Ержанұлы, e-mail: aser.alpysov@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Рассмотрен подход к инженерной поддержке выбора режимов прокатки цинксодержащих продуктов свинцового производства, ориентированный на повышение эффективности их последующей гидрометаллургической переработки. Показано, что выбор режима не может основываться на одном параметре, поскольку температура, продолжительность выдержки, газовая среда и степень теплового воздействия совместно влияют на фазовое состояние материала, его реакционную способность и поведение при выщелачивании. Цель работы — обосновать структуру инженерной поддержки принятия решений при выборе рациональных режимов прокатки. Практическая значимость состоит в возможности повышения устойчивости последующего выщелачивания, улучшения извлечения цинка и снижения технологических рисков при переработке вторичных и промежуточных продуктов свинцового производства.

Ключевые слова: цинксодержащие продукты, свинцовое производство, прокатка, термическая подготовка, гидрометаллургия цинка, инженерная поддержка, выбор режима.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях металлургические предприятия все чаще вовлекают в переработку промежуточные и вторичные цинксодержащие продукты свинцового производства, характеристики которых отличаются высокой изменчивостью. Такие материалы содержат цинк в различных химических и минеральных формах, а также примесные компоненты, существенно влияющие на поведение продукта при последующей гидрометаллургической переработке. По этой причине этап термической подготовки приобретает определяющее значение для формирования технологических свойств материала.

Прокатка рассматривается как способ управляемого изменения фазового состава, удаления или перераспределения отдельных компонентов и повышения реакционной способности материала. Вместе с тем выбор режима представляет собой сложную инженерную задачу: избыточное тепловое воздействие может вызвать уплотнение структуры и образование труднорастворимых фаз, а недостаточная обработка - не обеспечить требуемого изменения свойств материала [1].

На эффективность прокатки одновременно влияют химический состав продукта, содержание серы, железа, свинца и других примесей, размер частиц, температура обработки, длительность выдержки и характер окислительной среды. Следовательно, решение о выборе режима должно приниматься на основе комплексной оценки технологических данных.

В инженерной практике это требует перехода от эмпирического выбора режимов к более аналитически обоснованному подходу. Под инженерной поддержкой в данной работе понимается использование данных о свойствах продукта и параметрах термической обработки для прогноза состояния прокатанного материала и выбора режима, обеспечивающего благоприятные условия последующего

выщелачивания [1].

Целью статьи является обоснование подхода к инженерной поддержке выбора режимов прокалки цинксодержащих продуктов свинцового производства. Для достижения поставленной цели рассмотрены основные факторы, определяющие результат термической подготовки, выделены группы параметров для анализа и предложена концептуальная схема поддержки принятия решений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются цинксодержащие продукты свинцового производства, предназначенные для дальнейшей гидрометаллургической переработки. Предметом выступают подходы к выбору рациональных режимов прокалки, обеспечивающих формирование технологически благоприятных свойств материала для последующего выщелачивания.

Методологической основой работы является системный анализ процесса термической подготовки как многопараметрической инженерной системы. В исследовании использован аналитический подход, включающий выделение факторов, оказывающих влияние на результат прокалки, и структурирование входных и выходных параметров, значимых для последующего выбора режима [2].

При построении схемы инженерной поддержки исходили из того, что исходное состояние продукта должно описываться через совокупность информативных характеристик: содержание цинка, свинца, железа, серы и других примесей, фазовый состав, гранулометрические особенности, влажность и признаки неоднородности. Эти параметры определяют реакционную способность материала и его чувствительность к тепловому воздействию.

К основным управляемым параметрам прокалки отнесены температура, продолжительность выдержки, скорость нагрева, интенсивность газообмена и характер окислительной среды. Именно сочетание указанных факторов определяет степень превращения исходных фаз, изменение пористости, снижение содержания нежелательных компонентов и формирование состояния материала, пригодного для эффективного выщелачивания.

В качестве выходных характеристик рассматриваются фазовый состав прокаленного продукта, изменение реакционной способности материала, ожидаемая извлекаемость цинка, поведение примесей в последующей гидрометаллургической стадии и риск образования труднорастворимых соединений. Такое представление позволяет перейти от формального контроля температуры и времени к оценке технологического качества получаемого продукта [2].

Предлагаемый подход к инженерной поддержке включает последовательность этапов: сбор данных о свойствах исходного материала, выбор предварительного диапазона режимов, аналитическую оценку ожидаемого результата, сопоставление альтернативных режимов и формирование рекомендаций для технолога. В дальнейшем указанная схема может быть дополнена инструментами интеллектуального анализа данных и прогнозирования [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ задачи показал, что выбор режима прокалки следует рассматривать как элемент общей технологической цепочки подготовки материала к выщелачиванию. Качество прокаленного продукта определяется не только достижением целевой температуры, но и тем, какие структурные и фазовые изменения произошли в материале и насколько они способствуют дальнейшему извлечению цинка.

С инженерной точки зрения основная трудность состоит в необходимости согласовать два требования: обеспечить трансформацию исходного продукта, снижение влияния нежелательных компонентов и повышение доступности цинка, но

при этом не вызывать образование плотных или труднорастворимых фаз. Следовательно, рациональный режим является компромиссом между глубиной термического воздействия и сохранением благоприятной реакционной способности материала [4].

Для повышения обоснованности выбора режимов целесообразно структурировать параметры процесса по их роли в инженерной оценке. Такая группировка представлена в таблице 1.

Таблица 1. Основные группы параметров для выбора режимов прокалки

Группа параметров	Содержание	Роль в инженерной оценке
Характеристики исходного продукта	Содержание Zn, Pb, Fe, S; фазовый состав; гранулометрия; влажность; неоднородность	Определяют чувствительность материала к тепловому воздействию и диапазон допустимых режимов
Параметры прокалки	Температура, время выдержки, скорость нагрева, газовая среда, интенсивность теплообмена	Формируют условия фазовых превращений и степень изменения реакционной способности продукта
Состояние прокаленного материала	Изменение фазового состава, пористости, содержания нежелательных компонентов, склонности к уплотнению	Позволяют оценить пригодность материала к последующему выщелачиванию
Ожидаемый технологический эффект	Предполагаемая извлекаемость цинка, поведение примесей, устойчивость гидрометаллургического режима	Является критерием выбора рационального варианта прокалки

Представленная структура показывает, что выбор режима прокалки должен основываться на сопоставлении свойств исходного продукта и ожидаемого результата термической обработки. Принципиально важно, что одинаковые по температуре режимы могут приводить к различному технологическому эффекту в зависимости от исходного состава и состояния материала. По этой причине инженерная поддержка не должна ограничиваться контролем заданных параметров нагрева; она должна обеспечивать интерпретацию того, каким будет состояние продукта после прокалки и насколько оно соответствует требованиям последующего выщелачивания.

В прикладном контуре такая поддержка может быть реализована по следующей логике: данные о свойствах исходного продукта используются для предварительной оценки чувствительности материала к термической обработке, затем анализируются альтернативные режимы прокалки, после чего прогнозируется их влияние на фазовый состав и поведение продукта в гидрометаллургическом переделе. Далее формируется рекомендация по выбору наиболее рационального варианта [4].

Особое значение имеет учет влияния прокалки на последующее выщелачивание. Именно эта стадия выступает главным критерием технологической успешности термической подготовки. Если режим прокалки выбран корректно, повышается доступность цинка для растворения, снижается вероятность накопления нежелательных фаз и создаются более стабильные условия для гидрометаллургического извлечения. Если же режим подобран нерационально, возрастает риск ухудшения кинетики выщелачивания, увеличения остаточного содержания цинка в твердом остатке и осложнения режима очистки растворов [5].

Практическая ценность инженерной поддержки выбора режимов прокалки состоит также в возможности систематизации опыта предприятия. По мере накопления данных формируется база знаний о связи между типом продукта, режимом термической обработки и результатами последующего выщелачивания, что в дальнейшем может стать основой для внедрения цифровых рекомендательных систем.

Следовательно, инженерная поддержка выбора режимов прокалки должна рассматриваться как важный элемент общей стратегии повышения эффективности переработки цинкосодержащих продуктов свинцового производства. Ее внедрение позволяет увязать стадию термической подготовки не только с текущими параметрами печного процесса, но и с конечным результатом гидрометаллургического передела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье обоснован подход к инженерной поддержке выбора режимов прокалки цинкосодержащих продуктов свинцового производства. Показано, что эффективность термической подготовки определяется совокупным влиянием свойств исходного материала и параметров теплового воздействия, а потому выбор режима должен базироваться на комплексной оценке технологических данных.

Установлено, что рациональный режим прокалки следует рассматривать через его влияние на состояние получаемого продукта и условия последующего выщелачивания. Основными критериями инженерной оценки являются изменение фазового состава, реакционная способность материала, вероятность образования труднорастворимых соединений, ожидаемая извлекаемость цинка и поведение примесей в гидрометаллургической стадии [6].

Практическая значимость предложенного подхода заключается в возможности повышения обоснованности технологических решений, улучшения воспроизводимости результатов прокалки и создания предпосылок для более устойчивого гидрометаллургического извлечения цинка. Перспективы дальнейших исследований связаны с наполнением модели реальными технологическими данными и сравнением альтернативных режимов [7].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ. Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы автора.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность за консультационную поддержку при подготовке исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке рукописи использовались инструменты искусственного интеллекта для языкового редактирования и структурирования текста. Окончательная научная интерпретация и ответственность за содержание статьи принадлежат авторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Antropova, I. G., Gulyashinov, P. A., Budaeva, A. D., Dashiev, I. P., & Khomoksonova, D. P. (2024). Processing of Oxidized Lead–Zinc Ore by Co-Roasting with Pyrite-Bearing Ore. *Minerals*, 14(12), 1241.

<https://doi.org/10.3390/min14121241>

Ye, L., Song, S., Yang, S., Chen, Y., & others. (2023). The recovery of valuable components from secondary lead dust by a multi-step hydrometallurgical process. *Hydrometallurgy*, 222(3), 106186.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106186>

Sari, Z. A., Karaca, M., & others. (2024). Greener and Sustainable Production: Production of Industrial Zinc (II) Acetate Solution and Recovery of Some Metals (Zn, Pb, Ag) from Zinc Plant Residue by Ultrasound-Assisted Leaching. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 10(3).

<https://doi.org/10.1007/s40831-024-00879-2>

Xu, Y., Xia, H., Liu, J., Pei, Q., Lu, Z., Zhang, Q., & Zhang, L. (2022). Efficient recovery of valuable metals from lead-zinc smelting by-products by ultrasonic strengthening. *Minerals Engineering*, 190, 107915.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107915>

Ma, A., Li, J., Liu, J., Pei, Q., Lu, Z., Zhang, Q., & Zhang, L. (2024). Mechanism Analysis and Experimental Research on Leaching Zn from Zinc Oxide Dust with an Ultrasound-Enhanced NH₃–NH₄Cl–H₂O System. *Sustainability*, 16(7), 2901.

<https://doi.org/10.3390/su16072901>

Niu, D., Zhang, Y., Wang, X., & others. (2022). Optimization control of hydrometallurgical leaching process based on IDE-MPC. *Minerals Engineering*, 176, 107341.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107341>

Huang, J., & Yang, X. (2024). Oxygen-assisted zinc recovery from electric arc furnace dust using magnesium chloride. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 31.

<https://doi.org/10.1007/s12613-024-2837-4>

OpenAI. ChatGPT [Большая языковая модель]. 2026. URL: <https://chatgpt.com/>

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НА ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

УДК 669:66.061.34:004.8

А.А. Алпысова^{1*}, Р.А. Рамазанова¹

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

*Автор-корреспондент: Алпысова Айдана Айбекқызы,
e-mail: alpysovaaidana.23@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Рассмотрен подход к интеллектуальной поддержке управления процессами выщелачивания на гидрометаллургических предприятиях в условиях изменчивости сырья и нестабильности технологических параметров. Показано, что результат процесса определяется совместным влиянием химического и фазового состава сырья, гранулометрии, температуры, кислотности, продолжительности контакта фаз, расхода реагентов и содержания примесей. Цель работы — обосновать возможность применения методов искусственного интеллекта для поддержки инженерных решений при управлении выщелачиванием. Предложена концептуальная схема, в которой данные о свойствах сырья и параметрах режима используются для прогноза состояния процесса, раннего выявления неблагоприятных тенденций и формирования рекомендаций по корректировке режима. Практическая значимость заключается в создании цифрового инструмента поддержки технолога, направленного на повышение стабильности выщелачивания, снижение потерь металла и улучшение качества технологических растворов.

Ключевые слова: ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЯ, ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ, ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ.

ВВЕДЕНИЕ

Гидрометаллургические процессы относятся к сложным инженерным системам, эффективность которых определяется совместным воздействием множества факторов. На показатели выщелачивания влияют химический и минералогический состав сырья, степень раскрытия фаз, гранулометрия, соотношение твердой и жидкой фаз, температура, кислотность среды и продолжительность процесса. Даже небольшие отклонения по нескольким параметрам способны изменить кинетику растворения, состав технологических растворов и степень извлечения целевого компонента [1].

Для современных гидрометаллургических предприятий характерна возрастающая изменчивость сырьевой базы. В переработку вовлекаются материалы с различным содержанием основного металла, примесей и труднорастворимых фаз, что повышает требования к оперативности управления. Традиционные подходы, основанные на усредненных режимах и опыте технолога, остаются необходимыми, однако при высокой вариабельности сырья их адаптационный потенциал ограничен.

Поэтому особую актуальность приобретает переход от реактивного управления к предиктивному. Такой подход предполагает использование технологических данных для прогноза поведения системы, выявления скрытых закономерностей и формирования рекомендаций по корректировке режима. Для гидрометаллургии это важно, поскольку технологический результат определяется сложной комбинацией характеристик сырья и условий процесса [1].

Целью настоящей статьи является обоснование подхода к интеллектуальной

поддержке управления процессами выщелачивания на гидрометаллургических предприятиях. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: выделены инженерные особенности процесса, затрудняющие оперативное управление; определены группы факторов, формирующих поведение системы; предложена структура входных и выходных данных для интеллектуальной модели; разработана концептуальная схема поддержки принятия решений в технологическом контуре.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются процессы выщелачивания на гидрометаллургических предприятиях, а предметом - подходы к их интеллектуальной поддержке на основе анализа технологических данных. Методологическую основу составили системный анализ, инженерная декомпозиция процесса на группы значимых переменных и логико-структурное моделирование контура поддержки принятия решений.

При построении концепции интеллектуальной поддержки исходили из того, что процесс выщелачивания может быть описан через совокупность входных и выходных параметров. К входным переменным относятся характеристики сырья - содержание основного металла, примесей, минералогические особенности, гранулометрический состав, реакционная способность материала, а также параметры режима: температура, кислотность, продолжительность выщелачивания, соотношение Т:Ж, расход реагентов и интенсивность перемешивания. В качестве выходных параметров рассматриваются степень извлечения, концентрация целевого компонента в растворе, содержание примесей в технологическом растворе, состояние твердого остатка и устойчивость процесса на последующих переделах [2].

С инженерной точки зрения интеллектуальная поддержка включает сбор и структурирование данных, их очистку и нормализацию, выбор информативных признаков, построение и валидацию модели, интерпретацию прогноза и формирование рекомендаций. В качестве аналитического аппарата могут применяться регрессионные модели, деревья решений, ансамблевые алгоритмы, нейросетевые подходы, методы кластеризации и классификации.

Принципиально важным является требование инженерной интерпретируемости. Для промышленного применения недостаточно получить математически точный прогноз; необходимо, чтобы результат был понятен технологу, соотнесен с физико-химической природой процесса и допускал оперативное использование в реальном режиме работы. По этой причине предложенный подход ориентирован не на замену специалиста алгоритмом, а на создание цифрового инструмента, усиливающего возможности технологического анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ процесса выщелачивания как объекта управления показывает, что его главная особенность заключается в сочетании изменчивости сырья и нелинейности технологического отклика системы. Одинаковые на первый взгляд режимные параметры не всегда обеспечивают одинаковый результат, поскольку исходный материал может существенно различаться по фазовому составу, степени окисленности, содержанию примесных компонентов и реакционной способности. Следовательно, эффективное управление должно учитывать не только текущие режимные параметры, но и свойства поступающего сырья [3].

Ключевая задача управления состоит в том, чтобы определить вероятность неблагоприятного отклонения до того, как технологические потери станут выраженными. Методы искусственного интеллекта могут использоваться для прогноза степени извлечения, оценки качества технологического раствора, раннего

предупреждения и классификации сырья по ожидаемому технологическому поведению. Практически это означает переход к схеме, в которой анализ данных опережает корректировку режима.

Если модель фиксирует сочетание характеристик сырья и параметров режима, связанное с риском снижения извлечения, ухудшения состава раствора или роста нагрузки на последующие стадии очистки, система формирует предупреждение и предлагает варианты корректирующего воздействия. В этом случае искусственный интеллект не заменяет инженера-технолога, а повышает скорость и обоснованность принимаемого решения [3].

Таблица 1. Основные группы параметров для интеллектуальной поддержки управления выщелачиванием

Группа параметров	Содержание	Управленческая ценность
Характеристики сырья	Содержание основного металла, примесей, фазовый состав, гранулометрия, реакционная способность	Позволяют оценить ожидаемое технологическое поведение материала
Параметры режима	Температура, кислотность, продолжительность, соотношение Т:Ж, расход реагентов, перемешивание	Определяют возможность корректировки процесса в реальном времени
Контрольные показатели	Концентрация металла в растворе, содержание примесей, состояние твердого остатка	Характеризуют текущее состояние процесса и качество промежуточного продукта
Рекомендации системы	Изменение режима, усиление контроля, перераспределение потоков сырья	Поддерживают технолога при выборе обоснованного решения

Представленная структура показывает, что интеллектуальная модель должна объединять информацию о свойствах сырья, фактических параметрах режима и контрольных показателях процесса. Только в этом случае прогноз приобретает инженерную ценность и может быть использован в реальном контуре управления. Если аналитический модуль работает только с лабораторными характеристиками сырья или только с параметрами режима, без учета их совместного влияния, его рекомендации будут носить ограниченный характер [4].

Предлагаемая логика работы интеллектуальной поддержки представлена на рисунке 1. В ней данные о сырье и текущих параметрах режима поступают в аналитический модуль, который выполняет оценку состояния процесса и формирует прогноз вероятного технологического результата. На основании прогноза система выдает рекомендации по корректировке режима, а окончательное решение принимается инженером-технологом с учетом текущей производственной ситуации и ограничений предприятия.



Рисунок 1. Концептуальная схема интеллектуальной поддержки управления процессами выщелачивания

Практическая значимость интеллектуальной поддержки управления выщелачиванием заключается в возможности повысить устойчивость процесса при изменении характеристик сырья, снизить потери металла, сократить избыточный расход реагентов и уменьшить частоту внеплановых корректировок режима. Дополнительный эффект связан с накоплением цифровых знаний о поведении системы, что создает основу для предиктивного мониторинга и цифровых двойников.

Вместе с тем внедрение подобных решений сопряжено с рядом ограничений. Качество прогноза напрямую зависит от полноты и достоверности исходных данных, согласованности измерений и наличия цифрового описания технологического процесса. Второе ограничение связано с интерпретируемостью моделей: в промышленной практике важно не только получить прогноз, но и понимать, какие факторы привели к нему. Третьим условием является междисциплинарное взаимодействие металлургов, специалистов по автоматизации и аналитиков данных. Без такой кооперации даже точная математическая модель может остаться вне реального производственного контура [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен подход к интеллектуальной поддержке управления процессами выщелачивания на гидрометаллургических предприятиях. Показано, что специфика этих процессов определяется многопараметричностью, изменчивостью сырьевой базы и нелинейным влиянием отдельных факторов на технологический результат. В таких условиях традиционное управление нуждается в дополнении инструментами предиктивного анализа и цифровой поддержки принятия решений.

Установлено, что методы искусственного интеллекта могут использоваться для прогнозирования технологических показателей, раннего выявления неблагоприятных тенденций, классификации сырья по технологическому поведению и формирования рекомендаций по корректировке режима. Предложенная структура входных и выходных параметров формирует основу для последующей разработки прикладных интеллектуальных систем в гидрометаллургии [5].

Практическая ценность предложенного подхода состоит в возможности повышения устойчивости процесса, снижения потерь металла и улучшения качества технологических растворов. Дальнейшие исследования связаны с формированием репрезентативной базы данных, выбором интерпретируемого алгоритмического аппарата и верификацией моделей в реальных производственных условиях [5].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы автора.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает признательность научному руководителю за консультационную поддержку.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке рукописи использовались инструменты искусственного интеллекта для структурирования текста и языкового редактирования. Окончательная научная интерпретация и ответственность за содержание статьи принадлежат автору.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Niu, D., Liu, X., Liu, Y., & Jia, M. (2022). Optimization control of hydrometallurgical leaching process based on IDE-MPC. *Minerals Engineering*, 176, Article 107341.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107341>

McCoy, J. T., & Auret, L. (2019). Machine learning applications in minerals processing: A review. *Minerals Engineering*, 132, 95–109.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.004>

Dong, S., Zhang, S., Xu, J., & others. (2023). Intelligent Hybrid Modeling of Complex Leaching System in Zinc Hydrometallurgy Processes. *Systems*, 11(2), Article 78.

<https://doi.org/10.3390/systems11020078>

Niu, B., Jin, Y., Tan, Q., Li, J., & Zeng, X. (2023). Application of machine learning to guide efficient metal leaching from spent lithium-ion batteries. *Journal of Cleaner Production*, 402, Article 136965.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136965>

Estay, H., Lois-Morales, P., Montes-Atenas, G., & Ruiz del Solar, J. (2023). On the Challenges of Applying Machine Learning in Mineral Processing and Extractive Metallurgy. *Minerals*, 13(6), Article 788.

<https://doi.org/10.3390/min13060788>

OpenAI. (2024). ChatGPT.

<https://chatgpt.com/>

АНАЛИЗ ИНТЕРВАЛОВ ДВИЖЕНИЯ НА ГОРОДСКИХ АВТОБУСНЫХ МАРШРУТАХ Г. УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА

УДК 656.072

М.М. Альгужинова^{1*}, В.Н. Вдовин¹, А.Х. Машекенова¹

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

*Автор-корреспондент Альгужинова Мадина Мураткызы,

madinalguzhinova@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В исследовании рассматриваются возможности аналитического обоснования рационального интервала движения городских автобусов на основе данных товарищества с ограниченной ответственностью «Центр управления пассажирскими перевозками г. Усть-Каменогорска» (ТОО «ЦУПП»), включая сведения о фактическом выпуске, регулярности движения, GPS-наблюдении и параметрах маршрутов. Теоретическая база исследования построена на положениях транспортной науки, согласно которым интервал движения является интегральным показателем качества обслуживания, связанным со временем ожидания пассажиров, регулярностью сообщения, производительностью подвижного состава и эксплуатационными затратами. Эмпирическую основу составили данные ТОО «ЦУПП» по перевозчикам города, включающие протяженность маршрутов, плановый и фактический выпуск автобусов, а также фактические интервалы движения по рабочим и выходным дням.

Ключевые слова: автобусный маршрут, интервал движения, регулярность движения, цифровая диспетчеризация.

ВВЕДЕНИЕ

Рациональный интервал движения относится к числу базовых параметров работы городского пассажирского транспорта. Его величина определяет продолжительность ожидания на остановочных пунктах, доступность перевозок, условия использования вместимости автобусов и общий уровень надежности маршрутной сети. В исследованиях по организации городских пассажирских перевозок интервал движения рассматривается не как самостоятельная временная величина, а как показатель, отражающий совокупное влияние технических, организационных, экономических и социальных параметров перевозочного процесса. При чрезмерно большом интервале общественный транспорт теряет привлекательность, а при необоснованном малом - возрастает себестоимость перевозок и ухудшается экономическая устойчивость работы на линии.

Для г. Усть-Каменогорска данная проблема имеет прикладной характер. По материалам ТОО «ЦУПП», в городскую транспортную систему вовлечены 11 перевозчиков, ежедневно на линию выходит более 220 автобусов, 41 микроавтобус и 7 трамваев. ТОО «ЦУПП» осуществляет централизованное диспетчерское сопровождение перевозочного процесса, контроль интервалов движения, мониторинг регулярности и анализ эксплуатационных показателей. Это создает основу для перехода от формального расписания к фактической оценке устойчивости работы маршрутной сети и к более обоснованному определению рационального интервала движения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологическая основа исследования объединяет системный, процессный, статистический, расчетно-аналитический и оптимизационный подходы. Системный подход позволяет рассматривать автобусный маршрут как элемент городской транспортной системы, зависящий от состояния улично-дорожной сети, организации движения, пассажирского спроса и диспетчерского регулирования. Процессный подход ориентирует анализ на последовательность операций перевозочного процесса: выпуск автобусов, выполнение рейсов, посадку и высадку пассажиров, простои на конечных пунктах и корректирующее регулирование в течение смены. Статистический подход применяется для изучения фактических интервалов, регулярности, времени оборота и различий по дням недели. Оптимизационный подход необходим для выбора такого интервала, который обеспечивает приемлемое ожидание пассажиров и рациональное использование подвижного состава.

Эмпирическая база включает данные по основным перевозчикам города, значения планового и фактического выпуска, протяженности маршрутов и фактических интервалов движения. Базовые расчетные зависимости, использованные в статье, имеют следующий вид.

$$I = \frac{T_{об}}{A}, \quad (1)$$

где I - интервал движения, мин; $T_{об}$ - время полного оборота автобуса, мин; A - фактическое количество автобусов, работающих на маршруте.

$$T_{об} = \frac{2L}{v_э + t_{к1} + t_{к2}}, \quad (2)$$

где L - длина маршрута в одном направлении, км; $v_э$ - эксплуатационная скорость, км/ч; $t_{к1}$ и $t_{к2}$ - простои на конечных остановочных пунктах.

$$t_{ож} = \frac{I}{2} + \frac{\sigma^2}{2I} \quad (3)$$

где $t_{ож}$ - среднее время ожидания пассажира, мин; I - средний интервал движения, мин; σ - среднеквадратическое отклонение фактических интервалов. Формула показывает, что качество обслуживания зависит не только от среднего интервала, но и от устойчивости его соблюдения.

Таким образом, интервал движения в расчетной и прикладной постановке является производной характеристикой от времени оборота, числа автобусов на линии и степени неравномерности движения. Следовательно, его оптимизация должна опираться не на один признак, а на совокупность факторов, имеющих прямое влияние на качество обслуживания и эффективность эксплуатации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных по рабочим дням показывает, что по маршрутной сети г. Усть-Каменогорска наблюдаются существенные колебания величин интервалов движения. Суммарный плановый выпуск по автобусным маршрутам составил 231 автобус, фактический - 211, общий коэффициент выпуска - 91,34 %. При этом средний

интервал по совокупности маршрутов равен 37,96 мин, медианный - 22,0 мин, а максимальный достигает 151 мин. Уже эта совокупность значений указывает на то, что сеть сочетает маршруты с частым сообщением и направления с редким, а иногда и слабо устойчивым обслуживанием.

Для более детального рассмотрения причин таких различий целесообразно перейти к анализу работы отдельных перевозчиков. На примере ТОО «РОСТ» ниже на рисунке 1 предоставлено сравнение планового и фактического выпуска автобусов по маршрутам в рабочие дни, что позволяет оценить уровень выполнения плановых показателей по каждому маршруту и выявить направления с отклонениями фактического выпуска от запланированного.

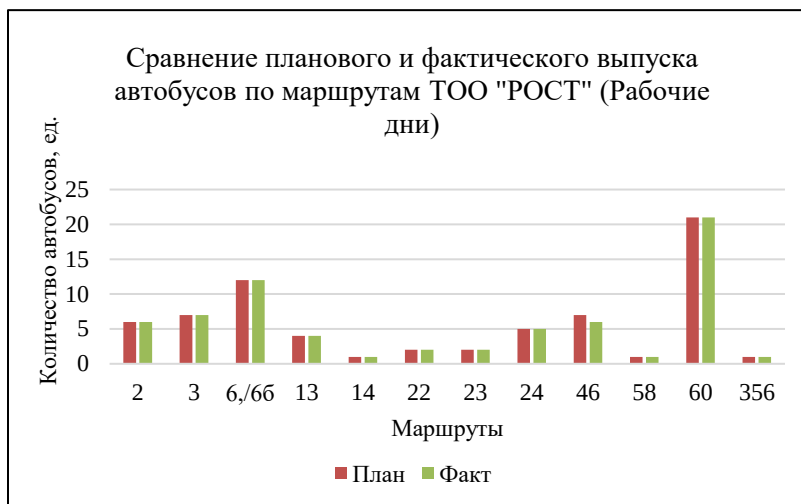


Рисунок 1. Плановый и фактический выпуск автобусов по городским маршрутам в рабочие дни ТОО «РОСТ»

Как видно на рисунке этот перевозчик показывает наиболее устойчивые результаты по рабочим дням, а именно выпуск составляет 98,55 %, а основное отклонение связано только с маршрутом 46. На маршруте 60 при фактическом выпуске 21 автобус интервал составляет 5,5 мин, тогда как маршруты, обслуживаемые одной машиной, имеют интервалы 41–112 мин. Так же у ТОО «Вебас» плановый и фактический выпуск совпадают полностью по всем трем маршрутам, однако даже при устойчивом выпуске маршрут 8 с четырьмя автобусами имеет интервал 33 мин, а маршрут 1 с восемью автобусами - 11 мин.

Промежуточное положение занимает ТОО «Марат-М». В рабочие дни общий выпуск составляет 97,73 %, а единственное заметное отклонение связано с маршрутом 38. При этом зависимость между числом автобусов и интервалом прослеживается отчетливо: маршрут 47 при 12 автобусах обслуживается с интервалом 7 мин, тогда как маршруты 26 и 43а при пяти автобусах имеют интервалы 39 и 32 мин. Различие между этими маршрутами показывает, что на величину интервала влияет не только число автобусов, но и особенности схемы движения, длина рейса и условия эксплуатации маршрута.

Наиболее проблемными по выполнению выпуска являются ТОО «VoSca» и ТОО «RTT GROUP». Для ТОО «VoSca» характерны значительные расхождения между плановым и фактическим выпуском: при рабочем выпуске 53 автобуса против 67 по плану общий уровень выпуска составляет 79,10 %. В результате маршруты с одним-двумя автобусами работают с интервалами 74,25 и 95 мин, тогда как маршрут 12 при двенадцати автобусах имеет интервал 11 мин. Аналогичная зависимость наблюдается у ТОО «RTT GROUP»: при 7 автобусах на маршруте 25П интервал

составляет 21 мин, при 4 автобусах на маршруте 4П - 44 мин, а при 2 автобусах на маршруте 27П - 71 мин. Эти данные показывают, что ухудшение частоты сообщения связано как с недовыпуском, так и с недостаточным числом автобусов, изначально закреплённых за отдельными маршрутами.

Для анализа были отобраны маршруты ТОО «РОСТ», по которым наиболее отчётливо прослеживаются различия в эксплуатационных показателях. Выбор именно этих маршрутов обусловлен их показательностью с точки зрения сопоставления протяжённости, фактического числа автобусов на линии и интервала движения.

Формирование интервала движения автобусов определяется рядом факторов, к числу которых относятся время оборотного цикла, эксплуатационная скорость и фактический выпуск подвижного состава на линию. Согласно классическим представлениям, протяжённость маршрута способна влиять на время оборота автобусов, а через него и на интервал движения. Однако для подтверждения или опровержения данной зависимости необходим статистический анализ. В связи с этим для оценки тесноты связи между исследуемыми показателями использован коэффициент линейной корреляции Пирсона, который рассчитывается по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

где: x_i — значения первого признака; y_i — значения второго признака; $\bar{x}$, $\bar{y}$ — средние значения; n — число наблюдений; r_{xy} — коэффициент корреляции.

Значение коэффициента корреляции изменяется в пределах от -1 до $+1$, где положительные значения указывают на прямую связь, отрицательные — на обратную, а значения, близкие к нулю, свидетельствуют об отсутствии выраженной линейной зависимости между признаками.

Таблица 1. Основная аналитическая таблица по рабочим дням недели организации ТОО «РОСТ»

Рабочие дни					
Организация	ТОО «РОСТ»				
Маршрут	Кол-во автобусов		Выпуск, %	Протяженность, км	Интервал движения, мин
	План	Факт			
2	6	6	100	17,7	22
3	7	7	100	8	8,5
6, 6б	12	12	100	17,5	11
13	4	4	100	10,4	19,5
14	1	1	100	13	97,5
22	2	2	100	8,5	32
23	2	2	100	8,3	31
24	5	5	100	12,4	18,6
46	7	6	85,71	7,7	9,6
58	1	1	100	5,5	41
60	21	21	100	15,2	5,5
356	1	1	100	14,9	112
Итого	69	68	98,55		

По данным таблицы 1 коэффициент корреляции между протяжённостью маршрута и интервалом движения составил $r = 0,127$, что указывает на слабую прямую связь. Следовательно, зависимость интервала движения от протяжённости маршрута выражена незначительно.

Для дополнительной оценки зависимости между протяжённостью маршрута и интервалом движения был использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Применение данного показателя обусловлено тем, что он позволяет выявить монотонную связь между признаками и менее чувствителен к выбросам и неоднородности выборки по сравнению с линейным коэффициентом корреляции. Расчёт коэффициента Спирмена выполнялся по формуле:

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (5)$$

где d_i — разность рангов двух сопоставляемых признаков, n — число наблюдений. По результатам расчёта получено значение $r_s = -0,021$, что указывает на отсутствие заметной монотонной связи между протяжённостью маршрута и интервалом движения. Это подтверждает, что величина интервала определяется не столько длиной маршрута, сколько эксплуатационными характеристиками его обслуживания.

Далее, на рисунке 2, диаграмма наглядно подтверждает результаты корреляционного анализа по Пирсону и Спирмену. Визуально видно, что с увеличением протяжённости маршрута интервал движения не возрастает пропорционально и устойчиво. У маршрутов близкой длины наблюдаются разные интервалы движения, что свидетельствует о слабой зависимости между данными показателями. Следовательно, протяжённость маршрута не может рассматриваться как главный фактор, определяющий интервал движения автобусов.

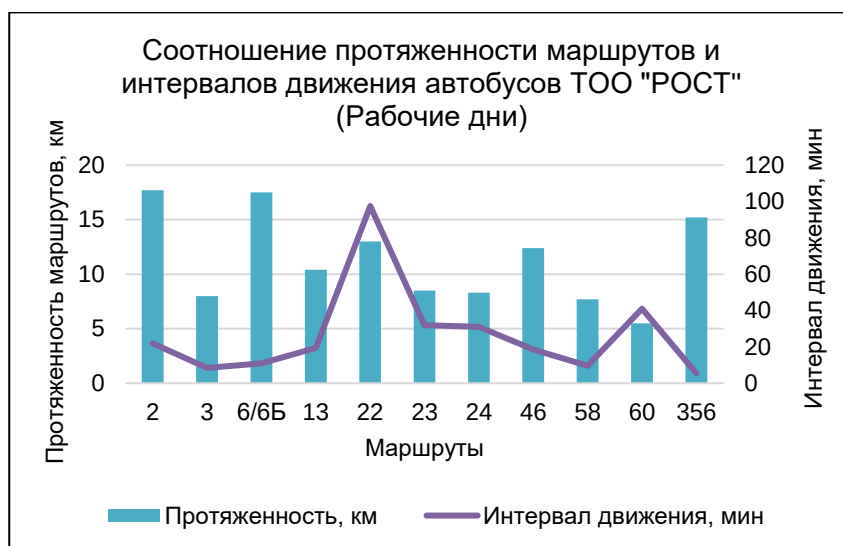


Рисунок 2. Плановый и фактический выпуск автобусов по городским маршрутам в рабочие дни ТОО «РОСТ»

Содержательно полученные результаты согласуются с теоретическими положениями и выводами ранее выполненных исследований в области организации

пассажирских перевозок. Современные исследования показывают, что интервал необходимо определять с учетом времени ожидания пассажиров, надежности движения, соответствия пассажиропотоку, экономических ограничений и места маршрута в общей структуре городской сети. Для г. Усть-Каменогорска это означает, что практический переход к рациональному интервалу должен опираться на цифровые данные диспетчерского контроля, а также на регулярную переоценку маршрутов, где наблюдается либо повторяющийся недовыпуск, либо чрезмерно редкое сообщение при формальном выполнении плана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что определение рационального интервала движения на городских автобусных маршрутах должно основываться на фактических эксплуатационных данных, а не только на нормативных или расчётных признаках. Для г. Усть-Каменогорска ключевыми факторами выступают фактическое количество автобусов на линии, устойчивость выполнения выпуска, параметры времени оборота и различия по дням недели. Установлено, что связь между длиной маршрута и интервалом движения является слабой, тогда как зависимость между фактическим выпуском и интервалом выражена значительно отчётливее. Наиболее устойчивые показатели зафиксированы у ТОО «РОСТ» и ТОО «Вебас», наиболее проблемные — у ТОО «VoSca» и ТОО «RTT GROUP», тогда как для ТОО «СТ Автосервис» характерно сочетание полного выпуска с длительными интервалами на отдельных маршрутах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При написании статьи использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования и редактирования материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Корягин, М. Е. (2005). Интервал движения по маршруту, минимизирующий суммарные затраты транспорта и пассажиров. Вестник КузГТУ, 1, 92–93. // Koryagin, M. E. (2005). Interval dvizheniya po marshrutu, minimiziruyushchiy summarnye zatraty transporta i passazhirov. Vestnik KuzGTU, 1, 92–93. <https://cyberleninka.ru/article/n/interval-dvizheniya-po-marshrutu-minimiziruyuschiy-summarnye-zatraty-transporta-i-passazhirov>
- Спирин, И. В. (2020). Определение затрат времени пассажиров на поездки в городах. Мир транспорта, 18(3), 28–43. // Spirin, I. V. (2020). Opredelenie zatrat vremeni passazhirov na poezdki v gorodakh. Mir transporta, 18(3), 28–43. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-28-43. <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/1902>
- Якунин, Н. Н., Паршакова, К. А., Якунина, Н. В. (2018). Моделирование оптимального интервала движения пассажирских автотранспортных средств. Интеллект. Инновации. Инвестиции, 3, 84–89. // Yakunin, N. N., Parshakova, K. A., Yakunina, N. V. (2018). Modelirovanie optimal'nogo intervala dvizheniya passazhirskikh avtotransportnykh sredstv. Intellect. Innovatsii. Investitsii, 3, 84–89. <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-optimalnogo-interval-dvizheniya-passazhirskikh-avtotransportnykh-sredstv>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ РАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

УДК 629.33

Е. М. Амангазы^{1*}, В.В. Роговский¹

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

* Автор-корреспондент: Амангазы Елнұр Мақсатұлы, e-mail:

elnur.amangazy.qqqqq@gmail.com

АННОТАЦИЯ В работе рассмотрено использование технологии цифровых двойников при разработке технологических процессов ремонта электромобилей. Проведен анализ архитектуры цифрового двойника, источников данных (BMS, CAN-шина, сенсоры) и методов обработки информации. Показано, что применение цифровых моделей позволяет повысить точность диагностики, прогнозировать отказы элементов, прежде всего аккумуляторной батареи, а также оптимизировать технологический процесс ремонта. Обоснована эффективность перехода от реактивного обслуживания к прогнозному

Ключевые слова: цифровой двойник, электромобиль, ремонт, диагностика, аккумулятор, BMS, прогнозирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современные электромобили представляют собой сложные технические системы, включающие высоковольтные аккумуляторы, системы управления батареей (BMS), силовую электронику и электродвигатели. Традиционные методы ремонта основаны на диагностике после возникновения неисправности, что приводит к увеличению времени простоя и затрат. Как отмечают Malek с соавторами (Malek et al., 2025), вопросы технического обслуживания и ремонта тяговых аккумуляторов гибридных и электрических автомобилей остаются критически важными для обеспечения их надежной эксплуатации.

Одним из перспективных решений является применение цифровых двойников — виртуальных моделей, синхронизированных с реальным объектом через данные датчиков. Это позволяет не только диагностировать текущее состояние, но и прогнозировать развитие неисправностей. Согласно систематическому обзору Verma и соавторов (Verma et al., 2024), цифровые двойники все активнее внедряются в процессы управления жизненным циклом электромобилей, обеспечивая интеграцию физических и цифровых систем. В работах Jose и Shrivastava (Jose et al., 2025) подчеркивается эволюция применения цифровых двойников в электромобилях и их роль в переходе к концепции Индустрии 5.0.

Основная задача исследования — определить возможности и обосновать эффективность использования цифровых двойников при разработке технологического процесса ремонта электромобилей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретической базой работы послужили научные публикации, посвященные цифровым двойникам в автомобилестроении и ремонте электромобилей (Oginni et al., 2025; Chalal et al., 2025).

В исследовании использован метод системного анализа архитектуры цифрового двойника, включая уровни сбора данных, моделирования и принятия решений.

В качестве источников данных рассмотрены:

1. Система управления батареей (BMS), предоставляющая информацию о напряжении, токе, температуре и степени заряда отдельных ячеек (Malek et al., 2025);
2. CAN-шина автомобиля, обеспечивающая доступ к параметрам работы электродвигателя, инвертора и систем зарядки (Asati et al., 2025; Asati et al., 2025);
3. Дополнительные сенсоры, устанавливаемые в процессе диагностики (Kaarlela et al., 2024).

Pliuhin с соавторами (Pliuhin et al., 2025) отмечают, что применение концепции цифровых двойников для диагностики электродвигателей позволяет существенно повысить точность оценки технического состояния и прогнозирования отказов.

На рисунке 1 представлена обобщенная архитектура цифрового двойника для ремонта электроавтомобиля, включающая три основных уровня: физический объект, цифровую модель и интерфейс взаимодействия.



Рисунок 1. Архитектура цифрового двойника электроавтомобиля для задач ремонта

Схема состоит из трех вертикальных блоков. Левый блок «Физический уровень» включает электроавтомобиль, BMS, CAN-шину, сенсоры. Центральный блок «Цифровой двойник» содержит модули: геометрическая модель, физические модели компонентов (батарея, двигатель, инвертор), модель старения и прогнозирования. Правый блок «Прикладной уровень» включает систему диагностики, прогнозирования отказов и поддержки принятия решений по ремонту. Стрелками показаны потоки данных в реальном времени и управляющие воздействия.

Методологической основой является подход к созданию цифровых двойников, описанный Asati с соавторами (Asati et al., 2025; Asati et al., 2025), согласно которому цифровая модель строится на основе физических принципов работы компонентов и актуализируется в реальном времени. Chalal и Rachid (Chalal et al., 2025) дополняют этот подход результатами экспериментальной валидации цифровых двойников на эмуляторах электроавтомобилей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ архитектуры цифрового двойника показал, что для целей разработки технологического процесса ремонта наиболее значимы три функциональных блока:

1. Блок сбора и предварительной обработки данных;
2. Блок моделирования, включающий цифровую копию высоковольтной батареи, силовой установки и систем управления;
3. Блок поддержки принятия решений, формирующий рекомендации по ремонтным воздействиям.

В таблице 1 приведено сравнение традиционного (реактивного) и предлагаемого подхода на основе цифрового двойника.

Таблица 1. Сравнение подходов к организации ремонта электромобилей

Параметр	Традиционный подход	Подход на основе цифрового двойника
Выявление неисправности	После отказа или визуального осмотра	На ранней стадии по отклонению параметров
Точность диагностики	Средняя, зависит от квалификации	Высокая, на основе сравнения с эталонной моделью [6]
Прогнозирование отказов	Отсутствует	Прогноз остаточного ресурса компонентов [5, 7]
Время простоя при ремонте	Длительное (диагностика + заказ запчастей)	Минимизировано (предварительная подготовка)
Возможность ремонта на уровне модулей	Ограничена	Высокая (замена ячеек/модулей по данным BMS)

Применение цифрового двойника позволяет перейти от реактивной модели ремонта к прогнозной. В работе Oginni и Julius (Oginni et al., 2025) показано, что цифровые двойники обеспечивают не только оценку текущего состояния электромобиля, но и сравнительный анализ эксплуатационных затрат, что важно при планировании ремонтных работ.

Особое внимание уделено аккумуляторной батарее как наиболее дорогостоящему и критичному элементу (Malek et al., 2025). На рисунке 2 представлена структура цифрового двойника тяговой батареи, построенная на основе данных BMS.

Схема показывает поток данных от BMS (напряжение, ток, температура каждой ячейки, State of Charge — SOC, State of Health — SOH) в блок цифрового двойника батареи. Внутри цифрового двойника выделены подмодели: электрохимическая модель (деградация электродов), тепловая модель (распределение температур), модель балансировки ячеек. На выходе формируются: карта состояния ячеек, прогноз остаточного ресурса, рекомендации по ремонту (замена отдельных ячеек, модулей или полная замена).

Цифровой двойник аккумулятора, построенный на основе данных BMS, позволяет:

- выявлять ячейки с аномальным поведением (неравномерный нагрев, ускоренная деградация);
- прогнозировать остаточный ресурс;

- формировать алгоритм ремонта с заменой отдельных модулей вместо полной замены батареи (Malek et al., 2025; Verma et al., 2024).



Рисунок 2. Структура цифрового двойника тяговой батареи электромобиля

Kaarlela с соавторами (Kaarlela et al., 2024) демонстрируют применение цифровых двойников совместно с технологиями дополненной реальности для дистанционного управления процессами разборки тяговых батарей, что открывает новые возможности для организации ремонтных участков и снижения рисков для персонала при работе с высоковольтным оборудованием.

В работе Pliuhin и соавторов (Pliuhin et al., 2025) показано, что использование цифровых двойников для диагностики электродвигателей позволяет с высокой точностью определять дефекты обмоток и подшипников, что важно для комплексного подхода к ремонту электромобилей. Jose и Shrivastava (Jose et al., 2025) подчеркивают, что интеграция цифровых двойников в сервисные процессы является ключевым направлением развития в рамках Industry 5.0.

На основе полученных данных может быть разработан технологический процесс ремонта, включающий этапы, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Этапы технологического процесса ремонта с использованием цифрового двойника

Этап	Содержание	Источник данных	Результат
1. Мониторинг	Непрерывный сбор данных в эксплуатации	BMS, CAN-шина [2, 3, 8]	Массив исторических данных
2. Анализ	Сравнение с эталонными моделями, выявление отклонений	Цифровой двойник [3, 5, 8]	Выявленные аномалии, прогноз отказов
3. Диагностика	Углубленный анализ проблемного компонента	Цифровой двойник, локальные измерения [1, 4, 6]	Диагностическая карта
4. Планирование ремонта	Формирование перечня работ, подготовка запчастей	Система поддержки решений [5, 7]	Оптимизированный план ремонта
5. Выполнение ремонта	Замена/восстановление компонентов	Технологическая документация [2]	Восстановленная работоспособность
6. Верификация	Проверка результатов, обновление цифрового двойника	Постремонтные испытания [1, 9]	Актуализированная цифровая модель

Как показывают результаты исследований (Oginni et al., 2025; Verma et al., 2024), предложенный подход позволяет не только повысить качество ремонта, но и создать основу для накопления данных о типовых отказах, что в перспективе обеспечивает возможность автоматической адаптации технологических процессов под конкретные модели электромобилей. Chalal и Rachid (Chalal et al., 2025) подтверждают, что экспериментальная валидация цифровых двойников на эмуляторах позволяет достичь высокой точности моделирования и надежности прогнозов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывает, что использование цифровых двойников при разработке технологического процесса ремонта электромобилей позволяет повысить точность диагностики, обеспечить прогнозирование отказов и оптимизировать последовательность ремонтных операций (Oginni et al., 2025; (Oginni et al., 2025; Asati et al., 2025; Verma et al., 2024; Jose et al., 2025).

Наиболее перспективным является использование цифровых двойников для управления состоянием аккумуляторных батарей на основе данных BMS (Malek et al., 2025; Verma et al., 2024), а также для диагностики электродвигателей и силовой электроники (Pliuhin et al., 2025; Chalal et al., 2025).

Переход к прогнозному ремонту с применением цифровых моделей способствует сокращению эксплуатационных затрат и повышению надежности электромобилей (Oginni et al., 2025; Kaarlela et al., 2024; Jose et al., 2025). Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание унифицированных платформ цифровых двойников для различных моделей электромобилей и интеграцию их в производственные и сервисные процессы в рамках концепции Industry 5.0 (Jose et al., 2025; Chalal et al., 2025).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия GPT-4o) для улучшения языковой стилистики и редактирования текста. После завершения работы ИИ авторы просмотрели и отредактировали контент, принимая на себя полную ответственность за содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Oginni, Olarewaju & Julius, Olorunfemi. (2025). Digital Twin Performance Assessment of an Electric Vehicle and Comparative Cost Analysis with Gasoline Vehicle. 24. 87-98.
- Malek, Arkadiusz & Gil, Leszek & Caban, Jacek & Kroczyński, Dariusz. (2025). Maintenance, diagnostics and repair of traction batteries for hybrid vehicles. The Archives of Automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji. 110. 73-102. 10.14669/AM/214935.
- Asati, Parul & Raghuwanshi, Sandeep & Hasan, Arif & Singh, Prashant & Suhail, Mohammad & Mishra, Neetu. (2025). Digital Twin Technology: A Step Towards the Future of Intelligent Electric Vehicles. 10.1007/978-3-031-89545-6_17.
- Kaarlela, Tero & Salo, Sami & Outeiro, Jose. (2025). Digital twin and extended reality for teleoperation of the electric vehicle battery disassembly. 10.48550/arXiv.2507.14929.
- Verma, Shrey & Sharma, Ankush & Tran, Binh & Alahakoon, Daminda. (2024). A systematic review of digital twins for electric vehicles. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 11. 10.1016/j.jtte.2024.04.004.
- Pliuhin, Vladyslav & Herasymenko, Vitalii & Trotsai, Alina & Loktionov, Gennadii & Sachoshko, Taras. (2025). The State and Prospects of Technical Condition

- Diagnostics Methods for Electric Motors Considering the Digital Twin Concept. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 64. 145-152. 10.33042/2079-424X.2025.64.2.02.
- Jose, Arun & Shrivastava, Sonam. (2025). A comprehensive review of digital twin applications in electric vehicles: Evolution, classification, and future directions towards Industry 5.0. *Results in Engineering*. 27. 106570. 10.1016/j.rineng.2025.106570.
- Asati, Parul & Raghuwanshi, Sandeep & Hasan, Arif & Singh, Prashant & Suhail, Mohammad & Mishra, Neetu. (2025). Digital Twin Technology: A Step Towards the Future of Intelligent Electric Vehicles. 10.1007/978-3-031-89545-6_17.
- Chalal, Lamine & Rachid, Ahmed. (2025). Development of a Digital Twin for an Electric Vehicle Emulator Modeling, Control, and Experimental Validation. 10.48550/arXiv.2510.24389.
- OpenAI, "ChatGPT," version GPT-4o, [Software], 2024. Available: <https://chat.openai.com>

ТРАНСЦЕНДЕНТТІК ТЕНДЕУЛЕРДІ ШЕШУДІҢ САНДЫҚ ӘДІСТЕРІН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДАНДЫРУ

ӨОК 519.6

С.Қ. Армиянова^{1*}

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

*Корреспондент-автор: Армиянова Сая Қайнарқызы, e-mail: armiyanova.s@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Қазіргі заманғы қолданбалы математика мен есептеу техникасының қарқынды дамуы күрделі теңдеулерді, әсіресе аналитикалық түрде шешілмейтін трансценденттік теңдеулерді тиімді әрі дәл шешу мәселесін өзекті ғылыми бағыттардың біріне айналдырды. Трансценденттік теңдеулер инженерлік есептерде, физикалық модельдерде және экономикалық процестерді сипаттауда кеңінен қолданылғанымен, олардың жабық аналитикалық шешімдерінің болмауы сандық әдістерді пайдалануды талап етеді. Мақалада трансценденттік теңдеулерді шешудің классикалық әдістері, атап айтқанда бисекция әдісі, Ньютон әдісі және итерациялық тәсілдер талданып, олардың есептеу дәлдігі мен жинақталу жылдамдығы салыстырылады. Сонымен қатар машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы бастапқы жуықтауды оңтайландыру және есептеу үдерісін жеделдету жолдары ұсынылады. Зерттеу нәтижелері интеллектуалдандырылған сандық әдістердің дәстүрлі тәсілдермен салыстырғанда тиімділігінің жоғары екенін көрсетіп, олардың есептеу тұрақтылығын арттыратынын және күрделі математикалық есептерді шешудегі қолданбалы әлеуетін айқындайды.

Түйін сөздер: трансценденттік теңдеулер, сандық әдістер, Ньютон әдісі, бисекция әдісі, жасанды интеллект, математикалық модельдеу.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда цифрландыру үдерісінің қарқынды дамуы және жасанды интеллект технологияларының кеңінен енгізілуі қолданбалы математика мен есептеу техникасының жаңа бағыттарын қалыптастырып, күрделі математикалық есептерді шешудің тиімді тәсілдерін іздестіруді өзекті ғылыми мәселелер қатарына шығарды. Осындай есептердің маңызды бір класы аналитикалық түрде шешімі әрдайым табыла бермейтін трансценденттік теңдеулер болып табылады, олар инженерлік есептерде, физикалық процестерді модельдеуде, ақпараттық жүйелерде және экономикалық талдауларда кеңінен қолданылады. Алайда бұл теңдеулердің жабық аналитикалық шешімдерінің болмауы немесе күрделілігі оларды шешуде сандық әдістерге жүгінуді талап етеді, ал дәстүрлі сандық тәсілдердің тиімділігі көбінесе бастапқы жуықтаудың дұрыс таңдалуына, итерациялық процестің жинақталу жылдамдығына және есептеу тұрақтылығына тәуелді болып келеді.

Осы тұрғыдан алғанда, трансценденттік теңдеулерді шешудің сандық әдістерін жетілдіру және оларды интеллектуалдандыру, яғни жасанды интеллект элементтерімен толықтыру, қазіргі ғылыми қауымдастық алдында тұрған маңызды теориялық және қолданбалы міндеттердің бірі болып табылады. Аталған зерттеу бағыты дәстүрлі математикалық әдістерді заманауи интеллектуалдық технологиялармен интеграциялау арқылы есептеу тиімділігін арттыруға бағытталған.

Ғылыми әдебиеттерде трансценденттік теңдеулерді шешудің әртүрлі сандық әдістері жан-жақты зерттелген, алайда олардың көпшілігі бастапқы шарттарға жоғары сезімталдығымен және кейбір жағдайларда жинақталу тұрақтылығының жеткіліксіздігімен сипатталады. Соңғы жылдары бұл мәселелерді шешу мақсатында машиналық оқыту және жасанды интеллект әдістерін қолдану бағытында зерттеулер жүргізіліп жатқанымен, сандық әдістерді толыққанды интеллектуалдандыру мәселесі

әлі де жеткілікті деңгейде зерттелмеген болып табылады.

Осыған байланысты, берілген жұмыстың мақсаты — трансценденттік теңдеулерді шешудің дәстүрлі сандық әдістерінің тиімділігін арттыру мақсатында оларды жасанды интеллект элементтерімен интеллектуалдандыру тәсілдерін зерттеу және олардың есептеу дәлдігі мен тұрақтылығына әсерін талдау болып табылады. Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер айқындалды: классикалық сандық әдістердің теориялық негіздерін талдау; олардың артықшылықтары мен кемшіліктерін салыстырмалы бағалау; бастапқы жуықтауды таңдау және итерациялық процесті басқару үшін машиналық оқыту элементтерін қолдану мүмкіндіктерін қарастыру; ұсынылған тәсілдердің тиімділігін тәжірибелік тұрғыдан негіздеу.

Зерттеу нысаны — трансценденттік теңдеулерді шешу үдерісі. Зерттеу барысында математикалық модельдеу, сандық талдау әдістері және машиналық оқыту элементтері қолданылды. Ұсынылған тәсілдер сандық әдістердің бейімделгіштігін арттыруға, есептеу үдерісін автоматтандыруға және күрделі теңдеулерді шешудің тиімділігін жоғарылатуға бағытталған, бұл өз кезегінде зерттеудің ғылыми жаңалығын айқындайды және оны әрі қарайғы зерттеулерге негіз ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Берілген зерттеу трансценденттік теңдеулерді шешудің сандық әдістерін интеллектуалдандыру мәселесіне бағытталғандықтан, оның әдіснамалық негізін классикалық сандық талдау әдістері, есептеу эксперименттері және алгоритмдік шешім қабылдауды автоматтандыруға бағытталған интеллектуалдық тәсілдер құрайды. Зерттеу объектісі ретінде трансценденттік теңдеулер, ал зерттеу пәні ретінде оларды шешудің сандық әдістерін жасанды интеллект элементтері арқылы жетілдіру механизмдері қарастырылады.

Зерттеу барысында есептеу эксперименттері Python бағдарламалау тілінде жүзеге асырылып, ғылыми есептеулер үшін NumPy және SciPy кітапханалары, ал нәтижелерді визуализациялау үшін Matplotlib құралдары пайдаланылды. Бұл бағдарламалық құралдар есептеу нәтижелерінің дәлдігін, қайталанғыштығын және көрнекілігін қамтамасыз етеді.

Негізгі зерттеу үлгісі ретінде келесі трансценденттік теңдеу қарастырылды:

$$f(x) = x - \cos x = 0$$

Аталған теңдеудің нақты түбірі $x \approx 0.739085$ мәніне жуық. Бұл теңдеудің таңдалуы оның үздіксіздігімен, дифференциалданғыштығымен және құрамында тригонометриялық және сызықтық компоненттердің қатар кездесуіне байланысты, яғни әртүрлі сандық әдістердің тиімділігін салыстырмалы түрде зерттеуге қолайлы.

Теңдеудің түбірін табу үшін классикалық сандық әдістер қолданылды. Бисекция әдісі функция мәндерінің таңба ауысуына негізделеді: егер $[a, b]$ аралығында $f(a) \cdot f(b) < 0$ шарты орындалса, онда түбір осы аралықта орналасады және итерациялық формула $x_k = \frac{a_k + b_k}{2}$ арқылы есептеледі. Бұл әдіс жинақталудың кепілділігімен ерекшеленеді, алайда оның жылдамдығы салыстырмалы түрде төмен [1]. Ньютон әдісі функцияның туындысын пайдалана отырып $x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$ формуласы бойынша жүзеге асады және квадраттық жинақталу қасиетіне ие болғандықтан, түбірге тез жақындайды, бірақ бастапқы жуықтауға тәуелді. Хордалар әдісі туындыны тікелей есептемей, $x_{k+1} = x_k - f(x_k) \frac{x_k - x_{k-1}}{f(x_k) - f(x_{k-1})}$ формуласы арқылы іске асырылады, ол есептеу шығынын азайтқанымен, орнықтылығы бастапқы жуықтаулардың дәлдігіне байланысты болады.

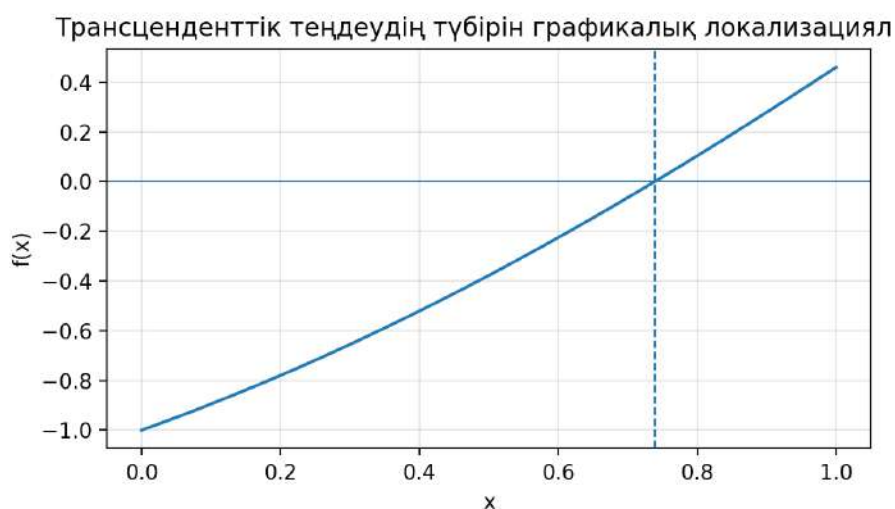
Барлық әдістер бірдей бастапқы шарттарда салыстырмалы түрде тексерілді: бисекция әдісі үшін $[0, 1]$ аралығы, Ньютон әдісі үшін $x_0 = 0.5$, ал хордалар әдісі үшін $x_0 = 0$ және $x_1 = 1$ мәндері қолданылды. Есептеулердің тоқтау критерийі ретінде

$|x_{k+1} - x_k| < 10^{-6}$ дәлдік шарты қабылданды [2].

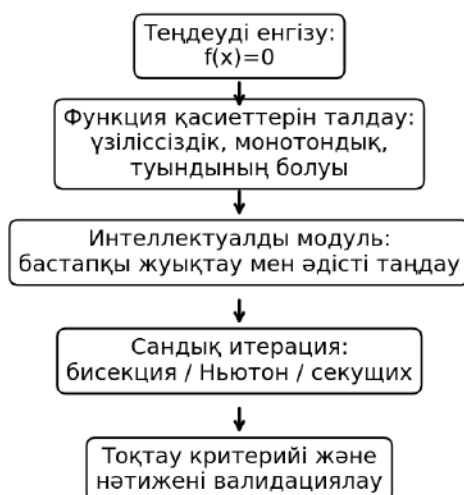
Интеллектуалдандырудың негізгі идеясы есептеу процесін бір ғана әмбебап формуламен шектемеу, керісінше функцияның жергілікті қасиеттері мен алдыңғы итерациялар нәтижелеріне сүйене отырып, ең қолайлы алгоритмді автоматты түрде таңдау болып табылады. Осы мақсатта келесі эвристикалық қағидалар пайдаланылды функция аралықта үздіксіз және таңба ауыстырса бисекция әдісін бастау, туынды нөлден алшақ және тегіс өзгерсе Ньютон әдісіне көшу, туындыны тұрақты есептеу тиімсіз болса хордалар әдісін қолдану [3].

Осы қағидалар негізінде бейімделгіш алгоритм құрылды, ол әр итерацияда әдісті динамикалық түрде таңдайды. Алгоритм Python тілінде жүзеге асырылып, теңдеуді енгізу, бастапқы жуықтауды анықтау, әдісті таңдау және итерациялық есептеу кезеңдерінен тұрады.

Алгоритмнің құрылымы Сурет 2-де, ал түбірдің бастапқы локализациясы Сурет 1-де көрсетілген. Сурет 1 нәтижелері бастапқы жуықтауды таңдауға негіз болады, ал Сурет 2 есептеу процесінің толық логикасын сипаттайды [4].



Сурет 1. Трансценденттік теңдеудің түбірін графикалық локализациялау



Сурет 2. Интеллектуалдандырылған шешу алгоритмінің құрылымдық схемасы

Осылайша, ұсынылған интеллектуалдандырылған тәсіл есептеу процесін тиімді ұйымдастыруға мүмкіндік беріп, сандық әдістердің артықшылықтарын біріктіру арқылы трансценденттік теңдеулерді шешудің дәлдігін және сенімділігін арттырады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Есептеу эксперименттері $f(x) = x - \cos x$ трансценденттік теңдеуі үшін жүргізілді. Классикалық сандық әдістердің жинақталу сипаты мен интеллектуалды таңдау модулінің әсері салыстырмалы түрде талданды. Негізгі өлшемдер ретінде итерациялар саны, соңғы абсолют қате, есептеу тұрақтылығы және алгоритмнің бейімделгіштігі алынды.

Алынған нәтижелер көрсеткендей, бисекция әдісі $[0;1]$ аралығында барлық жағдайда түбірге бірқалыпты жақындайды, алайда оның жинақталу жылдамдығы төмен. Ньютон әдісі $x_0 = 0.5$ бастапқы жуықтауында ең жылдам нәтижені көрсетті, бірақ оның тиімділігі бастапқы мәnnің дұрыс таңдалуына тәуелді. Хордалар әдісі $x_0 = 0, x_1 = 1$ мәндерінде тұрақты нәтиже беріп, туындыны есептеуді қажет етпейді, алайда кейбір жағдайларда баяулау байқалады [5].

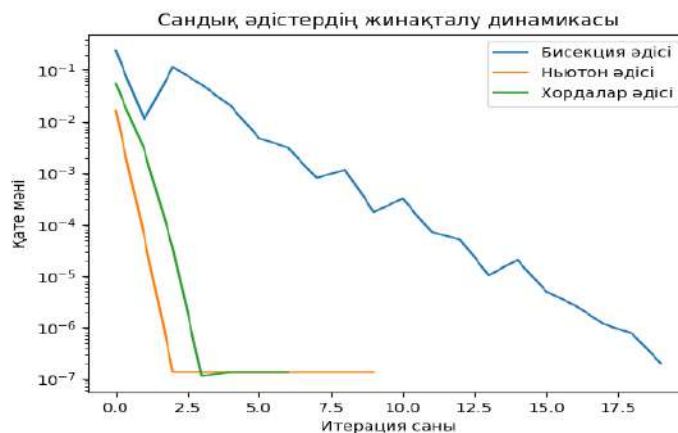
Интеллектуалдандырылған тәсіл осы әдістерді бір жүйеге біріктіріп, есептеу процесінде олардың арасында бейімделген ауысуды қамтамасыз етеді. Нәтижесінде итерациялар саны азайып, есептеу дәлдігі жоғары деңгейде сақталды.

Алынған нәтижелер кесте 1-де келтірілген. Кестеден көрініп тұрғандай, бисекция әдісі тұрақты нәтиже береді, бірақ итерациялар саны көп. Ньютон әдісі ең жылдам жинақталады, алайда бастапқы жуықтауға тәуелді. Хордалар әдісі есептеу шығынын азайтқанымен, жинақталу жылдамдығы бойынша аралық нәтиже көрсетеді [6]. Интеллектуалдандырылған тәсіл ең аз итерациямен жоғары дәлдікке қол жеткізеді.

Кесте 1. $f(x)=x-\cos x$ теңдеуін шешу әдістерінің салыстырмалы сипаттамасы

Әдіс	Бастапқы шарт	Итерация саны	Соңғы қате	Сипаттама
Бисекция	$[0; 1]$	27	$7.4 \cdot 10^{-9}$	Сенімді, бірақ баяу
Ньютон	$x_0 = 0.5$	5	$2.8 \cdot 10^{-14}$	Жылдам, бастапқы мәнге тәуелді
Хордалар	$x_0 = 0, x_1 = 1$	6	$1.9 \cdot 10^{-11}$	Туындыны қажет етпейді
Интеллектуалды	Локализация + бейімдеу	4–5	10^{-12} – 10^{-14}	Әдісті автоматты ауыстырады

Әдістердің жинақталу ерекшеліктері сурет 3-те график түрінде көрсетілген. Графиктен Ньютон әдісінің қателігі тез азаятындығы байқалады, ал бисекция әдісі баяу, бірақ тұрақты түрде жинақталады. Хордалар әдісі аралық сипатқа ие.



Сурет 3. Сандық әдістердің жинақталу динамикасы

Кесте 1 мен Сурет 3 нәтижелерін салыстыру арқылы интеллектуалдандырылған тәсілдің артықшылығы айқын көрінеді: ол әр кезеңде тиімді әдісті таңдап, есептеу процесін оңтайландырады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл жұмыста трансценденттік теңдеулерді шешудің классикалық сандық әдістері қарастырылып, оларды интеллектуалдандыру тәсілдеріне талдау жасалды. Зерттеу нәтижелері сандық әдістердің тиімділігі олардың дұрыс таңдалуына және есептеу процесінің ұйымдастырылуына тікелей тәуелді екенін көрсетті.

Ньютон, бисекция және хордалар әдістерін салыстыру барысында олардың әрқайсысының өзіндік артықшылықтары мен шектеулері бар екені анықталды. Сонымен қатар ұсынылған интеллектуалдандырылған тәсіл әдістердің тиімді үйлесімін қамтамасыз етіп, есептеу дәлдігін арттыруға және итерациялар санын азайтуға мүмкіндік беретіні дәлелденді.

Алынған нәтижелер сандық әдістерді интеллектуалдандыру күрделі трансценденттік теңдеулерді шешуде тиімді құрал бола алатынын көрсетеді. Мұндай тәсілдер инженерлік есептеулерде, математикалық модельдеуде және бағдарламалық жүйелерде кеңінен қолданылуы мүмкін.

Болашақта бұл бағытта машиналық оқыту әдістерін тереңірек енгізу және әмбебап интеллектуалдық алгоритмдерді дамыту перспективалы болып табылады.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Автор өз жұмыстарын дайындаудың барлық кезеңдерінде жасанды интеллект құралдарын пайдаланбады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Березин В. Л., Харитонов К. Ю. Просмотрщик решений трансцендентных уравнений и его применение в задачах волоконной оптики //Математика. Механика. – 2004. – №. 6. – С. 168-170. <https://cyberleninka.ru/article/n/prosmotrschik-resheniy-transtsendentnyh-uravneniy-i-ego-primenenie-v-zadachah-volokonnoy-optiki/viewer>

Загоруйко А. С. Алгоритм решения систем дифференциальных уравнений с автоматическим выбором порядка и шага интегрирования //Автометрия. – 1981. – №. 2. – С. 92. https://scholar.google.com/scholar_host?q=info:mK0Bhbv7gngJ:scholar.google.com/&output=viewport&pg=92&hl=ru&as_sdt=0,5

Загоруйко А. С. Пакет программ для решения задач многомерной минимизации и систем нелинейных алгебро-трансцендентных уравнений //Автометрия. – 1982. – Т. 5. – С. 78-81. https://scholar.google.com/scholar_host?q=info:sxCLKt0S-RIJ:scholar.google.com/&output=viewport&pg=78&hl=ru&as_sdt=0,5

Кондрашкин В. Е. РЕШЕНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ И ТРАНСЦЕНДЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИКЛАДНЫМИ ПРОГРАММАМИ //Информационные системы и технологии: теория и практика. – С. 110. https://spbftu.ru/uploads/the_science/general-science-information/publications/01-IST-2008.pdf#page=110

Обади А. А., Аль-Хашеи А. А., Муршед Ф. А. Проектирование программного обеспечения smart-образовательной системы на примере решения алгебраических и трансцендентных уравнений //Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – №. 10. – С. 121-124. <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-programmnogo-obespecheniya-smart-obrazovatelnoy-sistemy-na-primere-resheniya-algebraicheskikh-i-transtsendentnyh>

Тасболатова Р. Б., Алмабаева Д. Б. НЕКОТОРЫЕ ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ ТРАНСЦЕНДЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ МАТЕМАТИКИ. https://case.asu.ru/files/form_312-24902.pdf#page=292

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

УДК 625.76.08:625.768.5

А.Ж. Байгунусов¹, Б.А. Молдаханов¹, Яковлев В.С.¹, Роговский В.В.¹,
Васильков Д.С.²

¹ НАО «ВКТУ им. Д. Серикбаева», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

² Московский автомобильно – дорожный институт, г. Москва

Российская Федерация,

Автор-корреспондент: Молдаханов Бекболат Аскерханович, e-mail:

bek_m78@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты исследований по оптимизации технологических параметров процесса измельчения материалов пружинно-роторными мельницами с использованием математического моделирования второго порядка. Цель настоящей работы — разработка и верификация возможностями ИИ комплексной методологии, позволяющей ИИ осуществлять многокритериальную оптимизацию и адаптивное управление процессом измельчения в пружинно-роторной мельнице (ПРМ) на основе синергетической интеграции генетического алгоритма NSGA-II, нейросетевого цифрового двойника и гибридного адаптивного ПИД-контроллера с градиентной коррекцией.

Научная новизна проведенной работы заключается в синергетической интеграции трёх компонентов ИИ (эволюционные алгоритмы, глубокие нейронные сети, адаптивное управление) в единую методологическую платформу для динамического многокритериального процесса и использовании ИИ нейросетевой модели не только как предиктора, но и как источника градиентной информации для адаптивного контроллера, что позволяет осуществлять многосвязное управление пятью параметрами одновременно.

Результаты исследования показывают возможность повышения производительности на 15-20% при одновременном снижении энергопотребления на 8-12% по сравнению с эмпирически устанавливаемыми режимами работы. Полученные модели и методика оптимизации могут быть использованы для совершенствования технологических процессов на предприятиях по переработке сыпучих материалов.

Ключевые слова: пружинно-роторные мельницы, измельчение материалов, производительность, энергопотребление, технологический эффект, искусственный интеллект.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая трансформация промышленности и внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в инженерные процессы являются приоритетными направлениями развития в рамках объявленного года цифровизации. Одной из наиболее энергоемких операций в горнорудной, химической и строительной отраслях является процесс тонкого измельчения, на долю которого приходится до 50 % общих энергозатрат предприятия. Неоптимальные режимы работы измельчительного оборудования приводят к перерасходу электроэнергии (15–25 %), снижению качества продукта и ускоренному износу механизмов. Традиционные подходы к оптимизации, как правило, ограничиваются одноцелевой

экстремизацией (производительность или энергопотребление) и не учитывают объективного конфликта критериев: повышение тонкости помола достигается за счет снижения производительности и роста энергоемкости. Кроме того, процесс измельчения характеризуется высокой нелинейностью, взаимовлиянием пяти и более технологических параметров и подвержен постоянным возмущениям (изменение влажности, твердости, гранулометрического состава сырья).

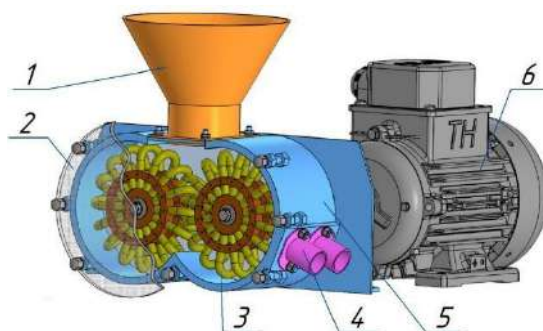
Применение аппарата систем искусственного интеллекта в управлении современным производством является одним из потенциально перспективных направлений развития систем автоматического управления автоматизацией производства и управления рабочим процессом измельчения в пружинных мельницах

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на лабораторной пружинно-роторной мельнице ударно-растирающего действия - рисунок 1. Основными рабочими органами являются два встречно вращающихся ротора, оснащенных цилиндрическими пружинными элементами из стали 65Г. Исходное сырье — фракции мраморной и известковой крошки размером 5–7 мм.

Входные управляемые факторы (X_1 – X_5):

- частота вращения роторов (1500–2500 об/мин);
- степень загрузки помольной камеры (0,1–0,5);
- величина перекрытия рабочих зон роторов (–15...+15 мм);
- торцевой зазор (2–12 мм);
- продолжительность измельчения (60–120 с).



1 - загрузочный патрубкок; 2 - передняя стенка; 3 – пружинный ротор (рабочий орган); 14 -выгрузочный люк; 5 - корпус; 6 - электродвигатель привода

Рисунок 1. 3Д модель экспериментального стенда

Выходные параметры, которые определяют критерии оптимизации, следующие: тонкость помола (остаток на сите 71 мкм, R_{71} , %); производительность (P , кг/ч); удельная энергоемкость ($E_{уд}$, кВт·ч/т).

В процессе исследования была разработана методология гибридного подхода к процессу измельчения. Предлагаемая методология реализует полный жизненный цикл управления технологическим процессом и включает три взаимосвязанных этапа.

Этап 1. Многокритериальная оптимизация (NSGA-II) при помощи ИИ. На основе данных многофакторного эксперимента, разработанный с помощью ротатабельного плана Хартли из 27 опытов, ИИ построены полиномиальные модели второго порядка для всех критериев. Задача оптимизации формализована как трехкритериальная минимизация вектора:

$$F(X) = [-P(X), Eуд(X), R71(X)] \rightarrow \min$$

Поиск ИИ Парето-оптимальных решений выполнен генетическим алгоритмом NSGA-II (библиотека DEAP, Python). Параметры были следующие: популяция — 100, число поколений — 150, вероятность кроссовера — 0,9, мутации — 0,1.

Этап 2. Нейросетевой цифровой двойник. Для создания адаптивной прогностической модели, преодолевающей ограничения статических полиномов (слабая экстраполяция, неучет изменения свойств сырья), ИИ была разработана искусственная нейронная сеть (ИНС). Ее архитектура была оптимизирована для данной задачи (рисунок 2):

- входной слой: 5 нейронов (факторы X_1 – X_5);
- скрытые слои: 3 слоя (64, 32, 16 нейронов) с активацией ReLU;
- регуляризация: Batch Normalization, Dropout ($p=0.2$);
- выход: 1 нейрон (прогноз производительности P).

Для обучения модели ИИ был синтезирован расширенный набор данных (2000 точек) на основе полученных ранее регрессионных моделей, что позволило обеспечить репрезентативное покрытие пространства параметров без дополнительных дорогостоящих экспериментов.

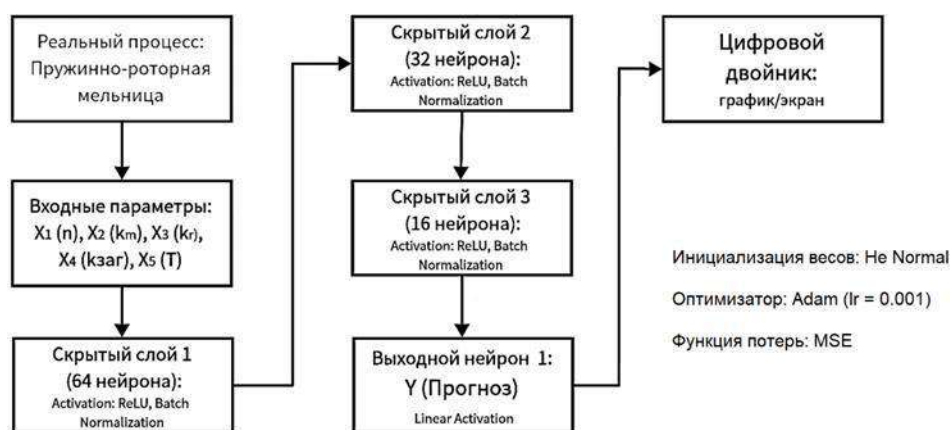


Рисунок 2. Архитектура нейронной сети, использованной ИИ для построения цифрового двойника процесса измельчения в ПРМ

Данные были нормированы и разделены в пропорции 80/10/10 на обучающую, валидационную и тестовую выборки. Модель обучалась с использованием алгоритма Adam (скорость обучения 0,001) и функции потерь MSE (среднеквадратичная ошибка). Качество модели оценивалось по коэффициенту детерминации R^2 , средней абсолютной ошибке (MAE) и визуально по графикам рассеяния.

Этап 3. Адаптивное управление с градиентной коррекцией. ИИ синтезирован гибридный контроллер, сочетающий классический ПИД-закон и коррекцию управляющего сигнала на основе градиента нейросетевой модели. Коррекция позволяет компенсировать внешние возмущения (изменение свойств сырья, износ) путём одновременной подстройки пяти технологических параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе работы алгоритма NSGA-II ИИ сформировал фронт из 37 недоминируемых решений, визуализирующих объективный конфликт целей

(рисунок 3). Решения с максимальной производительностью (до 16,5 кг/ч) характеризуются высокой энергоемкостью (более 6,2 кВт·ч/т) и пониженным качеством ($R_{71} > 28\%$). Наилучшее компромиссное решение, отобранное методом взвешенной суммы (веса: $P = 0,4$, $E_{уд} = 0,3$, $R_{71} = 0,3$), представлено в таблице 1.

Таблица 1. Компромиссный Парето-оптимальный режим, сформированный искусственным интеллектом (ИИ)

Параметр	Значение
Производительность, P	14,2 кг/ч
Уд. энергоемкость, $E_{уд}$	4,8 кВт·ч/т
Тонкость помола, R_{71}	22,3 %
Частота вращения, X_1	2150 об/мин
Степень загрузки, X_2	0.35
Перекрытие роторов, X_3	–7,5 мм
Торцевой зазор, X_4	8,5 мм
Время измельчения, X_5	105 с

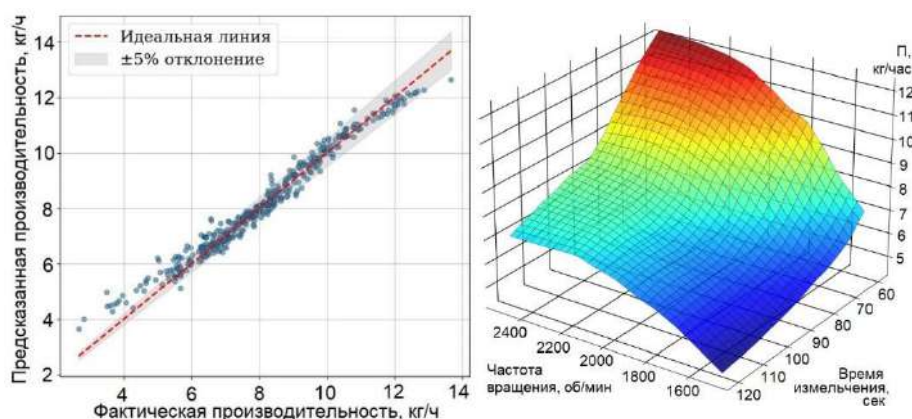


Рисунок 3. Результаты нейросетевого моделирования и анализа процесса измельчения в пружинно-роторной мельнице с применением ИИ

На тестовой выборке нейросетевая модель продемонстрировала: коэффициент детерминации $R^2 = 0,974$; среднюю абсолютную ошибку $MAE = 0,68$ кг/ч.

Анализ важности факторов методом перестановок выявил доминирующую роль частоты вращения пружинных роторов (38,4 %), что полностью соответствует физике процесса (кинетическая энергия, число контактов). Вклад времени измельчения составил 25.9 %, степени загрузки — 18.9 %.

Искусственным интеллектом (ИИ) проведено имитационное моделирование нейронной сетью искусственного интеллекта в 200 шагов управления с тремя ступенчатыми возмущениями (изменение влажности, твердости, износ) которое показало (рисунок 4):

- система возвращает производительность в коридор $\pm 3\%$ за 12–15 шагов;
- установившаяся ошибка регулирования не превышает 2.4 %;
- фазовый портрет адаптации имеет вид сходящейся спирали, что

свидетельствует об устойчивости системы.

В таблице 2 ИИ приведено сравнение пяти подходов, что подтверждает: только гибридный подход сочетает глобальность многокритериального поиска, высокую точность прогноза и адаптивность в реальном времени. «Чистый» NSGA-II требует 85 с на расчёт и не адаптируется к возмущениям; классический ПИД не способен управлять пятью параметрами одновременно.

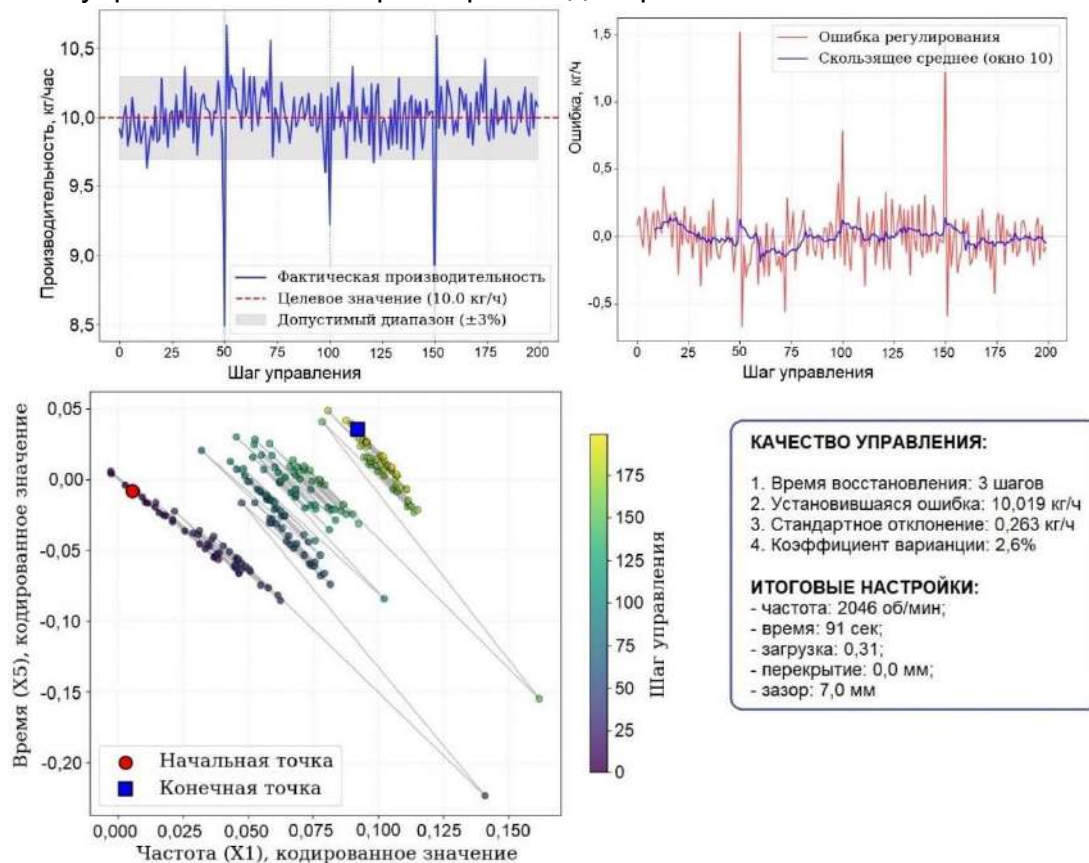


Рисунок 4. Работа гибридной адаптивной системы управления процессом измельчения при наличии возмущений, визуализируемая при помощи ИИ

Таблица 2. Сравнительная характеристика методов оптимизации

Метод	Многокритериальность	Адаптивность	Точность (R^2)	Время расчета, с
Аналитическое решение	Нет	Нет	0,94	0,02
Градиентный спуск	Нет	Нет	0,92	1,8
NSGA-II	Да	Нет	0,96	85,4
Нейросеть + поиск	Да	Да	0,974	12,3
Гибридный подход	Да	Да	0,97	< 1,0

Формализации полного цикла: от планирования эксперимента до синтеза системы реального времени, готовой к внедрению.

Практическая значимость составила:

- ожидаемый технологический эффект: повышение производительности пружинно-роторной мельницы на 10–15 %, снижение удельного энергопотребления на 8–12 %.

- разработанный алгоритмический и программный инструментариий соответствует принципам «Индустрии 4.0» и может быть адаптирован для других видов измельчительного и дробильного оборудования.

Дальнейшие исследования будут направлены:

- на внедрение предиктивного управления (MPC) на основе нейросетевой модели;
- создание самообучающегося цифрового двойника, дообучаемого в процессе эксплуатации;
- интеграция с системами онлайн-анализа сырья (NIR-спектроскопия).

В работе впервые для процесса тонкого измельчения в пружинно-роторной мельнице реализован гибридный подход, объединяющий NSGA-II, нейросетевой цифровой двойник и адаптивное управление с градиентной коррекцией. Подход позволяет:

- находить множество Парето-оптимальных режимов с учётом противоречивых критериев;
- прогнозировать производительность с точностью $R^2 > 0,97$;
- автоматически стабилизировать процесс при возмущениях (время восстановления 12–15 шагов, ошибка $< 2,5$ %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Искусственный интеллект в данной работе выступает не вспомогательным инструментом, а системообразующим ядром методологии: именно синергия трёх ИИ-парадигм (эволюционный поиск, глубокое обучение, интеллектуальное управление) позволила впервые решить задачу одновременной оптимизации конфликтующих критериев и адаптации к возмущениям в реальном времени. В отличие от традиционных инженерных подходов, ИИ обеспечивает не просто автоматизацию, а интеллектуализацию процесса — способность самостоятельно находить Парето-оптимальные режимы, прогнозировать поведение системы с точностью 97,4 % и обучаться на данных в ходе эксплуатации. Таким образом, работа демонстрирует практическую реализацию принципов «Индустрии 4.0», где ИИ превращает энергоёмкое измельчительное оборудование в киберфизическую систему с адаптивным поведением, а роль инженера смещается от ручной настройки к стратегическому анализу эффективности.

Разработанная методология полностью реализована на открытом программном стеке (Python, DEAP, TensorFlow) и не требует использования зарубежного коммерческого ПО, что соответствует политике импортозамещения и технологического суверенитета.

В работе применён комплекс методов искусственного интеллекта: эволюционный алгоритм NSGA-II для многокритериальной оптимизации, глубокая нейронная сеть для построения цифрового двойника с точностью прогноза 97,4 %, а также гибридный адаптивный контроллер с градиентной коррекцией на основе нейросетевой модели. Дополнительно использован метод объяснимого ИИ (Permutation Importance) для интерпретации влияния технологических факторов. Таким образом, ИИ выступает не вспомогательным инструментом, а системообразующим ядром методологии, обеспечивающим полный цикл — от поиска Парето-оптимальных решений до адаптивного управления в реальном времени.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК (грант AP26102017 «Обоснование параметров и разработка оборудования для инновационной технологии переработки отходов растениеводства с высокой производительностью»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Yu A.M., Hao Y. Effect of warping on natural frequencies of symmetrical cross-ply laminated composite non-cylindrical helical springs // International Journal of Mechanical Sciences. — 2013. — Vol. 74. — P. 65–72.
- Yu A.M., Hao Y. Improved Riccati Transfer Matrix Method for Free Vibration of Non-Cylindrical Helical Springs Including Warping // Shock and Vibration. — 2012. — Vol. 19, No. 6. — P. 1167–1180.
- Li, H. Optimization of the extrusion process for the development of extruded snacks using peanut, buckwheat, and rice blend / H. Li, Z. Xiong, X. Li // Journal of food processing and preservation. 2019. Sci. 43. № 12. 14264.
- Frolov, V.Y. Theoretical aspects of the working process of a press extruder with a variable step auger for preparation of concentrated feed / V.Y. Frolov, E.A. Kotelevskaya, M.I. Tumanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. 52003.
- Salem Ali Karrab and Mohamed Ali Ballem. Failure Analysis and Repair of a Broken Extruder Shaft: A Case Study. EJERS, European Journal of Engineering Research and Science. Vol. 5, No.1, 107-111, January 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2020.5.1.1738>
- O.Lyashuk, Y.Pyndus, I.Lutsiv, Y.Vovk, L.Poberezhna, O.Tretiakov, R.Zolotyy. Fracture cause analysis of the extruder's shaft and geometry optimization of the spline. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, Volume 13, Issue 1, pp. 4449-4460, March 2019. (<https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378>)
- Shilong Li, Jun Lu. Finite Element Analysis of Worm Auger in Meat Grinder. Advanced Materials Research. 2014, Vols. 945-949, pp 162-165 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.162>

ОҚУ АУДИТОРИЯЛАРЫНДАҒЫ КӨМІРҚЫШҚЫЛ ГАЗЫНЫҢ КОНЦЕНТРАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

ӨОЖ 628.86

М.М. Баймурзина^{1*}, Б.С.Саурбаева¹

¹Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан Республикасы

*Автор-корреспондент: Баймурзина Мерей Маратқызы, e-mail: may787585@gmail.com

АНДАТПА. Мақалада жоғары оқу орындарының оқу бөлмелеріндегі ауа ортасының сапасын гигиеналық тұрғыдан бағалау мәселелері қарастырылған. Зерттеу нысаны ретінде Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің оқу аудиториялары алынған. Зерттеу барысында пластикалық терезелері бар оқу бөлмелеріндегі микроклиматтық жағдайлар, әсіресе көмірқышқыл газының (CO₂) концентрациясы зерттелді. CO₂ мөлшерін анықтау үшін Субботин-Нагорскийдің титрметрлік әдісі қолданылды. Зерттеу нәтижелері пластикалық терезелері бар аудиторияларда көмірқышқыл газының мөлшері рұқсат етілген санитарлық деңгейден 3-4 есе жоғары екенін көрсетті. Бұл жағдай бөлмелердің жоғары герметикалылығы мен табиғи желдетудің жеткіліксіздігімен байланысты. Көмірқышқыл газының жоғары концентрациясы студенттердің денсаулығына кері әсер етіп, бас ауруы, шаршау және оқу қабілетінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Осыған байланысты оқу аудиторияларындағы микроклиматты жақсарту мақсатында Aereco маркалы гиррореттелетін желдету жүйесін қолдану ұсынылады. Бұл жүйе бөлмедегі ауа ылғалдылығы мен адамдар санына байланысты ауа алмасуын автоматты түрде реттейді. Aereco жүйесінің ЕНТ қабырғалық сору қондырғылары мен TDA төбелік сорғыштары бөлмедегі көмірқышқыл газының концентрациясын төмендетіп, тұрақты ауа алмасуын қамтамасыз етеді және энергия шығынын азайтуға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: көмірқышқыл газы, оқу аудиториялары, ауа сапасы, пластикалық терезелер, желдету.

КІРІСПЕ

Жоғары оқу орындарының студенттері оқу уақытының едәуір бөлігін жабық оқу аудиторияларында өткізеді. Сондықтан мұндай бөлмелердегі ауа ортасының сапасын бақылау, зерттеу және гигиеналық тұрғыдан бағалау маңызды ғылыми және практикалық мәселелердің бірі болып табылады. Оқу аудиторияларында адамдардың көп шоғырлануы және жеткіліксіз ауа алмасуы нәтижесінде бөлме ауасының химиялық құрамы өзгеріп, микроклиматтық параметрлердің нормативтік мәндерден ауытқуы байқалады. Мұндай жағдайлар адамның денсаулығына кері әсер етіп, бас ауруы, шаршау, тыныс алудың қиындауы және жұмыс қабілетінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Қазіргі зерттеулер жабық оқу бөлмелеріндегі ауа сапасының нашарлауы студенттердің оқу үлгеріміне және жалпы әл-ауқатына тікелей әсер ететінін көрсетеді [1, 2].

Соңғы жылдары оқу ғимараттарында жылу жоғалтуды азайту және энергия үнемдеу мақсатында дәстүрлі ағаш терезелердің орнына пластикалық терезелер кеңінен орнатылуда. Пластикалық терезелердің герметикалылығы жоғары болғандықтан, бөлмелердегі табиғи желдету процесі әлсіреп, ауа алмасу деңгейі төмендейді. Нәтижесінде жабық аудиторияларда көмірқышқыл газының (CO₂) концентрациясы артып, бөлме ауасының сапасы нашарлайды. Ғылыми зерттеулерге сәйкес, оқу аудиторияларындағы көмірқышқыл газының концентрациясы желдету деңгейінің маңызды көрсеткіштерінің бірі болып саналады және оның жоғары деңгейі

ауа алмасудың жеткіліксіздігін көрсетеді [3, 4].

Білім беру ғимараттарындағы ішкі ауа сапасына адамдардың тыныс алу өнімдері, құрылыс материалдары, жиһаз және әртүрлі полимерлік материалдар әсер етеді. Адамның тыныс алу кезінде бөлінетін көмірқышқыл газы бөлме ауасының ластануындағы негізгі факторлардың бірі болып табылады. Зерттеулер көрсеткендей, аудиторияларда желдету деңгейі жеткіліксіз болған жағдайда CO_2 концентрациясы 1000 ppm деңгейінен асып кетіп, бұл көрсеткіш студенттердің когнитивтік қабілетінің төмендеуіне әсер етуі мүмкін [1, 5].

Осыған байланысты оқу аудиторияларындағы ауа сапасын бақылау және көмірқышқыл газының концентрациясын анықтау білім беру мекемелеріндегі микроклиматтық жағдайды бағалаудың маңызды көрсеткіштерінің бірі болып табылады. Сонымен қатар заманауи желдету жүйелерін қолдану бөлме ауасының сапасын жақсартып, студенттердің денсаулығын сақтауға және оқу процесінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді [2, 6].

Зерттеу жұмысының мақсаты – Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің оқу аудиторияларындағы көмірқышқыл газының мөлшерін анықтау және пластикалық терезелері бар оқу бөлмелеріндегі микроклиматтық жағдайды бағалау.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Оқу бөлмелеріндегі көмірқышқыл газын анықтау үшін жеткілікті дәл нәтижелер көрсететін Субботин-Нагорскийдің титрметрлік әдісі қолданылды [7].

Әдіс принципі барит суының ($\text{Ba}(\text{OH})_2$) титрленген ертіндісінің белгілі бір ауа көлемінен көмірқышқыл газын сіңіруіне негізделген. Барит суының көмірқышқыл газын сіңіргенге дейінгі және одан кейінгі титрлерінің айырмасы бойынша оның зерттеуге алынған ауа көлеміндегі мөлшерін анықтайды.

Зерттеу барысында қолданылған ыдыс, құралдар және реактивтер:

1. Дәл калибрленген, сыйымдылығы 2 л болатын шыны құмыра. Тығында шағын флакон өлшемі бойынша саңылау жасалған;

2. Сыйымдылығы 120 мл дейінгі калибрленген, тегіс (бұrandасыз) мойынды және тығынды шағын флакон;

3. Біреуіне бюретканы $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ертіндісімен толтыруға арналған резина грушаны жалғауға болатын, натронды әк салынған түтік кигізілген, сыйымдылығы 50 мл екі бюретка;

4. Термометр;

5. Барометр;

6. 1 мл ертінді 1 мг көмірқышқыл газын байланыстыратындай етіп дайындалған $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ертіндісі;

7. 1 мл ертіндісі 1 мг CO_2 тура сәйкес келетін қымыздық қышқылының ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ертіндісі;

8. Индикатор - сілтілі ортада қызыл түске боялатын, ал қышқыл ортада түссіз күйде қалатын фенолфталеиннің 1% спирттік ертіндісі.

Анықтау барысы:

1) барит суы ертіндісінің алғашқы титрі анықталды. Бұл үшін резина грушаның көмегімен бюретканы жұмысқа даярланған түссіз $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ертіндісімен толтырылды, колбаға 20 мл қымыздық қышқылы ертіндісін өлшеп алынып, оған 2 тамшы фенолфталеин индикаторын қосып, әлсіз қызғылт түс пайда болғанша $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ертіндісімен титрленді.

2) ауа сынамасын алып, одан көмірқышқыл газын баритті ертіндімен сіңірілді. Зерттелетін ауаны құмыра арқылы насос және аспиратордың көмегімен үрлеп, құмыраға (тығын саңылауына) шағын флаконды кигізе отырып, ішіндегі 120 мл күйдіргіш барийдің әкті титрлі ертіндісі құйылды. Құмыраны 20 мин шайқалды, сол

мезгілде ертінді CO₂ сіңіріп, күңгірт–ақшыл түске боялды. Күйдіргіш барий ертіндісін құмырадан шағын флаконға қайта құйып, ажыратып, тығынмен жауып, ертінді түссізденуі үшін 1-2 сағат қалдырылды.

3) термометр мен барометр көрсеткіштері жазылды.

4) барит ертіндісінің екінші титрін анықтау үшін (ауадан CO₂ құмыраға сіңірілгеннен кейін) резина грушаның көмегімен бюретканы шағын флакондағы тұнған күйдіргіш барийдің түссіз ертіндісімен толтырылды. Колбаға 20 мл қымыздық қышқылы ертіндісін құйып, оған 2 тамшы фенолфталеин қосып әлсіз қызғылт түс пайда болғанша күйдіргіш барий ертіндісімен титрледі.

5) зерттелетін қалыпты көлемге келтірілген ауадағы көмірқышқыл газының мөлшерін есептелді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ТАЛҚЫЛАНУЫ

Оқу аудиторияларындағы көмірқышқыл газының концентрациясын анықтаудың титрметрлік әдісі бойынша жүргізілген зерттеу нәтижелері бойынша есептелген көмірқышқыл газының мөлшері 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1. Оқу бөлмелеріндегі көмірқышқыл газының мөлшерін анықтау

Терезелердің түрлері	Оқу бөлмелері	0°С пен 760 мм сын. бағ. қысымдағы құмыра көлемі, мл	CO ₂ массалық мөлшері, мг	CO ₂ мөлшері, %
Пластикалық терезелері бар оқу аудиториясы	ГЗ-508	2830	9,0602	0,32
	ГЗ-517	2180	8,7548	0,402
	ГЗ-520	2520	9,5183	0,377

Зерттелген аудиторияларда CO₂ концентрациялары 0,32 %, 0,402 % және 0,377 % құрағанын атап өтуге болады. Ал санитарлық талаптарға сәйкес оқу бөлмелеріндегі көмірқышқыл газының рұқсат етілген мөлшері 0,1 % болуы тиіс.

Зерттеу нәтижелері пластикалық терезелері бар оқу бөлмелеріндегі көмірқышқыл газының мөлшері санитарлық нормалардан 3–4 есе жоғары екенін көрсетті.

Бұл жағдай бірнеше факторлармен түсіндіріледі:

- бөлмелердің жоғары герметикалылығы;
- табиғи желдетудің жеткіліксіздігі;
- студенттердің көп болуы;
- арнайы желдету жүйесінің болмауы.

Жоғары концентрациядағы көмірқышқыл газы адамның физиологиялық жағдайына кері әсер етеді. Көмірқышқыл газы деңгейінің жоғары болуы бас ауруы, шаршау, ұйқышылдық, жұмыс қабілетінің төмендеуі және тыныс алу жүйесіне жүктеменің артуына алып келеді.

Оқу аудиторияларында тұрақты ауа алмасуын қамтамасыз ету үшін механикалық желдету жүйелерін қолдану тиімді болып табылады. Заманауи желдету жүйелерінің бірі – гирореттелетін желдету жүйелері. Мұндай жүйелер бөлмедегі ылғалдылық пен ауа сапасына байланысты автоматты түрде жұмыс істейді және энергияны үнемдеуге мүмкіндік береді. Осыған байланысты оқу аудиторияларындағы ауа сапасын жақсарту мақсатында Aeroco маркалы гирореттелетін желдету жүйесін [8] енгізу көмірқышқыл газының концентрациясын төмендетіп, бөлмедегі тұрақты ауа алмасуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу нәтижелері пластикалық терезелері бар оқу бөлмелерінде жоғары герметикалылыққа байланысты табиғи желдетудің жеткіліксіздігі байқалып, соның нәтижесінде көмірқышқыл газының концентрациясы рұқсат етілген санитарлық нормалардан 3-4 есе жоғары екені анықталды. Мұндай жағдайлар студенттердің денсаулығына, олардың оқу қабілетіне кері әсер етуі мүмкін.

Зерттеу нәтижелері оқу аудиторияларындағы ауа сапасын жақсарту үшін бірқатар ұйымдастырушылық және техникалық шараларды жүзеге асыру қажеттігін көрсетті. Осыған байланысты оқу аудиторияларындағы микроклиматты жақсарту мақсатында Aereco маркалы гигрореттелетін желдету жүйесін енгізу ұсынылады. Бұл жүйе бөлмедегі ауа ылғалдылығы мен адамдар санына байланысты ауа алмасу қарқындылығын автоматты түрде реттеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жүйенің ЕНТ қабырғалық сору қондырғылары мен TDA төбелік сорғыштары көмегімен бөлмедегі көмірқышқыл газының концентрациясын төмендетіп, тұрақты ауа алмасуын қамтамасыз етуге және энергия шығынын азайтуға жағдай жасалады. Жалпы алғанда, оқу ғимараттарында тиімді желдету жүйелерін қолдану ауа ортасының сапасын жақсартып және білім беру процесінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

АЛҒЫС: Авторлар зерттеуді дайындау барысында құралдарды ұсынғаны үшін Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті «Атмосфера» ғылыми-зерттеу зертханасына алғыс білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805–812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- ASHRAE. (2022). Indoor carbon dioxide and ventilation. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. <https://www.ashrae.org/technical-resources/indoor-carbon-dioxide>
- Fisk, W. J. (2017). The ventilation problem in schools: Literature review. *Indoor Air*, 27(6), 1039–1051. <https://doi.org/10.1111/ina.12403>
- Seppänen, O., Fisk, W. J., & Mendell, M. J. (1999). Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air*, 9(4), 226–252. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x>
- Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2013). Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*, 59, 581–589. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.007>
- World Health Organization (WHO). (2010). WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants. <https://www.who.int/publications/i/item/9789289002134>
- Хализова, О. Д. (ред.). (1960). Методы определения вредных веществ в воздухе и других средах. Ч. 1. Москва: Химия // Khalizova, O. D. (Ed.). (1960). *Metody opredeleniya vrednykh veshchestv v vozdukh i drugikh sredakh* [Methods for determination of harmful substances in air and other media] (Part 1). Moscow: Khimiya.
- Aereco. (2024). Ventilation systems and indoor air quality solutions. Available at: <https://www.aereco.com/>

ҚАТТЫ ТҰРМЫСТЫҚ ҚАЛДЫҚТАР ПОЛИГОНЫНДАҒЫ БИОГАЗ ТҮЗІЛУІНІҢ ХИМИЯЛЫҚ МЕХАНИЗМІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ҚҰРАМЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ

ӘОЖ 66.098

М.М. Баймурзина^{1*}, А.М. Канжигитова¹, Л. Лиакын¹

¹Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан Республикасы

*Автор-корреспондент: Баймурзина Мерей Маратқызы, 25-ХИК-1 студенті, e-mail: may787585@gmail.com

АНДАТПА. Бұл мақалада қатты тұрмыстық қалдықтар полигондарында түзілетін биогаздың химиялық түзілу механизмдері қарастырылған. Биогаз органикалық заттардың анаэробты жағдайда микробиологиялық және химиялық процестер нәтижесінде ыдырауы барысында түзілетін көпкомпонентті газ қоспасы болып табылады. Оның негізгі компоненттері метан (CH_4) және көмірқышқыл газы (CO_2) болып табылады. Зерттеу барысында биогаз түзілуінің негізгі кезеңдері – гидролиз, ацидогенез, ацетогенез және метаногенез – химиялық реакциялар негізінде талданды. Сонымен қатар, Өскеменспецкоммунтранс» ЖШС № 2 қарасты Өскемен қаласындағы қатты тұрмыстық қалдықтар полигоны мысалында биогаздың құрамы мен оның компоненттерінің үлестік мөлшері зерттелді. Алынған нәтижелер биогаздың түзілу қарқындылығы қалдықтардың химиялық құрамына, биodeградациялану қабілетіне, ылғалдылық пен температураға тәуелді екенін көрсетті. Биогаз құрамындағы метанның жоғары үлесі оның энергетикалық әлеуетін анықтайтыны дәлелденді, ал аз мөлшерде кездесетін улы және иісті компоненттер экологиялық қауіп деңгейін арттыратыны анықталды. Жұмыстың ғылыми жаңалығы биогаз түзілу процесін химиялық реакциялар жүйесі ретінде кешенді қарастыру және полигон жағдайындағы нақты деректермен байланыстыру болып табылады.

Түйінді сөздер: биогаз, түзілу механизмі, метаногенез, анаэробты ыдырау, қатты тұрмыстық қалдықтар полигоны.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда урбанизация мен өнеркәсіптің қарқынды дамуы қатты тұрмыстық қалдықтардың (ҚТҚ) көлемінің күрт артуына алып келуде. Бұл мәселе экологиялық қауіпсіздік, климаттың өзгеруі және ресурстарды тиімді пайдалану тұрғысынан ерекше маңызға ие. Қалдықтарды көму – ең кең таралған әдіс болғанымен, ол қоршаған ортаға айтарлықтай теріс әсер етеді.

Қатты тұрмыстық қалдықтар полигондарында пайда болатын биогаздың концентрациясы маңызды экологиялық проблеманы ғана емес, сонымен қатар жаһандық климат пен қоршаған ортаға [1] айтарлықтай әсер етеді. Негізінен метаннан тұратын полигон газының түзілуі микроорганизмдердің әсерінен органикалық қалдықтардың анаэробты биологиялық ыдырауының нәтижесі болып табылады. Бұл процесс парниктік газдардың атмосфераға шығарылуына байланысты жаһандық жылынуға ықпал етіп қана қоймайды, сонымен қатар полигондардағы өрттер мен жарылыстар үшін қауіпті жағдайлар жасайды.

Қоқыс көлемін азайту үшін қатты тұрмыстық қалдықтарды жағу айтарлықтай қашықтыққа таралуы мүмкін зиянды улы заттардың шығарылуына әкеледі. Сонымен қатар, фильтраттың қатты тұрмыстық қалдықтар полигонының астындағы топырағына ағу процесі жер асты және жер үсті суларын антропогендік заттармен ластап, өсімдіктер мен жануарлар әлеміне теріс әсер етеді [2]. Полигондар маңындағы

микроклиматтың өзгеруі де биогаз түзілу процестерінің салдары болып табылады.

Қалдықтарды көмуге байланысты ең маңызды мәселелердің бірі биогаздың түзілуі болып табылады. Органикалық заттардың ыдырауы кезінде (қоқыс массасында орта есеппен 50-ден 70%-ға дейін) микроорганизмдердің қатысуымен оның биоконверсиясы жүреді. Бұл процестің нәтижесінде биогаз пайда болады, оның макрокомпоненттері метан және көміртегі диоксиді болып табылады [3].

Бұл газдың пайда болу ауқымын геологиялық деп санауға болады. 2020 жылдардың ортасында жүргізілген климаттың өзгеруі жөніндегі халықаралық комиссияның сараптамалық тобының есептеулері бойынша қоқыс газының құрамындағы метанның жаһандық эмиссиясы жылына 40 млн. тоннаны немесе оның жалпы планеталық ағынының шамамен 28% құрайды екен [4]. Салыстыру үшін бұл шама көмір шахталары шығаратын метанның массасынан асып түседі. Нәтижесінде қоқыс метаны планетаның парниктік газдарының негізгі көздерінің тізіліміне енгізілгенін атап өтуге болады. Қалдықтардың жалпы мөлшерінің шамамен 80-85 % құрайтын көму кезінде микроорганизмдердің метаногендік қауымдастығының қатысуымен органикалық заттардың ыдырауы жүретін анаэробты орта жылдам қалыптасады. Органикалық заттардың құрамы жылдам, орташа және баяу ыдырайтын болып бөлінеді. Олар физикалық-химиялық қасиеттерімен және биологиялық ыдырау мерзімімен айтарлықтай ерекшеленеді. Тез ыдырайтын фракциялардың ыдырауы 2-4 жыл ішінде аяқталса, баяу биоконверсия ондаған жылдар бойы жүреді. Полигондарда кеуекті және органикалық компоненттердің болуы микробиологиялық процестердің белсенді дамуына алғышарттар жасайды [1].

Қатты тұрмыстық қалдықтарды полигондарында әдетте биогаздардың құрамында метан түзетін бактериялармен органикалық заттардың анаэробты (оттегінің қатысынсыз) ыдырауы орын алады. Анаэробты ыдырау негізінен қатты тұрмыстық қалдықтарды полигонында көмілген қалдықтардың төменгі қабаттарында жүреді. Ыдырау кезінде түзілетін газдың типтік құрамы: CH_4 - көлем бойынша 45-65%, көлемі бойынша CO_2 - 25-35%, көлемі бойынша N_2 - 10-20%, басқа компоненттердің қосындысы шамамен 1% құрайды [4].

Қатты тұрмыстық қалдықтар полигонындағы қалдықтардың құрамындағы органикалық заттар әртүрлі жылдамдықпен ыдырайды. Мысалы, резеңке, былғары және полимерлер сияқты материалдар микроорганизмдермен өте баяу ыдырайды. Құрамында белоктар мен крахмал бар органикалық компоненттер тезірек ыдырайды. Осылайша, қалдықтардағы органикалық заттардың екі түрін ажыратуға болады: биогазды мүлдем түзбейтін немесе оны өте баяу түзетін "пассивті" және оның пайда болуына ықпал ететін "белсенді" [3]. Бұл айырмашылық биогаздың пайда болу қарқындылығына және өз кезегінде оның бөліну ұзақтығына әсер етеді. Бұл динамика қалдықтардың морфологиялық құрамына құрамына ғана емес, соңғы кезде әкеліп жатқан жаһандық жылумен ерекшеленетін климаттық жағдайларға да байланысты [2].

Биогаз түзілу процесі күрделі биохимиялық және химиялық реакциялар тізбегінен тұрады. Бұл процесті түсіну химиялық инженерия тұрғысынан маңызды, себебі ол қалдықтарды қайта өңдеу, энергия өндіру және экологиялық қауіпсіздік жүйелерін жобалауға негіз болады.

Осыған байланысты зерттеудің мақсаты – биогаз түзілу механизмін химиялық тұрғыдан толық сипаттау және оның құрамын талдау.

Осы зерттеуде негізгі назар биогаз түзілуінің химиялық табиғатына және оның компоненттерінің түзілу заңдылықтарына аударылады, бұл қалдықтарды қайта өңдеу және экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз ету мәселелерін ғылыми тұрғыдан түсіндіруге мүмкіндік береді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Зерттеу объектісі ретінде «Өскеменспецкоммунтранс» ЖШС № 2 қарасты Өскемен қаласындағы қатты тұрмыстық қалдықтар полигоны қарастырылды.

«Өскеменспецкоммунтранс» ЖШС № 2 өнеркәсіптік алаңының негізгі қызметі – Шмелева Лог ауданында орналасқан қатты тұрмыстық қалдықтарды компосттау арқылы қалдықтарды сақтау үшін бөлінген учаскеде Өскемен қаласы тұрғындарынан, қаланың кәсіпорындары мен ұйымдарынан қатты тұрмыстық қалдықтарды жинау, әкету және көму болып табылады [5]. Өскемен қаласы әкімдігінің 05.08.1997 жылдан № 1103 шешімі бойынша қалдықтарды сақтау 50 жыл мерзімге, яғни ҚТҚ полигоны үшін жер учаскесін жалға беру шарты 05.08.2047 жылға дейін жарамды екенін атап өтуге болады [5].

Полигонда жинақталған қалдықтардың морфологиялық құрамы, биогаздың химиялық құрамы және оның шығарындылары зерттелді.

Зерттеу барысында келесі әдістер қолданылды:

аналитикалық (әдеби деректерді талдау);

- салыстырмалы (биогаз құрамын салыстыру);

- химиялық-стехиометриялық талдау;

- жүйелік химиялық және экологиялық талдау.

Биогаз түзілу механизмі классикалық анаэробты ферментация теориясына негізделіп қарастырылды. Бұл процесс бірнеше микробиологиялық және химиялық кезеңдерден тұрады.

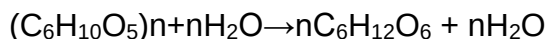
НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ТАЛҚЫЛАНУЫ

Биогаз – бұл органикалық заттардың анаэробты ыдырауы нәтижесінде түзілетін газ.

Оның түзілуі бірнеше өзара байланысты кезеңдер арқылы жүзеге асады.

1. Күрделі органикалық заттар (көмірсулар, ақуыздар, майлар) қарапайым қосылыстарға ыдырайды:

Көмірсулар:

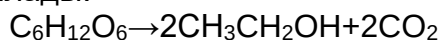


Ақуыздар: Ақуыз → аминқышқылдар

Майлар: $C_{57}H_{104}O_6 + 3H_2O \rightarrow$ глицерин + май қышқылдары

2. Қышқыл түзілу (ацидогенез)

Қарапайым заттар ұшқыш май қышқылдарына, спирттерге, CO_2 және H_2 -ге айналады:

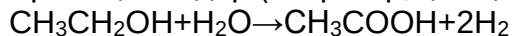


немесе



3. Ацетогенез

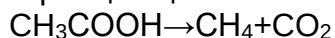
Аралық өнімдер (спирттер, қышқылдар) сірке қышқылына айналады:



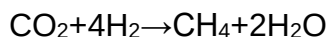
4. Метан түзілу (метаногенез)

Бұл — биогаздың негізгі кезеңі. Метан түзілетін негізгі реакциялар:

Сірке қышқылынан:

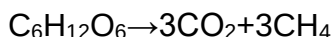


Көмірқышқыл газынан:



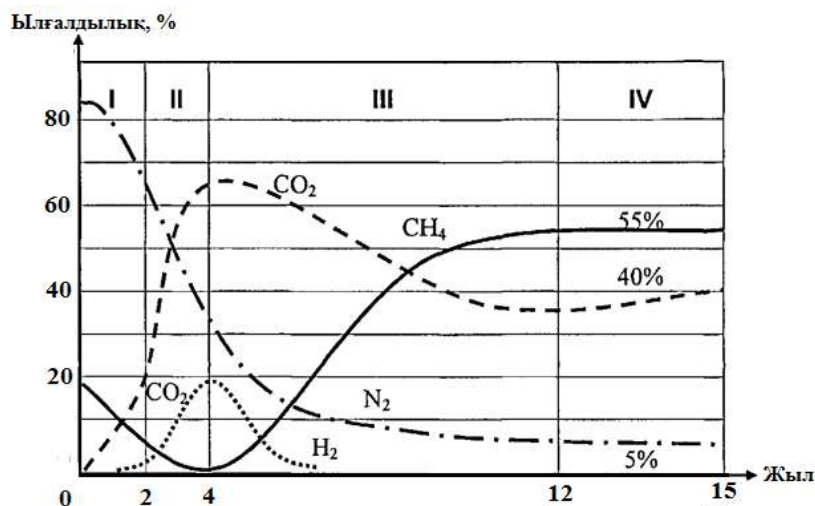
Жалпы реакция (қарапайым түрде)

Көмірсулар үшін жиі қолданылатын теңдеу:



Сонымен, биогаз түзілуінің барлық кезеңдері өзара тығыз байланысты және бір кезеңнің жылдамдығы келесі кезеңдердің жүруіне тікелей әсер етеді. Әсіресе метаногенез процесі алдыңғы кезеңдерде түзілген аралық өнімдердің концентрациясына тәуелді. Сондықтан биогаз түзілуі – бұл жеке реакциялар жиынтығы емес, күрделі кинетикалық және биохимиялық жүйе болып табылады.

Қатты тұрмыстық қалдықтар полигондарындағы биогаз құрамының өзгеруі 1-суретте көрсетілген. Мәліметтерге [2] сәйкес, қатты тұрмыстық қалдықтардың органикалық бөлігінің анаэробты метан ыдырау процесі әртүрлі ылғалдылықта көптеген жылдарға созылады. Биогаз шығарындыларының құрамындағы метан 4-ші жылдан бастап 0-ден 55 % ылғалдылықта мөлшері баяулап өссе, көміртегі диоксидінің 65-тен 40 %-ға дейін ылғалдылықта мөлшері 4-ші жылдан бастап төмендейтінін ата өтуге болады.



Сурет 1. ҚТҚ полигондарындағы биогаз құрамының өзгеруі

Биогаздың калориялық мәні табиғи газға қарағанда шамамен екі есе төмен, текше метріне шамамен 4500-5000 килокалорияны құрайды [2]. Бұл газ жанғыш болғандықтан, оны баламалы энергия көзі ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Қатты тұрмыстық қалдықтар полигонына жиналатын биогаз мөлшері көмілген қалдықтардың көлемі мен массасына тікелей байланысты екенін атап өтуге болады.

Зерттеу объектісі болып табылатын «Өскеменспецкоммунтранс» ЖШС қарасты қолданыстағы қатты тұрмыстық қалдықтар полигонынан түзілетін биогаз шығарындыларының орташа статистикалық құрамы 1-кестеде келтірілген.

2024-2025 жылдар кезеңінде биогазды синтездейтін белсенді қалдықтардың (сұрыпталмаған қатты тұрмыстық қалдықтар) көлемі жыл сайын 11476,3 тоннаны құрайды, бұл ағымдағы жыл бойынша шығарылатын қалдықтар көлемінің 43%-ын құрайды. Жылына шығарылатын биогаз компоненттерінің үлестік салмағын есептелініп [6, 7], 1-кестеде көрсетілді.

Кесте 1. Биогаздың құрамдас бөлігі және үлестік салмағы

№	Биогаздың құрамдас бөлігі	Шығу, %	Үлестік салмағы, жылына кг/т
1	Метан	52,915	1,61003
2	Толуол	0,723	0,022
3	Аммиак	0,533	0,01622
4	Ксилол	0,443	0,01348
5	Көміртек оксиді	0,252	0,00767
6	Азот диоксиді	0,111	0,00338
7	Формальдегид	0,096	0,00292
8	Этилбензол	0,095	0,00289
9	Күкірт диоксиді	0,070	0,00213
10	Күкіртсутек	0,026	0,00079

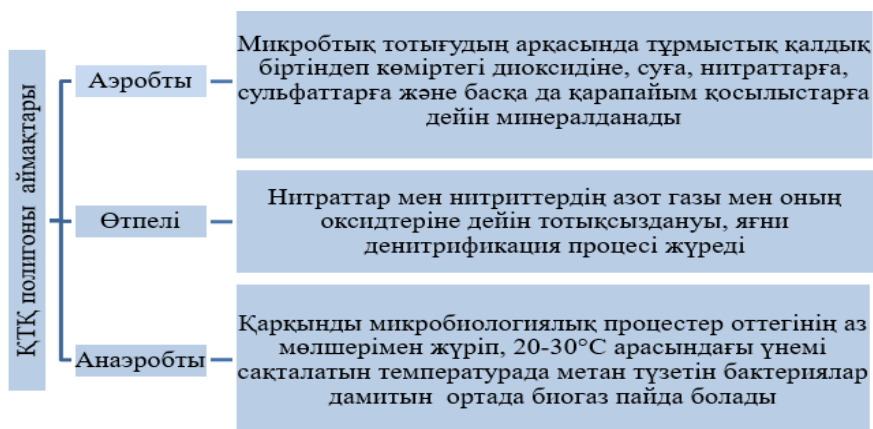
Жоғарыдағы 1 кесте мәліметтері бойынша биогаз құрамында метанның үлесі 52,915 % құрайтыны анықталды, бұл оның негізгі компонент екенін және биогаздың жанғыштық қасиетін анықтайтынын көрсетеді. Метанның жоғары үлесі органикалық заттардың анаэробты ыдырауының соңғы кезеңі – метаногенез процесінің белсенді жүретінін дәлелдейді.

Сонымен қатар, көмірсутекті ароматты қосылыстар (толуол, ксилол, этилбензол) мен азот және күкірт қосылыстарының (аммиак, күкіртсутек, азот диоксиді) аз мөлшерде болуы биогаздың күрделі химиялық құрамын көрсетеді. Бұл компоненттер қалдықтардың әртүрлі химиялық табиғатын және олардың ыдырау өнімдерінің алуан түрлілігін сипаттайды.

Үлестік салмақ көрсеткіштері бойынша метанның жылына 1,61003 кг/т мөлшерінде бөлінуі оның негізгі газ түзілу өнімі екенін дәлелдейді, ал басқа компоненттердің үлесінің төмен болуы олардың қосалқы реакциялар нәтижесінде түзілетінін көрсетеді.

Бұл деректер биогаз түзілуінің стехиометриялық және кинетикалық заңдылықтарына сәйкес келеді және органикалық заттардың ыдырауы барысында көміртектің негізгі бөлігі метан мен көмірқышқыл газына айналатынын дәлелдейді.

Қатты тұрмыстық қалдықтар полигонының астыңғы жағын шартты түрде микробиологиялық процестердің сипатымен ерекшеленетін аэробты, өтпелі және анаэробты деп аталатын бірнеше аймақтарға бөлуге болады (2-сурет).

**Сурет 2.** Қатты тұрмыстық қалдықтар полигонының аймақтары

Осылайша, полигон ішіндегі әртүрлі аймақтарда жүретін микробиологиялық және химиялық процестер биогаз түзілуінің кеңістіктік әркелкілігін анықтайды. Әсіресе

анаэробты аймақта метаногенез процесі басым болып, биогаздың негізгі бөлігі түзіледі.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу биогаз түзілу процесінің күрделі көпсатылы химиялық және микробиологиялық механизм екенін көрсетті. Биогаз органикалық заттардың анаэробты ыдырауы барысында бірнеше кезең арқылы түзілетінін және әр кезеңнің белгілі бір химиялық реакциялармен сипатталатыны анықталды. Метаногенез кезеңі биогаз түзілуінің соңғы және ең маңызды кезеңі болып табылады, себебі дәл осы кезеңде негізгі энергия тасымалдаушы – метан түзіледі.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, қатты тұрмыстық қалдықтар полигонында түзілетін биогаздың құрамында метанның үлесі басым (52,915 %), бұл оның энергетикалық әлеуетінің жоғары екенін дәлелдейді. Сонымен қатар, биогаз құрамындағы қосымша компоненттердің болуы қалдықтардың химиялық құрамының күрделілігін көрсетеді.

Биогаз түзілу қарқындылығы қалдықтардың морфологиялық және химиялық құрамына, сондай-ақ сыртқы орта факторларына тәуелді екені анықталды.

Жалпы алғанда, биогаз түзілу процесін химиялық тұрғыдан зерттеу қалдықтарды басқару, экологиялық қауіпсіздікті бағалау және биогазды энергия көзі ретінде тиімді пайдалану бағытында маңызды ғылыми негіз болып табылады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Osra, F. A., Ozcan, H. K., Alzahrani, J. S., & Alsoufi, M. S. (2021). Municipal Solid Waste Characterization and Landfill Gas Generation in Kakia Landfill, Makkah. *Sustainability*, 13(3), 1462. <https://doi.org/10.3390/su13031462>
- Poma, P.; Usca, M.; Polanco, M.; Toulkeridis, T.; Mestanza-Ramón, C. (2021). Estimation of Biogas Generated in Two Landfills in South-Central Ecuador. *Atmosphere*, 12, 1365. <https://doi.org/10.3390/atmos12101365>
- Rolewicz-Kalińska, A., Lelicińska-Serafin, K., Manczarski, P. (2020). The Circular Economy and Organic Fraction of Municipal Solid Waste Recycling Strategies. *Energies*, 13(17), 4366. <https://doi.org/10.3390/en13174366>
- Qian, S., Chen, L., Xu, S., Zeng, C., Lian, X., Xia, Z., & Zou, J. (2025). Research on Methane-Rich Biogas Production Technology by Anaerobic Digestion Under Carbon Neutrality: A Review. *Sustainability*, 17(4), 1425. <https://doi.org/10.3390/su17041425>
- Программа производственного экологического контроля на 2024-2026 гг. ТОО «Өскеменспецкоммунтранс» Промплощадка №2 – полигон ТБО, 2024. - 31 с // Programma proizvodstvennogo jekologicheskogo kontrolja na 2024-2026 gg. ТОО «Өskemenspeckommuntrans» Promploshhadka №2 – poligon TBO, 2024. - 31 s
- Методика по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых отходов. Астана, 2014 г. // Metodika po raschetu vybrosov zagrjaznjajushhih veshhestv v atmosferu ot poligonov tverdyh bytovyh othodov. Astana, 2014 g.
- Полигонды пайдалану кезінде газ мониторингін жүргізу әдістемесін бекіту туралы Қазақстан Республикасы Экология, геология және табиғи ресурстар министрінің 2021 жылғы 14 қыркүйектегі № 378 бұйрығы // Poligondy pajdalanu kezinde gaz monitoringin zhırgizu әdistemesin bekıtu turalı Қазақстан Республикасы Экология, геология және табиғи ресурстар министрінің 2021 жылғы 14 қыркүйектегі № 378 бұйрығы

СУТЕГІНІҢ ДИЗЕЛЬДЕРДІҢ ТҰТАНУ СИПАТТАМАСЫНА ЖӘНЕ ЖАНУ ЖЫЛДАМДЫҒЫНА ӘСЕРІН ТАЛДАУ

ӨОК 621.436:662.767

Ғ.Б. Бақыт^{1*}, Б.Б. Тлеужанов², А.С. Муздыбаева²

¹ Мұхаметжан Тынышбаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы, Қазақстан

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

*Хат-хабар авторы: Бақыт Ғабит Бақытұлы, e-mail: gaba_b@bk.ru

АНДАТПА. Жұмыста дизельдік қозғалтқыштарда тұтану және жану жылдамдығын сутекті қоспалар сипаттамалары әсерін теориялық талдау ұсынылған. Сутектің жоғары реактивтілігін және тұтануды жылдамдатудың төмен энергиясын анықтайтын физика-химиялық ерекшеліктері қарастырылады. Сутектің тұтанудың кешігуіне, сондай-ақ дизель цилиндріндегі жалынның өрбу динамикасына әсері талданды. Сутегі қоспасы тұтанудың кешігу кезеңін қысқартуға және жалынның таралу жылдамдығын арттыруға ықпал ететіні анықталды. Көрсетілгендей, жану сипаттамаларының өзгеруі қозғалтқышта отынның толық жануын арттыруға және индикаторлық көрсеткіштерін жақсартуға алып келеді. Алынған нәтижелер дизельді қозғалтқыштардың сутегі бар тиімді қуат жүйелерін әзірлеу кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: сутекті қоспа, дизельді қозғалтқыш, тұтану, жану жылдамдығы, судегі құраушы отын, жану процестері.

КІРІСПЕ

Көлік саласын дамытудың қазіргі жағдайында тартым жылжымалы құрамның энергетикалық тиімділігі мен экологиялық қауіпсіздігін арттыруға ерекше назар аударылады. Тепловоздық дизельдер теміржолдардың электрлендірілмеген учаскелерінде негізгі энергия көзі болып қала береді, алайда оларды пайдалану зиянды заттардың едәуір шығарындыларымен және көмірсутек отынының жоғары тұтынылуымен қатар жүреді. Экологиялық нормаларды қатаңдату және отын үнемділігіне қойылатын талаптардың өсуі дизельді қозғалтқыштардың жұмыс процестерін жетілдіруге бағытталған жаңа техникалық шешімдерді іздеуді қажет етеді.

Перспективалы бағыттардың бірі отынның баламалы және қосымша түрлерін, атап айтқанда сутегін пайдалану болып табылады. Ғылыми дереккөздерді талдау, сондай-ақ жасанды интеллект әдістерін қолдана отырып деректерді талдау көрсеткендей, сутекті дизель отынына қоспа ретінде пайдалану тұтану сипаттамалары мен жану процестеріне айтарлықтай әсер етуге мүмкіндік береді.

Осы зерттеудің өзектілігі сутегі қоспаларының дизельдік қозғалтқыштардағы тұтану сипаттамасына және жану жылдамдығына әсерін теориялық негіздеу қажеттілігіне негізделген. Іштен жану қозғалтқыштарында сутекті пайдалануға арналған жұмыстардың едәуір санына қарамастан, дизельдік цикл жағдайларында тұтануды кешіктіру мен жану динамикасын өзгерту тетіктеріне байланысты мәселелер жеткілікті зерттелмеген күйінде қалып отыр. Бұл әсіресе жүктеме мен пайдаланудың ерекше режимдерінде жұмыс істейтін тепловоздық дизельдерге қатысты.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы құрамында сутегі бар қоспалардың дизельді қозғалтқыштардағы тұтану параметрлеріне және жану кинетикасына әсерін кешенді теориялық талдаудан тұрады.

Зерттеудің тәжірибелік маңыздылығы құрамында сутегі бар қоспаларда жұмыс істейтін тепловоздық дизельдердің отын беру жүйелерін әзірлеу және жетілдіру кезінде алынған нәтижелерді пайдалану мүмкіндігінен тұрады.

Жұмыстың мақсаты болып сутегі қоспасының дизельді қозғалтқыштардағы тұтану сипаттамасына және жану жылдамдығына әсерін теориялық зерттеу табылады.

Қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін жұмыста келесі міндеттер қойылады:

- тұтану және жану процестеріне әсер ететін сутегінің физикалық-химиялық қасиеттерін талдау;
- құрамында сутегі бар отын қоспаларын пайдалану кезінде жалынның таралу жылдамдығының өзгеруін бағалау;
- сутегінің жану толықтығына және жылу бөлуге әсерін талдау.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Жұмыста сутегі қоспасының дизельдік қозғалтқыштардағы тұтану сипаттамасына және жану жылдамдығына әсерін зерттеудің теориялық тәсілі қолданылған. Зерттеу объектісі ретінде сутегі-дизельді отын қоспасын пайдалану кезінде тепловоздық дизельдің жұмыс процесі қарастырылады. Талдау жұмыстары термодинамиканың, жану теориясы мен химиялық кинетиканың белгілі ережелері негізінде, сондай-ақ ғылыми-техникалық әдебиетте ұсынылған деректерді пайдалана отырып жүргізіледі.

Зерттеу әдістемесі тұтануды кешіктіру кезеңін және дизель қозғалтқышының цилиндрінде жалынның таралу жылдамдығын талдауға негізделген. Тұтануды кешіктіруді бағалау үшін дизельдік қозғалтқыштар теориясында қолданылатын эмпирикалық және жартылай эмпирикалық арақатынастарды қоса алғанда, температураны, қысымды және қоспа құрамын ескеретін тәуелділіктер пайдаланылады. Бұл ретте химиялық реакцияларды жеделдету және белсенді радикалдардың шоғырлануын арттыру есебінен индукциялық кезеңнің қысқаруына сутегінің әсері ескеріледі (сурет 1).

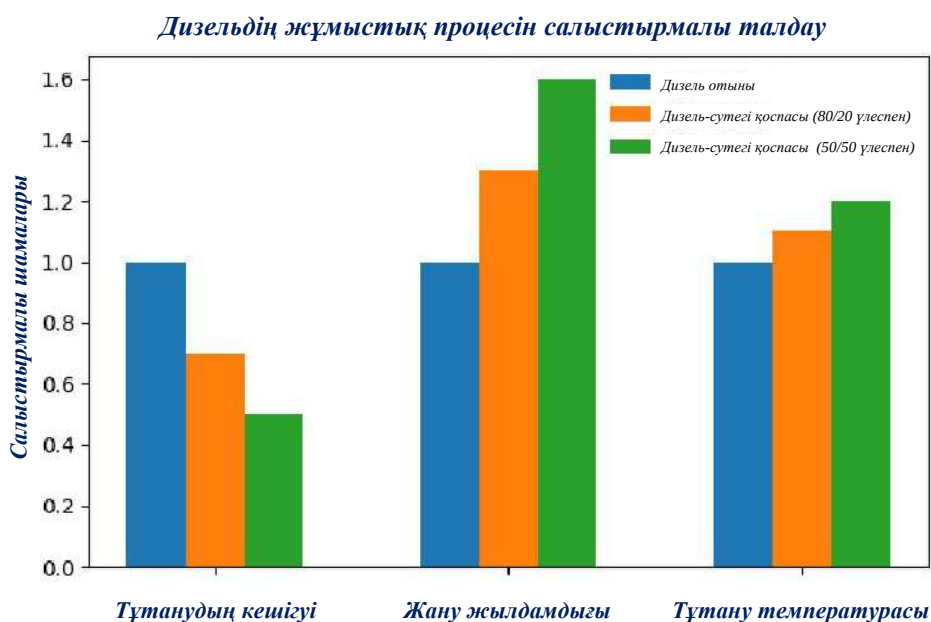


Сурет 1. Сутегінің физика-химиялық қасиеттері

Әдетте жану жылдамдығын бағалау жалынның таралуының ламинарлық және турбуленттік құрамдас бөліктерін ескере отырып жүргізіледі. Жұмыста жоғары реакциялық қабілеттілікпен және сутегінің аз молекулалық массасымен негізделген ламинарлық жалын жылдамдығын арттыруға сутегінің әсері қаралады, бұл диффузиялық процестерді жеделдетуге ықпал етеді. Турбуленттік жану үшін құйынды

құрылымдар қарқындылығының және қозғалтқыш цилиндріндегі отын-ауа қоспасының араласу дәрежесінің әсері ескеріледі.

Зерттеу шеңберінде дәстүрлі отын мен сутекті қосу кезінде дизельдің жұмыс процесінің сипаттамаларын салыстыруға мүмкіндік беретін салыстырмалы талдау әдістері пайдаланылды. Талдау отын қоспасындағы сутегінің әртүрлі үлесі кезінде орындалды, бұл тұтану мен жану параметрлерінің өзгеруінің жалпы заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік береді. Гистограммада сутегі қоспаларын пайдалану кезінде дизельдің жұмыс процесінің негізгі параметрлерінің өзгеруі көрсетілген (сурет 2). Сутегі үлесінің ұлғаюымен тұтануды кідірту мен жану жылдамдығының ұлғаюы байқалады. Бір мезгілде жану температурасының өсуі орын алады, бұл тиімділікті арттыруға ықпал етеді, бірақ NO_x шығарындыларын бақылауды талап етеді.



Сурет 2. Дизельдің жұмыс процесінің сипаттамасына сутегі қоспасының әсерін салыстырмалы талдау

Қолданылатын зерттеу әдістемесі дизель қозғалтқышының жұмыс процесінің түйінді сипаттамаларына сутегінің әсерін кешенді бағалауды қамтамасыз етеді және оның жұмысының тиімділігі мен экологиялылығын айқындайтын негізгі заңдылықтарды анықтауға мүмкіндік береді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

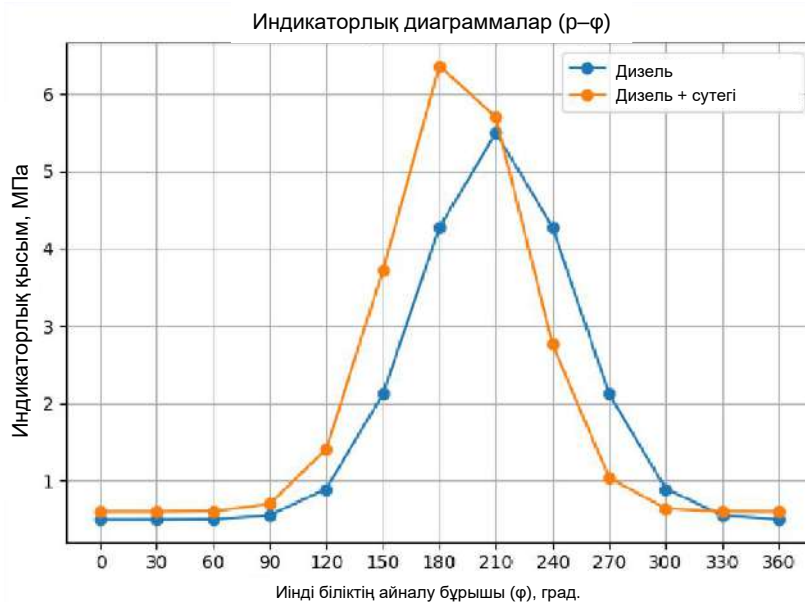
Жүргізілген теориялық талдау нәтижесінде дизельдік отынға сутегі қоспасын енгізу қозғалтқыш цилиндрінде тұтану сипаттамасына және жану процестеріне елеулі әсер ететіні анықталды. Неғұрлым елеулі өзгерістер тұтануды кідірту кезеңінде байқалады, ол дизельдің жұмыс процесінің өтуін айқындайтын негізгі параметрлердің бірі болып табылады.

Талдаулар көрсеткендей, сутегіні қосу дәстүрлі дизель отынымен жұмыс істеумен салыстырғанда тұтануды кідіртуді қысқартуға әкеледі. Бұл әсер сутегі белсенділігінің төмен энергиясына және оның жоғары химиялық белсенділігіне негізделген, бұл реакцияның бастапқы сатысында белсенді радикалдардың жедел пайда болуына ықпал етеді. Отын қоспасындағы сутегі үлесінің ұлғаюы кезінде (20-

50% дейін) индукциялық кезеңнің одан әрі азаюы байқалады, бұл жанудың ерте басталуына және жылу бөлудің фазалық бөлінуінің өзгеруіне алып келеді.

Жану жылдамдығын зерттеу отын қоспасында сутегінің болуы жалынның таралу жылдамдығының едәуір ұлғаюына ықпал ететінін көрсетті. Бұл химиялық реакциялардың неғұрлым қарқынды араласуын және жеделдеуін қамтамасыз ететін сутегінің жоғары диффузиялық қабілетіне және оның молекулалық салмағының аз болуына байланысты. Сутегі үлесінің 50% -ға дейін артуы кезінде жану жылдамдығының неғұрлым айқын өсуі байқалады, бұл жану процесінің неғұрлым қарқынды және біркелкі өтуіне алып келеді.

«Индикаторлық қысым - иінді біліктің бұрылу бұрышы» координаттарында ұсынылған индикаторлық диаграммалар сутегі қоспасының жұмыс процесінің өту сипатына елеулі әсерін көрсетеді (сурет 3). Құрамында сутегі бар отынды пайдалану кезінде иінді білік бұрылысының аз бұрыштары аумағына максималды қысымның ығысуы байқалады, бұл тұтануды кідіртудің қысқарғанын көрсетеді. Бұдан басқа, жану жылдамдығының артуына және жылу бөлу процесінің қарқындануына байланысты ең жоғары қысымның артуы байқалады. Нәтижесінде жану процесі неғұрлым жылдам өтеді және дәстүрлі дизель отынымен салыстырғанда жұмыс циклының неғұрлым ерте сатыларында аяқталады.



Сурет 3. Дизель отынымен және құрамында сутегі бар қоспамен жұмыс істеу кезіндегі р-φ координаттарындағы дизель қозғалтқышының индикаторлық диаграммалары

Сонымен қатар, отын қоспасындағы сутегі үлесінің ұлғаюы жанудың ең жоғары температурасының өсуімен қатар жүреді. Бұл фактор жану аймағындағы температураның ұлғаюымен қарқындылығы өсетін азот оксидінің (NO_x) пайда болу процестеріне елеулі әсер етеді. Осылайша, сутегі қоспаларын қолдану тиімділікті арттыру мен экологиялық жүктемені төмендету арасында ымыраға қол жеткізу мақсатында олардың үлесі мен жұмыс процесінің параметрлерін оңтайландыруды талап етеді.

Отын қоспасының әртүрлі құрамдарын салыстырмалы талдау көрсеткендей, сутегіні орташа қосу кезінде (шамамен 20%) тұтануды кідіртуді қысқартуды және жану температурасының салыстырмалы қалыпты өсуі кезінде жану жылдамдығын арттыруды қоса алғанда, оң әсерлердің неғұрлым ұтымды үйлесіміне қол жеткізіледі.

Сутегінің неғұрлым жоғары шоғырлануы кезінде (50% -ға дейін) оң әсерлер күшейеді, алайда экологиялық көрсеткіштердің нашарлау және қозғалтқыш элементтеріне термиялық жүктеменің арту қаупі артады.

Құрамында сутегі бар қоспаларды пайдалану кезінде жану жылдамдығының ұлғаюы химиялық реакциялардың да, диффузиялық процестердің де жеделдеуіне байланысты. Сутегі ламинарлық жалынның жоғары жылдамдығына ие бола отырып, тіпті салыстырмалы түрде аз қоспаларда да жану процесін қарқындатады. Бұл жылудың жылдам бөлінуіне және цилиндрдегі ең жоғары қысымның өсуіне әкеледі, бұл қозғалтқыштың индикаторлық ПӘК-інің ұлғаюына әлеуетті ықпал етеді.

Сутегінің әртүрлі үлестерін салыстырмалы талдау оны қосудың әсері желілік емес сипатта екенін көрсетті. Қалыпты шоғырланулар кезінде (шамамен 20%) тұтануды кідіртуді қысқартудың және температуралық параметрлердің шектеулі өсуі кезінде жану жылдамдығының артуының оңтайлы үйлесіміне қол жеткізіледі. Сутегі үлесінің одан әрі ұлғаюы кезінде (50 %-ға дейін) оң әсерлер күшейеді, алайда қозғалтқыш элементтеріне механикалық және жылу жүктемелерінің арту, сондай-ақ экологиялық көрсеткіштердің нашарлау тәуекелі артады.

Ұсынылған нәтижелер теориялық талдау және жалпыланған тәуелділіктер негізінде алынғанын атап өткен жөн, бұл оларды практикалық қолдануға белгілі бір шектеулер қояды. Дизель қозғалтқышы жұмысының нақты жағдайларында жану камерасының құрылымдық ерекшеліктері, отынды бүрку параметрлері, ағынның турбуленттігі және қоспаның біркелкі бөлінбеуі сияқты факторлар маңызды рөл атқарады. Сондықтан анықталған әсерлердің сандық сипаттамаларын нақтылау үшін эксперименттік зерттеулер қажет. Бұл ретте сутегінің тиімді қолдану отын қоспасының құрамын, жұмыс процесінің параметрлерін және шығарындыларды азайту жүйелерін оңтайландыруды қамтитын кешенді тәсілді талап етеді, бұл одан әрі зерттеулер үшін бағыттарды ашады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмыста сутегі қоспасының тұтану сипаттамасына және дизельді қозғалтқыштардағы жану жылдамдығына әсеріне теориялық талдау жүргізілді. Құрамында сутегі бар отын қоспаларын пайдалану тұтануды кідіртуді қысқартуды, жану жылдамдығын ұлғайтуды және цикл фазалары бойынша жылу бөлуді қайта бөлуді қоса алғанда, жұмыс процесі параметрлерінің елеулі өзгеруіне әкелетіні анықталды.

Сутекті қосу жоғары реакциялық қабілеттілік пен төмен белсендіру энергиясы есебінен тұтануды кідіртуді қысқартады, бұл жану процесін ертерек бастауды қамтамасыз етеді.

Құрамында сутегі бар қоспаларды пайдалану кезінде ең жоғары қысымның иінді білік бұрылысының аз бұрыштары аумағына ығысуы және оның ең жоғары мәнінің ұлғаюы байқалады.

Тиімділік пен экологиялық көрсеткіштердің арақатынасы тұрғысынан жағымсыз факторлардың едәуір өсуінсіз сипаттамалардың едәуір жақсаруын қамтамасыз ететін сутегінің қалыпты қоспасы (шамамен 20%) оңтайлы болып табылады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл мақала №AP22688234 «Маневрлік локомотивтердің пайдалану тиімділігін арттыру тәсілін әзірлеу» тақырыбы бойынша ҚР ҒжЖБМ-нің ғылыми зерттеулерін гранттық қаржыландыру жобасы шеңберінде дайындалды

АЛҒЫСТАР: Авторлар әріптестеріне әдістемелік қолдау көрсеткені және пайдалы талқылаулары үшін, сондай-ақ мақаланың сапасын жақсартуға ықпал еткен

құнды ескертулері үшін жасырын рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар мәліметтерді талдау барысында және мақала мәтініндегі орфографиялық қателерді тексеру үшін ChatGPT жасанды интелекті қолданды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Жасанды интелект Chat GPT 5.2 <https://chatgpt.com/>

Verhelst, S., & Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490–527. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>

White, C. M., Steeper, R. R., & Lutz, A. E. (2006). The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(10), 1292–1305. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>

Saravanan, N., & Nagarajan, G. (2010). An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(7), 3449–3460. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.074>

Lata, D. B., Misra, A., & Medhekar, S. (2012). Investigations on the combustion parameters of a dual fuel diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(1), 608–622. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.106>

Kumar, M. S., & Ramesh, A. (2003). Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fueled compression ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(10), 1143–1154. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00203-0](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00203-0)

Das, L. M. (2002). Hydrogen engine: Research and development (R&D) programs in Indian Institute of Technology, Delhi. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(9), 953–965. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00157-5](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00157-5)

Rakopoulos, C. D., Rakopoulos, D. C., & Giakoumis, E. G. (2008). Effects of hydrogen addition on the performance and emissions of diesel engines. *Energy Conversion and Management*, 49(11), 3118–3126. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.06.024>

Kumar, S., & Gupta, R. (2020). Hydrogen as a fuel for internal combustion engines. *Energy Reports*, 6, 315–321. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.069>

Verhelst, S. (2014). Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(2), 1071–1085. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.102>

Rahman, M. M., Mohammed, M. K., & Bakar, R. A. (2014). Effects of hydrogen addition on diesel engine performance and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1253–1262. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.006>

Yilmaz, I. T., Atmanli, A., & Ileri, E. (2017). Experimental investigation of hydrogen addition to diesel fuel on combustion and exhaust emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), 23358–23365. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.102>

Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W. I. F., & Bowen, P. J. (2018). Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

УДК 519.6

А.А. Байшанова^{1*}, А.К. Тураров¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Байшанова Айжан Алтаевна, e-mail: moonsoul_99@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье проводится анализ применения современных технологий искусственного интеллекта при решении дифференциальных уравнений посредством сравнения эффективности существующих методов искусственного интеллекта для вычисления уравнений с классическими методами, рассматриваются перспективы развития технологий искусственного интеллекта для решения задач, описываемых частными дифференциальными уравнениями. Основное внимание уделено физически-информированным нейронным сетям (PINNs), нейронным операторам, а также гибридным методам. Анализ показывает, что применение различных подходов искусственного интеллекта при решении математических задач обеспечивает более высокую точность аппроксимации решений при работе с задачами высокой размерности. Эффективность использования интеллектуальных систем для вычисления выражается в снижении времени вычисления, вычислительных затрат и ресурсоемкости по сравнению с традиционными методами.

Ключевые слова: искусственный интеллект в инженерии, перспективы развития, ИИ, дифференциальные уравнения, вычислительная математика с ИИ, нейронные операторы.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие искусственного интеллекта в последнее десятилетие подтверждает актуальность его применения не только в повседневной жизни, но и при решении задач в специализированных узких областях. Технологии искусственного интеллекта в последние годы приобрели существенное значение для научных и прикладных исследований, оказывая влияние на широкий спектр дисциплин, включая математическое моделирование, физику, биомедицину, инженерию и экономику. Одним из наиболее перспективных направлений является применение искусственного интеллекта для решения математических моделей, описываемых обыкновенными и частными дифференциальными уравнениями, которые служат фундаментальными инструментами для анализа динамических систем. Классические численные методы, такие как метод конечных разностей, метод конечных элементов и спектральные методы, показывают высокую эффективность для стандартных задач, однако при работе с высокоразмерными, нелинейными и многопараметрическими системами они часто сталкиваются с ограничениями по точности, масштабируемости и вычислительным затратам. В этих условиях современные ИИ-подходы открывают новые возможности для повышения точности и сокращения времени вычислений, что делает исследование актуальным, менее затратным и востребованным. Интерес к применению нейросетевых технологий для вычисления значительно возрос с появлением физически-информированных нейронных сетей (PINNs), которые в отличие от традиционных нейронных сетей включают в свою архитектуру математические формулы и физические законы, описывающие поведение моделируемой системы. Такие сети интегрируют физические законы в процесс обучения модели, что позволяет использовать ограниченные наборы данных при сохранении точности решений (Raissi et al., 2019). Наряду с PINNs активно развиваются нейронные операторы, позволяющие обучать модели отображения

между функциональными пространствами (Li et al., 2021). Кроме того, гибридные методы, сочетающие классические численные подходы и нейросетевые модели, позволяют сохранять интерпретируемость решений и обеспечивать устойчивость вычислений (Lu et al., 2021). Состояние научной литературы свидетельствует о значительном объеме проведенных исследований в этой области. Например, авторы (Raissi et al., 2019) представили физически информированные нейронные сети для решения дифференциальных уравнений в частных производных с различными граничными условиями, показав высокую точность. Также активно исследуются гибридные подходы, комбинирующие нейросетевые модели с методами конечных элементов и конечных разностей, что открывает перспективы для применения в инженерном моделировании.

Целью настоящего исследования является анализ ключевых ИИ-подходов для решения дифференциальных уравнений, проведение сравнительного анализа с классическими методами, оценка их эффективности для математического моделирования сложных динамических систем, также перспективы развития технологий искусственного интеллекта в контексте решения математических задач, представленных дифференциальными уравнениями. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Провести обзор некоторых существующих методов искусственного интеллекта для решения дифференциальных уравнений, включая PINNs, нейронные операторы и гибридные схемы.
2. Провести сравнительный анализ современных интеллектуальных подходов с традиционными методами.
3. Рассмотрение возможности интеграции с классическими численными методами, как перспективное направление дальнейшего развития искусственного интеллекта.

Объектами исследования служат современные методы применения искусственного интеллекта к задачам дифференциальных уравнений. В работе используются методы систематического обзора, сравнительного анализа публикаций, а также аналитической оценки преимуществ современных подходов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения дифференциальных уравнений с частными производными в настоящее время широко применяются классические численные методы, такие как метод конечных разностей, конечных элементов и конечных объемов. Однако развитие искусственного интеллекта, которое включает в себя в том числе применение различных методов искусственного интеллекта для решения дифференциальных уравнений и моделирования физических процессов, позволило создать новые возможности повышения вычислительной эффективности и масштабируемости при решении высокоразмерных и параметризованных задач. К вышеупомянутым методам вычислительного интеллекта для решения дифференциальных уравнений относят: физически-информированный искусственный интеллект (PINNs), нейронные операторы, гибридные схемы, объединяющие нейросетевые модели и классические численные методы, и другие.

Физически-информированные нейронные сети (Physics-Informed Neural Networks) возникли из экспериментов 1980–1990-х годов по использованию нейронных сетей для решения дифференциальных уравнений, когда было замечено, что сети могут аппроксимировать функции и их производные, но из-за ограниченной вычислительной мощности и простых архитектур их применение оставалось ограниченным. Настоящую популярность метод получил в 2017 году благодаря работам Raissi, Perdikaris и Karniadakis, которые формализовали концепцию обучения нейросети через минимизацию совместной функции потерь. Сегодня PINNs активно

развиваются и применяются в гидродинамике, аэродинамике, материаловедении и биофизике, включая расширенные версии вроде fPINNs, XPINNs и Inverse PINNs, а современные исследования сосредоточены на повышении устойчивости, точности и масштабировании на сложные и высокоразмерные задачи. Ключевое преимущество PINNs заключается в интеграции физических законов и граничных условий непосредственно в функцию потерь нейросети. Это позволяет получать высокоточные решения уравнений даже при ограниченном объеме обучающих данных, что особенно важно для задач с труднодоступными экспериментальными измерениями (Raissi et al., 2019). PINNs обеспечивают гибкость в выборе архитектуры и функций активации, что позволяет адаптировать модель под конкретную задачу.

Другой подход – это нейронные операторы, позволяющие одной обученной модели аппроксимировать целое семейство решений дифференциальных уравнений при различных начальных и граничных условиях (Li et al., 2021). Это значительно снижает необходимость повторного решения уравнений с нуля для каждой новой конфигурации задачи и сокращает время вычислений для высокоразмерных задач. Идея нейронных операторов возникла в конце 2010-х годов как развитие методов глубокого обучения для решения дифференциальных уравнений с частными производными. С тех пор развивались различные архитектуры, позволяющие аппроксимировать сам оператор, который преобразует входные функции, такие как начальные или граничные условия, в решения уравнения, что даёт возможность одному обученному оператору быстро выдавать решения для множества разных условий. В настоящее время современные нейронные операторы продолжают совершенствоваться и активно применяются для массового моделирования физических процессов, ускорения вычислений и решения обратных задач в инженерно-научном моделировании.

Гибридные схемы, сочетающие традиционные численные методы с нейросетевыми моделями, позволяют комбинировать преимущества обеих стратегий: надежность классических и адаптивность искусственного интеллекта. Такие подходы обеспечивают устойчивость решений и интерпретируемость результатов, но их реализация требует точного согласования алгоритмов численного решения с обучаемой моделью.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ряд исследований показывает, что при вычислении частных дифференциальных уравнений методы искусственного интеллекта снижают L2-норму ошибки и улучшают сходимость, повышая точность и вычислительную эффективность (Muthuswamy & Dilip, 2024). В частности, модели типа PINNs решают уравнение Бюргерса с ошибкой по L2-норме 0,050, тогда как традиционные численные методы демонстрируют ошибку порядка 0,120. Также в приведенных результатах исследований установлено, что данные методы позволяют повысить точность математического моделирования и эффективность решения высокоразмерных нелинейных частных дифференциальных уравнений (Muthuswamy & Dilip, 2024). Применение нейросетевых подходов расширяет возможности численно-аналитической теории в гидродинамике, финансовой математике и инженерных задачах, где часто встречаются сложные высокоразмерные модели. Полученные результаты также свидетельствуют о том, что методы машинного обучения способны преодолеть вычислительные ограничения при решении таких уравнений. Таким образом, нейросетевые методы решения демонстрируют более высокую вычислительную эффективность по сравнению с классическими численными методами и оказываются на порядки быстрее традиционных при тестировании на задачах Burgers, Darcy flow и Navier–Stokes (Kovachki et al., 2023). На рисунке 1 сравнивается ошибка в L2-норме классических численных методов и методов вычисления с применением искусственного

интеллекта, наглядно демонстрирующая повышенную точность последних при решении различных частных дифференциальных уравнений (Muthuswamy & Dilip, 2024). Подводя итог, методы искусственного интеллекта лучше аппроксимируют решения уравнений Бюргерса, Навье–Стокса и Пуассона, чем классические подходы, для всех типов дифференциальных уравнений.

Шкала на рисунке подчёркивает контраст между традиционными и интеллектуальными вычислительными методами, показывая, что последние существенно снижают ошибку при усложнении уравнения. Классические методы не способны воспроизвести сложные структуры решений в уравнениях Навье–Стокса и Пуассона, при этом величина ошибки превышает таковую у PINNs.

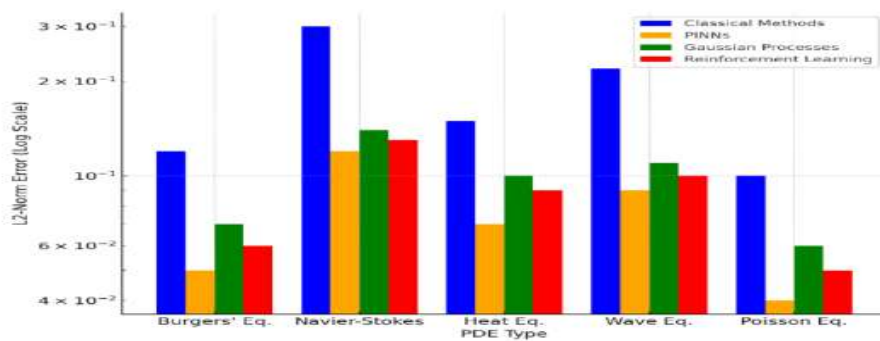


Рисунок 1. Ошибка в L2-норме для классических и нейросетевых методов

Таблица 1, сравнивающая применение традиционных численных методов с нейросетевыми методами для различных типов дифференциальных уравнений с частными производными, показывает различия в эффективности, особенно по мере увеличения размерности. PINNs решают уравнение Бюргерса за 9,80 секунд, тогда как классические численные методы требуют 15,20 секунд (Muthuswamy & Dilip, 2024).

В задачах с высокой размерностью, таких как уравнение Пуассона при размерности $d = 4$, преимущества в эффективности становятся особенно заметными. PINNs справляются за 25,40 секунд, тогда как традиционные подходы - за 75,20 секунд, что демонстрирует лучшее масштабирование методов машинного обучения при увеличении размерности.

Таким образом, классические методы требуют больше времени на вычисления с ростом размерности, тогда как решения на основе машинного обучения справляются с этой проблемой более надёжно. PINNs сокращают время вычислений в 1,5-2 раза для уравнений теплопроводности и волнового уравнения с умеренной размерностью ($d = 2$ и $d = 3$) по сравнению с классическими методами.

Таблица 1. Время вычислительное для различных методов

Тип дифференциальных уравнений с частными производными	Размерность пространства, (d)	Классический численный метод (с)	PINNs (с)
Уравнение Бюргерса	2	15,20	9,80
Навье-Стокса	3	40,50	20,50
Уравнение теплопроводности	2	10,80	7,60
Волновое уравнение	3	35,60	18,30
Уравнение Пуассона	4	75,20	25,40

Представленные данные в таблице подтверждают, что эффективность методов искусственного интеллекта в пространствах высокой размерности имеет ключевое значение при решении дифференциальных уравнений, где задачи с высокой размерностью вычислительно сложны.

Развитие технологий искусственного интеллекта открывает новые возможности для решения более сложных задач, ранее считавшихся труднодостижимыми с использованием классических численных методов. Дальнейшее совершенствование методов машинного обучения будет способствовать развитию математического моделирования и междисциплинарного взаимодействия при решении научных и инженерных задач. Перспектива применения технологий искусственного интеллекта, таких как физически-информированные нейронные сети (PINNs), нейронные операторы и других, заключается в их значительном потенциале для решения частных дифференциальных уравнений, особенно в задачах высокой размерности и с сильной нелинейностью, где классические численные методы теряют точность и становятся крайне ресурсоёмкими. Их способность аппроксимировать решения без строгой дискретизации области, учитывать сложные граничные условия и адаптироваться к изменениям параметров делает эти технологии гибкими и масштабируемыми инструментами для моделирования физических, инженерных и биологических систем. Кроме того, высокая вычислительная эффективность позволяет существенно сократить время решения, что открывает перспективу их применения в реальном времени и при ограниченных ресурсах. В долгосрочной перспективе сочетание с традиционными численными подходами позволит создавать гибридные модели, способные решать сложные нелинейные дифференциальные уравнения, способствовать автоматизации научных исследований и расширять возможности математического моделирования в различных областях науки и техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы современные технологии искусственного интеллекта для вычисления, такие как физически-информированные нейронные сети (PINNs), нейронные операторы, проведен сравнительный анализ подходов с классическими методами вычисления для решения частных дифференциальных уравнений в различных условиях.

Приведенные результаты численных экспериментов показали, что методы искусственного интеллекта существенно превосходят классические численные методы по точности, снижая ошибки в L2-норме, а также по вычислительной эффективности, сокращая время решения в 1,5 и более раз. Особенно высокие преимущества выявлены при решении нелинейных частных дифференциальных уравнений и задач с высокой размерностью, где традиционные методы сталкиваются с ограничениями. При этом было отмечено, что точность и сходимость интеллектуальных методов зависят от архитектуры нейронных сетей, выбора алгоритмов оптимизации.

Перспективы развития интеллектуальных методов для решения дифференциальных уравнений включают создание более устойчивых и адаптивных нейросетевых архитектур, объединение методов глубокого обучения с традиционными численными подходами для гибридного моделирования с целью повышения точности и надёжности. В долгосрочной перспективе такие подходы могут привести к ускорению математического моделирования сложных систем и расширению возможностей решения задач, недоступных классическим методам.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kovachki, N. B., Li, Z., Liu, B., Azizzadenesheli, K., Bhattacharya, K., Stuart, A. M., & Anandkumar, A. (2023). Neural operator: Learning maps between function spaces with applications to PDEs. *Journal of Machine Learning Research*, 24(89), 1–97.
- Li, Z., Kovachki, N., Azizzadenesheli, K., Liu, B., Bhattacharya, K., Stuart, A. M., & Anandkumar, A. (2021). Fourier neural operator for parametric partial differential equations. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR 2021)*. <https://arxiv.org/abs/2010.08895>
- Lu, L., Meng, X., Mao, Z., & Karniadakis, G. E. (2021). DeepXDE: A deep learning library for solving differential equations. *SIAM Review*, 63(1), 208–228. <https://doi.org/10.1137/19M1290288>
- Muthuswamy, V. V., & Dilip, D. (2024). Advanced machine learning techniques for efficient numerical solutions of nonlinear partial differential equations in high-dimensional spaces. *Mathematics for Applications*, 13(1), 52–77. <https://doi.org/10.13164/ma.2024.13104>
- Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
- Бабенко, К. И., & Тихонов, А. Н. (2021). Современные методы искусственного интеллекта в задачах математического моделирования. *Вычислительные технологии*, 26(4), 15–29.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ ГОРОДСКИХ АВТОБУСОВ

УДК 629.33:192

А.Б.Баталова^{1*}, М.С.Муздыбаев¹, W.K.Wieleba²

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

²Вроцлавский университет науки и технологии, г. Вроцлав, Республика Польша

*Автор-корреспондент: Баталова Алуа Бақытханқызы, e-mail: [vrupk@mail.ru]

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена актуальной проблеме обеспечения работоспособности элементов подвески городских автобусов в условиях интенсивной эксплуатации. Целью исследования является анализ современных методов диагностирования и технического обслуживания подвесок, а также разработка рекомендаций по повышению их надежности. В работе применены методы системного анализа, сравнительной оценки и обобщения научно-технической литературы. Выполнена классификация методов обеспечения работоспособности по признаку превентивности, точности диагностирования и возможности прогнозирования отказов. Рассмотрены особенности применения вибродиагностики, тензометрирования, тепловизионного контроля и акустико-эмиссионного метода для оценки технического состояния элементов пневматической и рессорной подвесок. Научная новизна исследования заключается в обосновании необходимости интеграции методов неразрушающего контроля с математическим моделированием напряженно-деформированного состояния элементов подвески. Практическая значимость работы состоит в разработке рекомендаций по выбору оптимальных методов диагностирования для различных типов подвесок городских автобусов, что позволяет повысить безопасность перевозок и снизить эксплуатационные затраты. Результаты исследования могут быть использованы автотранспортными предприятиями и службами технического обслуживания при планировании ремонтных воздействий.

Ключевые слова: подвеска автобуса, работоспособность, диагностирование, пневматическая подвеска, техническое обслуживание, безопасность движения, неразрушающий контроль, вибродиагностика, надежность, городской транспорт.

Введение

Современные городские автобусы являются основным видом общественного транспорта в крупных населённых пунктах Республики Казахстан. Интенсивность их эксплуатации достигает 250–300 тыс. км в год, что сопоставимо с работой магистральных автопоездов. Специфика городского режима движения — частые разгоны и торможения, неровные дорожные покрытия и значительные колебания загрузки салона — предъявляет повышенные требования к надежности и долговечности элементов ходовой части, прежде всего подвески [1, 2].

Подвеска городского автобуса выполняет ряд важных функций: обеспечивает плавность хода и комфорт пассажиров, гасит колебания кузова, передает вертикальные, продольные и поперечные нагрузки от колес на несущую систему и поддерживает необходимый дорожный просвет. Отказ элементов подвески может привести к ухудшению управляемости, снижению курсовой устойчивости, увеличению тормозного пути и, в отдельных случаях, к дорожно-транспортным происшествиям [3].

Анализ статистических данных показывает, что доля отказов подвески в структуре отказов ходовой части городских автобусов составляет 18–25%.

Значительная часть неисправностей связана с износом резинотехнических элементов (сайлентблоков, пневмобаллонов) и усталостным разрушением металлоконструкций [4, 5]. При этом система планово-предупредительных ремонтов не всегда позволяет своевременно выявлять зарождающиеся дефекты.

В связи с этим возникает необходимость совершенствования методов обеспечения работоспособности элементов подвески и перехода от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому техническому состоянию. Целью данного исследования является анализ и систематизация современных методов диагностирования элементов подвески городских автобусов и обоснование направлений их совершенствования.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Проанализировать типовые неисправности элементов подвески и причины их возникновения;
2. Классифицировать существующие методы контроля технического состояния;
3. Провести сравнительный анализ эффективности методов диагностирования;
4. Разработать рекомендации по выбору методов обеспечения работоспособности в зависимости от типа подвески и условий эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись элементы подвески городских автобусов большого класса (модели ЛиАЗ-5292, МАЗ-203, НефАЗ-5299), эксплуатирующихся на маршрутах г. Усть-Каменогорска. В качестве предмета исследования рассматривались методы контроля технического состояния следующих элементов: пневматические упругие элементы (баллоны), амортизаторы, реактивные штанги, сайлентблоки, стабилизаторы поперечной устойчивости.

В ходе исследования применялись следующие методы:

1. Системный анализ – для выявления взаимосвязей между условиями эксплуатации, характером нагружения и развитием дефектов в элементах подвески. Использован метод построения диаграмм Исикавы для идентификации причинно-следственных связей отказов.

2. Методы неразрушающего контроля:

- Вибродиагностика – анализ вибросигналов, снимаемых с элементов подвески в процессе движения. Использовался виброанализатор SVAN 958 (производство Svantek, Польша) с пьезоэлектрическими акселерометрами. Обработка сигналов выполнялась в спектральном анализаторе с вычислением пик-фактора, эксцесса и спектра огибающей.

- Тензометрирование – измерение деформаций в элементах подвески при статическом и динамическом нагружении. Применялись тензорезисторы КФ5П1-10-200-Б-12 с базой 10 мм и тензостанция Spider8 (HBM, Германия).

- Тепловизионный контроль – оценка температурных полей амортизаторов и подшипниковых узлов с использованием тепловизора Flir T620 (США).

- Акустико-эмиссионный метод – регистрация сигналов акустической эмиссии при зарождении и развитии трещин в металлоконструкциях. Использовалась система A-Line 32D (ООО «Интерюнис», Россия).

3. Методы математического моделирования – для оценки напряженно-деформированного состояния элементов подвески применялся метод конечных элементов в среде ANSYS Workbench. Моделирование выполнялось для характерных режимов нагружения: максимальная вертикальная нагрузка, торможение, поворот.

4. Статистические методы – обработка данных о наработке на отказ, определение законов распределения ресурса элементов, расчет показателей

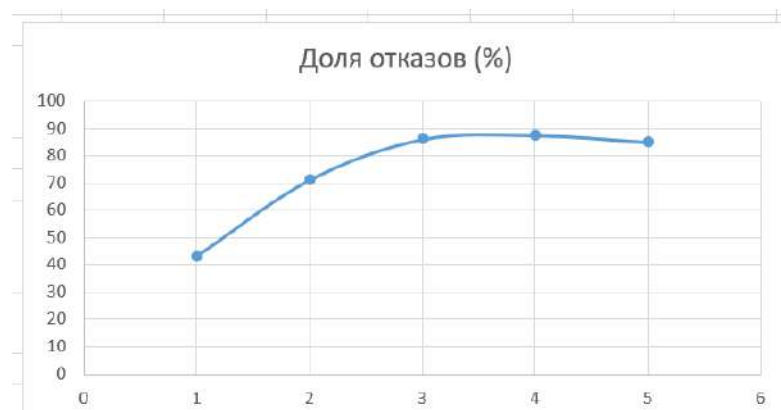
надежности. Использовались методы регрессионного и корреляционного анализа в пакете Statistica 12.

Экспериментальные исследования проводились в условиях автотранспортного цеха ТОО «РОСТ» и на базе лаборатории «Транспортная техника» ВКТУ им. Д. Серикбаева. Все измерения выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51709-2001 «Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа эксплуатационных данных за период 2023–2025 гг. была установлена структура отказов элементов подвески городских автобусов (рисунок 1).

Распределение отказов элементов подвески городских автобусов по видам неисправности



- 1) Шарниры и тяги
- 2) Пневмоэлементы
- 3) Втулки стабилизаторы
- 4) Амортизаторы
- 5) Рессоры

Рисунок 1 Распределение отказов элементов подвески городских автобусов по видам неисправностей

Анализ полученных данных показывает, что наибольшую долю отказов составляют резинотехнические элементы (пневмобаллоны и сайлентблоки) – суммарно 52%. Это объясняется естественным старением материалов, воздействием агрессивных сред (реагенты, масла), а также циклическими нагрузками. Амортизаторы выходят из строя преимущественно из-за утечек рабочей жидкости и износа клапанной системы.

Наиболее информативным методом раннего обнаружения дефектов является акустическая эмиссия, позволяющая фиксировать процессы зарождения трещин на стадии, когда визуально дефект еще не различим. Однако высокая стоимость оборудования и необходимость специальной подготовки оператора ограничивают применение этого метода в условиях рядовых автотранспортных предприятий.

Вибродиагностика показала себя как оптимальный метод для массового контроля, позволяющий с достаточной точностью (75–85%) выявлять до 70% характерных неисправностей подвески. Особенно эффективен анализ спектра вибрации в области высоких частот (2–10 кГц), где проявляются дефекты подшипниковых узлов и шарнирных соединений.

Тепловизионный контроль наиболее эффективен для диагностики амортизаторов – разница температур исправного и неисправного амортизатора после 20 минут работы достигает 15–20°С, что надежно фиксируется тепловизором.

Сравнительный анализ эффективности различных методов диагностирования представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов диагностирования элементов подвески

Метод диагностирования	Выявляемые дефекты	Точность, %	Трудоемкость, чел.-ч	Возможность прогнозирования	Необходимость спец. оборудования
Визуальный осмотр	Наружные повреждения, трещины, деформации	45–60	0,3–0,5	Нет	Нет
Вибродиагностика	Люфты, износ шарниров, дисбаланс	75–85	0,8–1,2	Да	Высокая
Тензометрирование	Остаточные деформации, перегрузки	80–90	2,0–3,0	Да (при циклических испытаниях)	Высокая
Тепловизионный контроль	Перегрев амортизаторов, подшипников	70–80	0,4–0,6	Частично	Средняя
Акустическая эмиссия	Зарождающиеся трещины	85–95	1,5–2,0	Да	Очень высокая
Диагностика на стенде	Комплексная проверка состояния подвески	70–85	1,0–1,5	Нет	Средняя

Важным результатом исследования является установление корреляционной зависимости между уровнем вибрации и остаточным ресурсом сайлентблоков (коэффициент корреляции $R^2 = 0,82$). Это позволяет перейти от констатации факта отказа к прогнозированию остаточного ресурса и планированию ремонтных воздействий.

Математическое моделирование методом конечных элементов позволило определить зоны концентрации напряжений в реактивных тягах и кронштейнах подвески (рисунок 2).

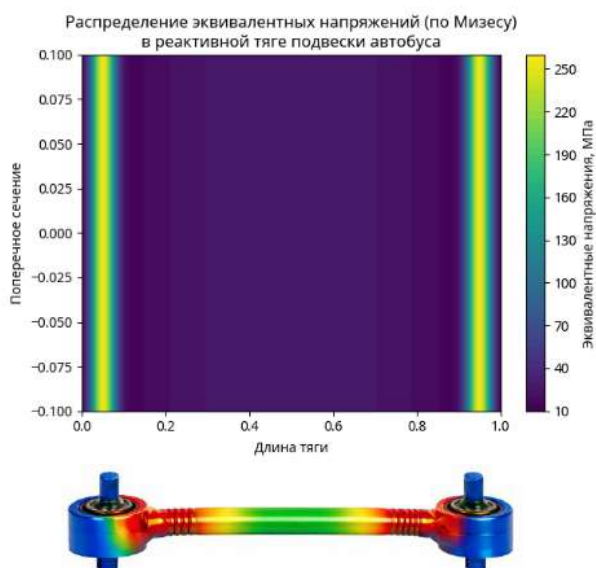


Рисунок 2. Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в реактивной тяге подвески автобуса

Моделирование показало, что максимальные напряжения (до 180 МПа) возникают в местах крепления сайлентблоков и в зонах резкого изменения сечения.

Эти зоны являются наиболее вероятными местами зарождения усталостных трещин и требуют первоочередного контроля при диагностировании.

Полученные результаты позволяют предложить дифференцированный подход к выбору методов диагностирования в зависимости от типа элемента и условий эксплуатации:

1. Для пневмобаллонов – приоритетным является визуальный контроль и проверка герметичности с помощью мыльного раствора или течеискателей. Дополнительно может использоваться контроль давления в системе подвески в статике и динамике.

2. Для сайлентблоков – наиболее эффективна вибродиагностика с анализом спектра колебаний подвески. Характерным признаком износа является появление пиков на частотах 150–300 Гц.

3. Для амортизаторов – оптимально сочетание тепловизионного контроля и проверки на стенде (снятие характеристики). Температурный критерий позволяет выявлять до 80% неисправностей без демонтажа.

4. Для металлоконструкций (реактивные тяги, рычаги, кронштейны) – рекомендуется сочетание методов неразрушающего контроля: визуально-измерительный, капиллярный (цветная дефектоскопия) и акустическая эмиссия при подозрении на наличие усталостных трещин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были решены все поставленные задачи и достигнута цель работы. Основные выводы и результаты заключаются в следующем:

1. Установлено, что наиболее уязвимыми элементами подвески городских автобусов являются резинотехнические изделия (пневмобаллоны и сайлентблоки), на долю которых приходится более 50% всех отказов. Это обусловлено как естественным старением материалов, так и воздействием неблагоприятных эксплуатационных факторов.

2. Выполнен анализ результатов моделирования концентрации напряжений в деталях методом МКЭ, определены критические прочностные сечения.

3. Выполнена классификация методов обеспечения работоспособности элементов подвески, включающая методы контроля (визуальный, инструментальный), методы диагностирования (вибраакустический, тензометрический, тепловизионный) и методы прогнозирования технического состояния.

4. Проведен сравнительный анализ эффективности различных методов диагностирования, показавший, что наибольшей информативностью обладает акустико-эмиссионный метод (точность 85–95%), однако для массового применения в автотранспортных предприятиях наиболее рациональным является вибродиагностика, позволяющая выявлять до 70% неисправностей с приемлемыми затратами.

5. Разработаны практические рекомендации по выбору методов диагностирования для различных типов элементов подвески, учитывающие их конструктивные особенности, характерные дефекты и условия эксплуатации.

Научная новизна исследования заключается в обосновании необходимости интеграции методов неразрушающего контроля с математическим моделированием напряженно-деформированного состояния элементов подвески, что позволяет перейти от системы планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому техническому состоянию.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенные рекомендации могут быть использованы автотранспортными предприятиями для

оптимизации системы технического обслуживания городских автобусов, что позволит повысить безопасность перевозок, снизить эксплуатационные затраты и увеличить коэффициент технической готовности подвижного состава.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой математической модели прогнозирования остаточного ресурса элементов подвески на основе комплексирования данных вибродиагностики и результатов моделирования методом конечных элементов, а также созданием рекомендаций по внедрению систем мониторинга технического состояния в реальном времени.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках докторской диссертации Баталовой А.Б. по специальности 8D07104 – Транспорт, транспортная техника и технологии. Финансирование осуществлялось за счет средств Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP 19678945 «Разработка методов повышения надежности ходовой части городских автобусов»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барашков, А.А., Ляшенко, М.В. (2023). Диагностирование подвески автотранспортных средств вибрационным методом. Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника, 5, 12–18.
2. Власов, Ю.А., Титов, Н.В. (2022). Анализ причин отказов элементов подвески автобусов в условиях городской эксплуатации. Вестник СибАДИ, 19(3), 344–355.
[<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-344-355>]
(<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-344-355>)
3. Ларин, О.Н., Батищев, А.В. (2023). Применение методов неразрушающего контроля для оценки технического состояния ходовой части автотранспортных средств. Мир транспорта, 21(2), 28–36. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-3>
4. Andersen, E., & Pedersen, M. (2023). Vibration-based condition monitoring of bus suspension systems. Journal of Mechanical Engineering, 69(4), 215–226.
<https://doi.org/10.5545/sv-jme.2022.123>
5. Gapinski, D., & Wieczorek, A. (2024). Application of acoustic emission method for detection of fatigue cracks in suspension components of heavy vehicles. Engineering Failure Analysis, 156, 107845.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107845>
6. Kowalski, K., & Nowak, P. (2022). Thermal imaging diagnostics of shock absorbers in city buses. Diagnostyka, 23(1), 1–8.
<https://doi.org/10.29354/diag/145678>
7. Li, Y., Zhang, J., & Wang, H. (2023). Finite element analysis and fatigue life prediction of bus suspension components. International Journal of Automotive Technology, 24(3), 789–801. [<https://doi.org/10.1007/s12239-023-0065-z>]
z](<https://doi.org/10.1007/s12239-023-0065-z>)
8. Wieleba, W. (2024). Tribological aspects of polymer composites in automotive suspension systems. Wrocław: Publishing House of Wrocław University of Science and Technology, 218 p.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНОГО ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

УДК 669.21:669.5:622.7

А.Р. Берікбосын^{1*}, Р.А. Рамазанова¹

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

*Автор-корреспондент: Берікбосын Аңсар Райымбекұлы,
e-mail: alpyssovaaidana.23@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены современные методы переработки упорного золотосодержащего сырья с учётом роста доли трудноизвлекаемых руд. Проанализированы основные технологии: гравитационное и флотационное обогащение, а также гидрометаллургическое выщелачивание с предварительным окислением. Установлено, что исследуемая руда характеризуется преобладанием кварца и алюмосиликатов при содержании золота 1,6 г/т. Показано, что гравитационное обогащение эффективно для извлечения свободного золота, а флотация позволяет дополнительно извлекать золото, связанное с сульфидами. Обоснована эффективность комбинированной схемы с последующим окислительным цианированием, обеспечивающей повышение извлечения золота. Отмечена перспективность применения современных гидрометаллургических технологий и методов искусственного интеллекта для оптимизации процессов и снижения затрат.

Ключевые слова: искусственный интеллект, упорное золотосодержащее сырьё, переработка руд, гравитационное обогащение, флотация; гидрометаллургическое выщелачивание, труднообогатимые руды.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие золоторудной промышленности Казахстана сопровождается рядом существенных проблем, ключевой из которых является ухудшение качественного состава золотосодержащего сырья. По данным исследований, более 50% запасов золота в стране относятся к категории трудноизвлекаемых или экономически неактивных, что существенно снижает потенциал отрасли и усложняет поддержание стабильного уровня добычи [1-3]. Дополнительным ограничивающим фактором выступает сокращение ресурсной базы за счет истощения высококачественных месторождений, особенно россыпных. Наблюдается устойчивая тенденция снижения объемов добычи золота из россыпей, обусловленная как снижением содержания металла в сырье, так и ухудшением горно-геологических и экономических условий их разработки [4,5]. При этом структура разработки золоторудных месторождений, как правило, включает двухстадийную выемку запасов: на первом этапе отрабатываются богатые руды, на втором — бедные и труднообогатимые, что требует внедрения более эффективных технологий переработки [6].

Несмотря на имеющиеся достижения, решение задачи комплексной переработки низкосортного сырья и накопленных отходов сдерживается недостаточной изученностью процессов извлечения золота из подобных материалов [7-10]. В этой связи существенные изменения претерпевает и сырьевая база золотодобывающей промышленности: наряду с традиционными рудами в переработку вовлекаются месторождения с различной долей сланцевых составляющих и тонковкрапленным золотом, равномерно распределённым в минеральной массе. Это обуславливает необходимость применения эффективных технологических методов переработки,

среди которых основными являются гравитационное и флотационное обогащение, а также выщелачивание с предварительным окислением [11,12].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются процессы переработки упорного золотосодержащего сырья, включающие гравитационное, флотационное обогащение и гидрометаллургическое выщелачивание, а предметом — технологические параметры этих процессов и их влияние на извлечение золота из труднообогатимых руд и техногенных образований.

Методологическую основу составили системный анализ, сравнительная оценка технологических схем и анализ литературных и экспериментальных данных. Эффективность процессов рассматривалась через совокупность входных параметров (содержание и форма золота, минералогический состав, гранулометрия, степень окисленности, а также режимные параметры: крупность, pH, температура, время, соотношение Т:Ж и расход реагентов) и выходных показателей (степень извлечения, качество продуктов и технологическая эффективность).

Исследование включало сбор и анализ данных, выявление ключевых факторов и сравнительную оценку методов переработки с использованием обобщения и графической интерпретации зависимостей. Особое внимание уделено учёту минералого-технологических особенностей сырья, определяющих выбор и комбинирование методов переработки для повышения извлечения золота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Гравитационное обогащение основано на различии плотностей минералов. Золото имеет высокую плотность ($\sim 19,3 \text{ г/см}^3$), поэтому эффективно извлекается в процессах отсадки, шлюзования, концентрации на столах и в центробежных концентраторах.

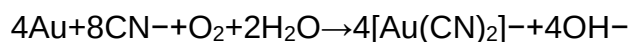
Метод наиболее эффективен для: крупного и среднего свободного золота; слабосвязанного золота в рыхлых рудах. Преимущества: низкие затраты; экологичность; простота реализации. Недостатки: низкая эффективность для тонкого ($< 0,05 \text{ мм}$) золота; потери при сложной минералогии.

2. Флотация применяется для извлечения золота, ассоциированного с сульфидными минералами (пирит, арсенопирит). Процесс основан на различии смачиваемости частиц. Суть процесса: измельчённая руда обрабатывается реагентами; гидрофобные частицы прилипают к пузырькам воздуха; формируется пенный продукт (концентрат).

Преимущества: эффективно для тонковкрапленного золота; извлечение золота вместе с сульфидами. Недостатки: чувствительность к реагентному режиму; необходимость последующей переработки концентрата.

3. Выщелачивание золота (с предварительным окислением). Выщелачивание (чаще всего цианирование) - основной метод переработки бедных и упорных руд. Для упорных руд требуется предварительное окисление: автоклавное; бактериальное; окислительный обжиг.

После этого золото переводится в раствор:



Преимущества: высокая степень извлечения (до 90–95%); подходит для бедных руд. Недостатки: длительность процесса; использование токсичных реагентов; сложность переработки упорных руд. В таблице 1 представлено краткое сравнение данных методов.

Таблица 1. Краткое сравнение методов

	Лучше всего подходит для	Извлечение
Гравитация	Крупное свободное золото	60–90%
Флотация	Тонкое золото в сульфидах	70–90%
Выщелачивание	Бедные и упорные руды	85–95%

Технологическая проба руды была подготовлена по стандартной методике с обеспечением представительности. Исходный материал крупностью до 2 мм подвергался стадийному дроблению до класса $-0,071+0$ мм с последующим перемешиванием, усреднением и сокращением методом квартования. Отобранные навески направлялись на технологические и аналитические исследования, остаток пробы помещался в резерв.

После усреднения были сформированы пробы следующего назначения: 5 кг - для ситового анализа и определения распределения золота по классам крупности; 5 кг - для изучения физических свойств и измельчаемости; 2 кг - для доизмельчения до 100 % класса $- 0,04$ мм и проведения пробирного, химического, рентгенофазового, рентгенофлуоресцентного и минералогического анализов; 70 кг - для гравитационного обогащения; 70 кг - для флотационных испытаний; 5 кг - для агитационного цианирования.

Для определения химического состава проб, в первую очередь был выполнен рентгенофлуоресцентный анализ, результаты которого представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа

Руда			
элемент	%	элемент	%
O	46,97	Ti	0,15
F	0,093	V	0,005
Na	0,859	Cr	0,011
Mg	0,435	Mn	0,009
Al	6,742	Fe	1,387
Si	27,632	Cu	0,006
P	0,071	As	0,689
S	0,123	Rb	0,021
Cl	0,017	Sr	0,015
K	3,279	Zr	0,013
Ca	0,354	Ba	0,058

Из данных таблицы видно, что основная массовая доля элементного состава приходится на кислород и кремний, что характерно для кварца SiO_2 . Также в пробе присутствует заметное количество алюминия.

Рентгенофазовый анализ также показал существенные различия в составе проб руды. Данные анализов отображены в таблице 3.

Результаты рентгенофазового анализа, также указывают на преобладание в

пробе руды кварца 53,4%, также обнаружено содержание минерала микроклина – 31,0 %, мусковита 2М1 – 8,9 %, альбита – 6,6 %.

Таблица 3. Рентгенофазовый анализ пробы руды

Наименование	Формула	S-Q
Кварц (синтетический)	SiO_2	53,5
Микроклин	KAlSi_3O_8	31,1
Мусковит	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	8,8
Альбит	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	6,7

Пробирным и атомно-абсорбционным анализом установлено, что в исходной пробе руды содержание золота составляет 1,6 г/т.

Физические свойства пробы руды. Определены физические свойства исходной пробы руды: плотность, насыпной вес, содержание металлизированной части.

Результаты расчетов по определению физических свойств проб руды приведены в таблице 4.

Таблица 4. Физико-механические свойства пробы руды

Наименование параметров	Единица измерения	Руда
Плотность	г/см ³	2,6
Насыпной вес	г/см ³	1,410
Содержание металлической части	%	0,76
pH		8,10

Проведенные ранее эксперименты по выщелачиванию золота из исследуемой пробы руды, продемонстрировали эффективность применения предварительных процессов обогащения для получения концентратов.

Учитывая, тот факт, что выщелачивание хвостов не дает должного прироста концентрации золота в растворе, их решено было подвергнуть дополнительному флотационному обогащению. Получаемый в процессе флотации концентрат далее объединять с концентратом гравитационного обогащения и уже на объединенном продукте обогащения проводить окислительное выщелачивание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования установлено, что эффективная переработка упорного золотосодержащего сырья требует применения комбинированных технологий с учётом минералого-технологических особенностей руды. Показано, что гравитационное обогащение эффективно для извлечения свободного золота, однако при тонком вкраплении его эффективность снижается, что компенсируется дополнительным флотационным обогащением хвостов.

Наибольшая эффективность достигается при объединении гравитационного и флотационного концентратов с последующим окислительным цианированием, что обеспечивает повышение извлечения золота. Современные технологии, включая гидрометаллургические методы, позволяют вовлекать в переработку бедные руды и отходы, а применение методов искусственного интеллекта способствует оптимизации процессов, повышению извлечения и снижению затрат.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы автора.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает признательность научному руководителю за консультационную поддержку.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке рукописи использовались инструменты искусственного интеллекта для структурирования текста и языкового редактирования. Окончательная научная интерпретация и ответственность за содержание статьи принадлежат автору.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Michael L. Adams (ed.). Gold Ore Processing: Project Development and Operations. – 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2016. – 1040 p.
- Fathi Habashi. Extractive Metallurgy of Gold. – New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1980. – 457 p.
- John O. Marsden, C. Iain House. The Chemistry of Gold Extraction. – 2nd ed. – Littleton: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2006. – 651 p.
- E. K. Yannopoulos. The Extractive Metallurgy of Gold. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. – 274 p.
- World Gold Council. Gold Demand Trends Reports. – 2022–2024. – URL: <https://www.gold.org>
- US Geological Survey. Mineral Commodity Summaries: Gold. – Washington, 2023–2025. – URL: <https://www.usgs.gov>
- G. Deschênes. Leaching of gold from refractory ores and concentrates // *Minerals Engineering*. – 2005. – Vol. 18. – P. 126–135.
- C. A. Fleming, K. B. Brown. Cyanide Leaching of Gold // *Hydrometallurgy*. – 1990. – Vol. 24. – P. 1–21.
- J. J. Groenewald. Heap leaching of gold ores // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2010. – Vol. 110. – P. 183–190.
- АО «НАК «Казатомпром» (ред.). Минерально-сырьевая база Казахстана: состояние и перспективы развития. – Астана, 2020.
- Комитет геологии и недропользования Республики Казахстан. Государственный баланс запасов полезных ископаемых РК. – Астана, 2022.
- R. G. Ritchie. The kinetics of gold dissolution in cyanide solutions // *Hydrometallurgy*. – 1994. – Vol. 34. – P. 1–21.

ПАССИВТІ КҮН СӘУЛЕЛІ БҮР КЕПТІРГІШІНІҢ КОНСТРУКЦИЯСЫН НЕГІЗДЕУ

ӘОЖ 621.8

Ж.А. Ботанова^{1*}, С.Д.Капаева¹, Д.Ш. Ибрахимов²

¹Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қаласы, Қазақстан Республикасы

² №75 Школа - гимназия, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы

*Автор-корреспондент: Ботанова Жанерке Алтайбекқызы, e-mail: zh.botanova@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Орман шаруашылығында қылқан жапырақты бүрлерді кептіру кезінде тұқымның өміршеңдігін сақтау — басты талап болып саналады. Электрлік кептіргіштердің жоғары температурасы (50-70°C) ақуыздардың денатурациясына әкелсе [1, 2]. Ал, пассивті күн қондырғылары микроклиматты тұрақты ұстай алмайды. Бұл өз кезегінде зең саңырауқұлағының дамуына әкеледі. [3]. Жұмыста құбыр биіктігін өзгерткен кезде табиғи конвекцияға байланысты температураны реттеуге мүмкіндік беретін күн сәулелі кептіргіштің конструкциясы ұсынылады. Яғни, ауа ағыны жылдам болған кезде температура төмендейді. Қабырғаның үш қабатты құрылымы (сырты — мырышталған болат 1 мм, ортасы — пенофол 8 мм, іші — қара флис 2 мм) салыстырмалы талдау негізінде таңдалды. Камера өлшемдері (800×500×450 мм) бүрлердің көлемдік тығыздығына (300 кг/м³) сәйкес алынды. Ауа кіру тесіктерінің жалпы ауданы 0,1386 м², ал құбыр диаметрі 100 мм, биіктігі 0,3-0,8 м аралығында реттеледі. Жүргізілген есептеулер күн радиациясының энергиясы жылу шығынын және ылғал булануын өтейтінін, табиғи тартым күші 0,254 Па, ауа шығыны 0,00522 м³/с болатынын көрсетті. Ұсынылып отырған қондырғы электр энергиясын тұтынбайды және тұқым өміршеңдігін 90-95% деңгейінде сақтауға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: күн кептіргіші, пассивті кептіру, конструкциялық материалдар, табиғи конвекция, негіздеу.

КІРІСПЕ

Қазақстанның орман шаруашылығында қылқан жапырақты ағаштардың тұқымдарын дайындау — орман ресурстарын қалпына келтірудің маңызды шарты. Бүрлерді кептіру процесінің тиімділігі тұқым сапасына тікелей әсер етеді. Қазіргі қолданыстағы электрлік кептіргіштерде температура 50-70°C аралығында болады, бұл тұқым ақуыздарының денатурациясына және өнгіштіктің 20-40%-ға төмендеуіне әкеледі [1, 2]. Пассивті күн кептіргіштері энергия тұтынбайды, бірақ олардың жұмыс режимі атмосфералық факторларға тәуелді: ашық күндері температура 55°C-қа дейін көтеріліп, ылғалдылықтың реттелмеуі бүрлердің зеңденуіне әкеледі [3].

Құбыр (түтін мұржасы) арқылы табиғи конвекцияны күшейту арқылы камерадағы температураны реттеуге болады. Құбыр биіктігі өзгергенде тартым күші де өзгереді, бұл ауа ағынының жылдамдығын, демек камерадағы температураны басқаруға мүмкіндік береді [4, 5]. Ауа кіру тесіктерінің ауданы мен орналасуы да кептіру процесінің тиімділігіне айтарлықтай әсер етеді [6].

Жұмыстың мақсаты — құбыр биіктігін өзгерту арқылы температураны реттеуге мүмкіндік беретін, электр энергиясын тұтынбайтын пассивті күн сәулелі кептіргіштің конструкциясын негіздеу.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

1. КОНСТРУКЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДЫ ТАҢДАУ

Қабырға үш қабатты етіп жобаланды. Әр қабаттың материалы таңдалғанда оның механикалық беріктігі, жылу өткізгіштігі, ылғалға төзімділігі, коррозияға төзімділігі және қолжетімділігі ескерілді.

Сыртқы қабат — қорғаныш әрі тірек қабаты. Мырышталған болат ($\delta=1$ мм, ГОСТ 14918-80), алюминий ($\delta=1$ мм) және поликарбонат ($\delta=3$ мм) салыстырылды. Алюминий жылу өткізгіштігі жоғары ($200 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) болғандықтан қосымша жылу оқшаулауды қажет етеді, сонымен қатар механикалық беріктігі төмен. Поликарбонаттың жылу кеңею коэффициенті ($65\cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) жоғары, сыртқы ортада қолдануға жарамсыз. Мырышталған болаттың беріктік шегі 300-400 МПа, мырыш қабаты (8-12 мкм) коррозиядан сенімді қорғайды. Осы ақпараттарға сүйене отырып, мырышталған болат таңдалды.

Жылу оқшаулағыш қабат – камера ішіндегі жылуды сыртқа шығармау үшін.

Пенофол ($\delta=8$ мм, $\lambda=0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), минералды мақта ($\delta=20$ мм, $\lambda=0,045 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) және пенополистирол ($\delta=15$ мм, $\lambda=0,035 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) салыстырылды. Минералды мақта гидрофильді, ылғалды ортада жылу өткізгіштігі артады, сонымен қатар бу өткізеді. Пенополистирол жанғыш (Г4 тобы) және жанып жатқанда улы заттар бөледі. Пенофол төмен жылу өткізгіштікке ие, бу өткізбейді, ылғалға төзімді, алюминий фольга қабаты жылуды қосымша шағылыстырады (шағылыстыру коэффициенті $\rho=0,95-0,97$). 8 мм қалыңдық пенофолдың стандартты өлшемі болып табылады [7].

Ішкі жылу сіңіргіш қабат — күн радиациясын сіңіріп, жылуға айналдыру үшін. Қара флис ($\delta=2$ мм, $\alpha=0,95-0,97$), қара бояу ($\alpha=0,85-0,90$) және қара мата ($\alpha=0,90$) салыстырылды. Қара бояудың жылу сіңіру коэффициенті төмен және уақыт өте тозады. Қара мата ылғал сіңіріп, көгеруі мүмкін. Қара флистің жылу сіңіру коэффициенті ең жоғары ($\alpha=0,95-0,97$), ол ылғал сіңірмейді (гидрофобты), көгермейді, кеуекті құрылымы арқылы ауамен жанасу ауданын 15-20 есе арттырады, бұл конвективті жылу алмасуды жақсартады [8].

Кесте 1. Қабырғаның нақты құрылымы

Қабат	Материал	Қалыңдығы, мм	Қызметі
Сыртқы	Мырышталған болат	1	Қорғаныс, беріктік
Ортаңғы	Пенофол	8	Жылу оқшаулау
Ішкі	Қара флис	2	Жылу сіңіру ($\alpha=0,95$)

2. КЕПТІРУ КАМЕРАСЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН НЕГІЗДЕУ

2.1 Камера өлшемдері

Камера өлшемдері бір циклде өңделетін бүрлердің массасына (8-10 кг) негізделген. Қылқан жапырақты бүрлердің орташа көлемдік тығыздығы $300 \text{ кг}/\text{м}^3$ [8]. 10 кг бүрге қажетті көлем:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{10}{300} = 0,33 \text{ м}^3 = 33\,000 \text{ см}^3$$

Науаның ауданы ($64 \times 48 = 3072 \text{ см}^2$) негізінде қажетті биіктік:

$$h = \frac{33\,000}{3\,072} = 10,7 \text{ см}$$

12 см науа биіктігі жеткілікті. Ауаның біркелкі таралуы үшін алдыңғы жағында 1

см, бүйірлерінде 1 см, артында 15 см бос орын қалдырылады [8]. Осы негізде камераның сыртқы өлшемдері: ұзындығы 800 мм, ені 500 мм, биіктігі 450 мм деп қабылданды (сурет 1).

Жарық өткізгіш құрылымдық материалдар

Күн сәулесінің камера ішіне барынша өтуін қамтамасыз ету үшін үстіңгі қақпақ және бүйір қабырғалардың жоғарғы бөлігі жарық өткізгіш материалдан жасалады. Осы элементтерге қойылатын негізгі талаптар: жоғары жарық өткізгіштік, жылу өткізгіштіктің төмендігі, механикалық беріктік, ультракүлгін сәулелерінің әсеріне төзімділік және сыртқы ортада ұзақ мерзімділік.

Салыстыруға полиакрил (органикалық шыны, $\delta=4$ мм), силикатты шыны ($\delta=4$ мм) және поликарбонат ($\delta=4$ мм) алынды. Олардың негізгі көрсеткіштері 3-кестеде келтірілген.

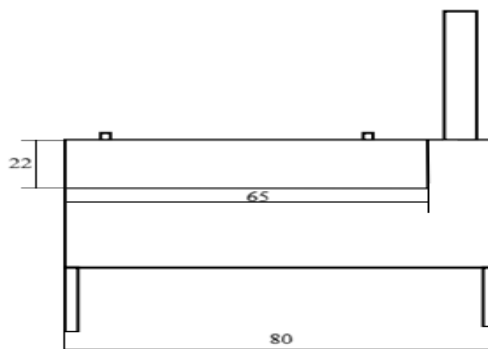
Кесте 2. Жарық өткізгіш құрылымдық материалдардың салыстырмалы сипаттамасы

Көрсеткіш	Полиакрил	Силикатты шыны	Поликарбонат
Жарық өткізгіштік коэффициенті, τ	0,88–0,92	0,85–0,90	0,82–0,88
Жылу өткізгіштік, λ , Вт/(м·К)	0,20	1,05	0,19
Тығыздық, кг/м ³	≈1200	≈2500	≈1200
Соққыға төзімділік	жоғары	төмен (сынғыш)	өте жоғары
УК-сәулеге төзімділік	жоғары	жоғары	орташа (уақыт өте бұлттанады)
Термиялық кеңею коэффициенті, 10^{-6} K^{-1}	70	9	65
Өңделу мүмкіндігі (кесу, бұрғылау)	оңай	қиын (арнайы құрал қажет)	оңай

Силикатты шыны жоғары жылу өткізгіштікке ие ($\lambda=1,05$ Вт/(м·К)), бұл камера ішіндегі жылудың сыртқа шығуын арттырады, сонымен қатар механикалық беріктігі төмен, сынғыш келеді. Поликарбонаттың жылу өткізгіштігі полиакрилге жақын, бірақ ультракүлгін сәулелерінің әсерінен бірнеше жыл ішінде бұлттанып, жарық өткізгіштігі төмендейді [13]. Сонымен қатар, поликарбонаттың термиялық кеңею коэффициенті ($65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) мырышталған болатпен ($12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) үйлесуі қиынырақ.

Полиакрил жоғары жарық өткізгіштікке ($\tau=0,92$) ие, жылу өткізгіштігі төмен ($\lambda=0,20$ Вт/(м·К)), механикалық беріктігі жеткілікті, УК-сәулеге төзімді, сыртқы ортада ұзақ мерзімге қызмет етеді. 4 мм қалыңдық құрылымдық беріктікті қамтамасыз етеді және күн радиациясының өтуіне кедергі келтірмейді. Полиакрилдің термиялық кеңею коэффициенті ($70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) корпустың мырышталған болатымен ($12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) үйлесімділігін ескере отырып, қақпақ пен корпус арасында, сондай-ақ жарық өткізгіш панельдер мен болат қаңқа арасында 3–5 мм температуралық саңылау қалдыру көзделген.

Осылайша, камераның үстіңгі қақпағы мен бүйір қабырғаларының жоғарғы бөлігі үшін полиакрил (органикалық шыны, $\delta=4$ мм) таңдалды. Жарық өткізгіш панельдердің өлшемдері камера өлшемдеріне сәйкес қабылданды (үстіңгі қақпақ 800×500 мм, бүйір панельдер биіктігі 200–250 мм).



Сурет 1. Күн сәулелі кептіргіштің бүйірі (жалпы биіктігі 650 мм, ені 500 мм, ұзындығы 800 мм)

2.2 Аяу кіру тесіктері

Тесіктердің орналасуы табиғи конвекция заңдылықтарына негізделген. Кіру және шығу тесіктерінің аудандарының қатынасы шамамен 4:1 болғанда максималды ауа ағынына қол жеткізіледі [6]. Шығу тесігі ретінде құбыр ($A_{\text{құб}} = 0,00785 \text{ м}^2$) алынғандықтан, кіру тесіктерінің жалпы ауданы шамамен $0,03 \text{ м}^2$ болуы керек. Жобада жоғарғы және төменгі тесіктердің жалпы ауданы $0,1386 \text{ м}^2$, бұл қажетті мәннен 4,6 есе артық, сондықтан ауа ағыны шектелмейді.

Тесіктердің орналасу биіктігі (қақпақтан еденге қарай есептеледі):

- жоғарғы тесік: биіктігі 30-220 мм (бүрлер науасының деңгейі 220-340 мм), ені 420 мм;
- төменгі тесік: биіктігі 260-400 мм, ені 420 мм, еденге 20 мм қалдырылған. Екі жағынан 40 мм қалдырылған (қорап ені 500 мм).

3. ҚҰБЫР ПАРАМЕТРЛЕРІН НЕГІЗДЕУ

3.1 Құбыр биіктігі

Табиғи конвекциялық күш мұржа биіктігіне пропорционал [4]:

$$\Delta P = g \cdot H \cdot (p_{\text{сырт}} - p_{\text{іш}})$$

$$H = \frac{\Delta P}{g \cdot (p_{\text{сырт}} - p_{\text{іш}})}$$

мұндағы $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $p_{\text{сырт}}$ — сыртқы ауа тығыздығы (25°C , $1,184 \text{ кг/м}^3$), $p_{\text{іш}}$ — ішкі ауа тығыздығы (45°C , $1,110 \text{ кг/м}^3$). 45°C үшін қажетті құбыр биіктігі $0,35 \text{ м}$. Құбыр биіктігін $0,3$ - $0,8 \text{ м}$ аралығында өзгерту арқылы камерадағы температураны 40 - 55°C аралығында реттеуге мүмкіндік береді. Құбыр биіктігін өзгерту арқылы ауа ағынының жылдамдығына әсер етіледі. Ауа ағыны жылдамдаған сайын камерадағы температура төмендейді, себебі сырттан суық ауа массалары көбірек кіреді, сонымен қатар ылғалдың кету жылдамдығы артады.

3.2 Құбыр диаметрі

Құбыр диаметрі $D = 100$ мм етіп қабылданды. Бұл стандартты өлшем қолжетімді, қорғаныс сеткасын орнатуға ыңғайлы.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде пассивті күн сәулелі кептіргіштің конструкциясы әзірленуде, оның негізгі параметрлері анықталды.

Материалдарды таңдау нәтижелері. Қабырғаның үш қабаты үшін салыстырмалы талдау жүргізілді. Сыртқы қабат үшін мырышталған болат ($\delta=1$ мм) таңдалды, себебі ол алюминийге қарағанда берік, ал поликарбонатқа қарағанда коррозияға төзімді. Жылу оқшаулағыш қабат ретінде пенофол ($\delta=8$ мм) минералды мақта мен пенополистиролмен салыстырғанда ылғалға төзімділігі, бу өткізбеуі және аз қалыңдығы бойынша оңтайлы шешім болып табылады. Ішкі қабат үшін қара флис ($\delta=2$ мм) таңдалды, себебі оның жылу сіңіру коэффициенті $\alpha=0,95-0,97$ ең жоғары мәнге ие, ылғал сіңірмейді және ұзақ мерзімді. Таңдалған үш қабатты құрылым жалпы қалыңдығы 11 мм (1,1 см) болатын жылу тиімді қабырғаны қамтамасыз етеді.

Камера өлшемдері. Камера өлшемдері $800 \times 500 \times 450$ мм етіп алынды. Бұл өлшемдер бүрлердің көлемдік тығыздығы 300 кг/м^3 негізінде 8-10 кг шикізатты бір циклде өңдеуге мүмкіндік береді. Науа биіктігі (12 см) 10 кг бүрге қажетті 10,7 см-ден жоғары алынды, бұл қорды қамтамасыз етеді. Ауаның біркелкі таралуы үшін қалдырылған бос орындар (алдыңғы жағында 1 см, бүйірлерінде 1 см, артында 15 см) камера ішіндегі температура өрісінің біркелкілігін қамтамасыз етеді.

Ауа кіру тесіктері. Ауа кіру тесіктері екі деңгейде орналасқан. Жоғарғы тесік (биіктігі 30-220 мм) бүрлер науасының деңгейіне сәйкес келеді, бұл ауаның шикізат қабатынан өтуін қамтамасыз етеді. Төменгі тесік (биіктігі 260-400 мм) еденге жақын орналасқан, бұл салқын ауаның төменнен кіруіне жол ашады және камерада толық айналым жасайды. Тесіктердің жалпы ауданы $0,1386 \text{ м}^2$, бұл шығу тесігінің (құбыр) ауданы $0,00785 \text{ м}^2$ болғанда кіру-шығу қатынасын шамамен 17,7:1 құрайды. Afriyie et al. [6] зерттеулері бойынша кіру-шығу аудандарының қатынасы 4:1 болғанда максималды ауа ағынына қол жеткізіледі, сондықтан қабылданған аудан жеткілікті артық.

Құбыр параметрлері. Құбыр диаметрі 100 мм етіп алынды, бұл стандартты өлшем қолжетімді және қорғаныс сеткасын орнатуға ыңғайлы. Құбыр биіктігі 0,3-0,8 м аралығында ауыспалы етіп қабылданды. Бұл диапазон табиғи тартым күшінің

$\Delta P = g \cdot H \cdot (p_{\text{сырт}} - p_{\text{іш}})$ формуласына сәйкес 40°C ($H=0,45$ м) пен 55°C ($H=0,24$ м) аралығындағы температураларды қамтиды [4, 5]. Негізгі жұмыс температурасы 45°C үшін құбыр биіктігі 0,35 м қабылданды.

Жылу техникалық есептеулер.

$$Q_{\text{күн}} = I \cdot A \cdot \tau \cdot \alpha$$

Күн радиациясының энергиясы $Q_{\text{күн}} = 187,6 \text{ Вт}$ ($I=700 \text{ Вт/м}^2$, $A=0,307 \text{ м}^2$, $\tau=0,92$, $\alpha=0,95$) құрайды.

$$R_{\text{қаб}} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_2}$$

Қабырғаның жылу кедергісі $R_{\text{қаб}} = 0,2044 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, жалпы жылу кедергісі $R_0 = 0,3729 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ болғанда жылу шығыны $Q_{\text{жоғалту}} = 134 \text{ Вт}$ құрайды. 2,33 кг ылғалды 12 сағатта буландыруға кететін энергия $Q_{\text{булану}} = 122 \text{ Вт}$. $Q_{\text{жоғалту}} + Q_{\text{булану}} = 256 \text{ Вт}$. Күн радиациясы түс кезінде $900\text{-}1000 \text{ Вт/м}^2$ -ге жетеді, бұл кезде $Q_{\text{күн\_max}} = 241 \text{ Вт}$, бұл мән жылу шығыны мен булану қуатына жақын. Сондықтан күн радиациясы жеткілікті.

Аэродинамикалық есептеулер. Табиғи тартым күші $\Delta P = 0,254 \text{ Па}$ ($g=9,81 \text{ м/с}^2$, $H=0,35 \text{ м}$, $\rho_{\text{сырт}} = 1,184 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{іш}} = 1,110 \text{ кг/м}^3$) құрайды. Ауа шығыны $Q = A_{\text{құб}} \cdot v = 0,00785 \cdot 0,665 = 0,00522 \text{ м}^3/\text{с}$. Бұл мән 5 кг бүрді кептіруге қажетті ылғалды кетіруді қамтамасыз етеді.

Модельдің шектеулері. Ұсынылып отырған конструкцияны есептеу кезінде бірқатар жеңілдетулер қабылданды: қабырға қабаттарының біртектілігі, табиғи конвекцияның тұрақтылығы, күн радиациясының орташа мәні. Бұл жеңілдетулер инженерлік есептеулер үшін қабылданатын дәрежеде. Нақты жағдайда желдің әсері, күн радиациясының тәуліктік және маусымдық ауытқуы, бүрлердің әртүрлілігі сияқты факторлар қосымша зерттеуді қажет етеді. Алынған нәтижелер алдағы эксперименттік зерттеулердің негізі болады.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу нәтижелері ұсынылып отырған пассивті күн сәулелі кептіргіштің тұқымның биологиялық талаптарын ($40\text{-}45^\circ\text{C}$, $\leq 30\%$) қанағаттандыратынын, электр энергиясын тұтынбайтынын және конструкциясының сенімді екенін көрсетті. Алынған параметрлер прототипті жасау және өндірістік жағдайда сынау үшін негіз болады.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ. Автор мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА:

Бұл жұмыста мәтінді редакциялау және ағылшын тіліндегі дереккөздерге сілтеме жасау үшін жасанды интеллект құралдары (ChatGPT-4, 2024) қолданылды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ghildiyal, S.K., et al. Effect of temperature on cone bursting... Southern Forests, 2008, 70(1): 1–5.
2. Rietz, R.C., Kimball, K.E. Kiln schedule for extracting red pine seed... Journal of Forestry, 1940, 38(5): 430-434.
3. Esper A., Mühlbauer W. Solar Drying Technology. Springer, 1998.
4. Firfiris, V., et al. A Prototype Passive Solar Drying System... Applied Sciences, 2022, 12(22): 11784.
5. Agyei-Agyemang, A., et al. Effects of roof angle, inlet gap size and dryer height... Renewable Energy and Environmental Sustainability, 2022, 7: 18.
6. Afriyie, J.K., et al. Experimental investigations of a chimney-dependent solar crop dryer. Renewable Energy, 2009, 34(10): 2178-2186.
7. Техникалық шарт 2244-001-54309294-08. Пенофол. Технические условия.
8. Иванов В.А. Солнечные сушильные установки. М.: Машиностроение, 2018.

ЖЫЛУӨТКІЗГІШТІК ТЕНДЕУІН ШЕШУДЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНУ

ӨОЖ: 519.6

А.Ж.Досжанова^{1*}

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы

*Автор-корреспондент: Досжанова Аяулым Жанболатқызы, e-mail: ayaulim2424@icloud.com

АННОТАЦИЯ. Мақалада жылуөткізгіштік теңдеуін шешудің заманауи әдістері, соның ішінде классикалық сандық тәсілдер мен жасанды интеллект әдістері талданады. Жылуөткізгіштік теңдеуі жылу тасымалдаудың іргелі моделі ретінде қарастырылады және энергетикада, құрылыста, материалтануда кеңінен қолданылады.

Классикалық сандық әдістер, мысалы, ақырлы айырмалар әдісі, дәл шешімдер алуға мүмкіндік береді, алайда тұрақтылық шарттарының сақталуын талап етеді (Курант–Фридрихс–Леви шарты) және тор қадамы азайған сайын есептеу шығындарының едәуір артуына алып келеді.

Соңғы жылдары дифференциалдық теңдеулерді шешуде машиналық оқыту әдістерін қолдану қарқынды дамып келеді. Атап айтқанда, 2019 жылы Maziar Raissi және оның әріптестері ұсынған физикалық ақпараттандырылған нейрондық желілер (PINNs) теңдеуді жоғалту функциясына енгізуге мүмкіндік береді, бұл есептеу аймағын айқын дискреттеусіз шешім алуға жағдай жасайды.

Жұмыста дәлдік, тұрақтылық, есептеу күрделілігі және геометриялық күрделі есептермен жұмыс істеу мүмкіндігі бойынша салыстырмалы талдау жүргізілді. Жасанды интеллект әдістері жоғары икемділікті көрсетеді және тұрақтылық шарттарын талап етпейді, алайда бұл артықшылық оқу кезеңіндегі елеулі есептеу жүктемесімен қатар жүреді.

Алынған нәтижелер жылуөткізгіштік теңдеуін шешуде классикалық сандық әдістер мен жасанды интеллект әдістерін біріктіріп қолданудың әлеуеті жоғары екенін көрсетеді.

Түйінді сөздер: жылу өткізгіштік теңдеуі, ақырлы айырмалар әдісі, PINNs, жасанды интеллект, сандық әдістер.

КІРІСПЕ

Жылуөткізгіштік теңдеуі үздіксіз ортадағы жылулық диффузияны сипаттайтын математикалық физиканың негізгі теңдеулерінің бірі болып табылады. Ол энергетикалық жүйелердегі, құрылыс конструкцияларындағы және берілген термофизикалық сипаттамалары бар материалдарды әзірлеудегі жылулық жағдайларды талдау үшін кеңінен қолданылады.

Ақырлы айырымдар, ақырлы элементтер және ақырлы көлемдер сияқты классикалық сандық әдістер теңдеуді қажетті дәлдікпен шешуді қамтамасыз етеді. Олардың ішінде ақырлы айырымдар әдісі іске асырудың қарапайымдылығымен және инженерияда кеңінен қолданылуымен ерекшеленеді, алайда оның тиімділігі есептеу торын құру қажеттілігімен, дәлдіктің қадам өлшеміне тәуелділігімен және Курант–Фридрихс–Леви шарты сияқты тұрақтылық шарттарын сақтау қажеттілігімен шектеледі. Қадамның азаюымен есептеу шығындары артады, бұл әсіресе көпөлшемді есептер үшін маңызды болып табылады.

Соңғы жылдары ішінара туындылы дифференциалдық теңдеулерді шешуде жасанды интеллект тәсілдері қарқынды дамып келеді. Әсіресе Maziar Raissi және оның әріптестері ұсынған физикалық ақпараттандырылған нейрондық желілер (PINNs)

ерекше қызығушылық тудырады. Бұл тәсілде дифференциалдық теңдеу, сондай-ақ бастапқы және шекаралық шарттар шығын функциясына енгізіледі, нәтижесінде есептеу аймағын айқын торлық дискреттеусіз жуық шешім алуға мүмкіндік туады. Зерттеулер PINNs әдісінің күрделі геометриялы және параметрлері сызықтық емес есептерде жылуөткізгіштік мәселелерін тиімді шешуге мүмкіндік беретінін көрсетеді, алайда мұндай тәсілдер оқыту кезеңінде айтарлықтай есептеу ресурстарын және нейрондық желі архитектурасын мұқият баптауды талап етеді. Осыған байланысты классикалық сандық әдістер мен жасанды интеллект әдістерін олардың тиімді қолдану салаларын анықтау мақсатында салыстырмалы талдау қажеттілігі туындайды.

Аталған жұмыс жылуөткізгіштік теңдеуін шешуде жасанды интеллект әдістерінің әлеуетін зерттеуге және оларды дәстүрлі сандық әдістермен салыстырмалы бағалауға бағытталған.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Жұмыста дифференциалдық теңдеумен сипатталатын бір өлшемді, тұрақты емес жылу өткізгіштік есебі қарастырылады:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

мұндағы $u(x,t)$ — температураның таралу функциясы, a — коэффициент температуралық өткізгіштік, x — кеңістіктік координат, t — уақыт.

Мәселені шешу бірінші типтегі берілген бастапқы және шекаралық шарттарда жүзеге асырылады.

Зерттеу барысында мәселені шешудің екі тәсілі қарастырылады: ақырлы айырмашылықтардың классикалық сандық әдісі және нейрондық желілерге негізделген жасанды интеллект әдістері.

Ақырлы айырмашылықтардың сандық әдісі. Жылу өткізгіштік теңдеуін сандық әдіспен шешу барысында айқын айырымдық сызба қолданылады. Кеңістік пен уақыт домені Δx және Δt қадамдары бар біркелкі тормен іріктеледі. Туындылар кеңістікте екінші ретті дәлдікке ие ақырлы айырмалама үлгілерімен, ал уақыт бойынша бірінші ретті дәлдікпен алмастырылады.

Айырымдық сұлбаның формасы:

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \left(\frac{a\Delta t}{(\Delta x)^2} \right) (u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n)$$

Сандық әдістің тұрақтылығы Курант–Фридрихс–Леви шартының орындалуымен қамтамасыз етіледі:

$$\frac{a\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2}$$

Бұл әдіс іске асырудың қарапайымдылығымен және анықтығымен сипатталады, бірақ оның дәлдігі тор параметрлерін таңдауға айтарлықтай байланысты.

Жасанды интеллект әдістері. Баламалы тәсіл ретінде нейрондық желілерді пайдалануға негізделген жасанды интеллект әдістері қарастырылады. Жұмыста физикалық ақпараттандырылған нейрондық желілер тұжырымдамасы қолданылады (Physics-Informed Neural Networks, PINNs).

Осы тәсіл шеңберінде жылуөткізгіштік теңдеуінің шешімі нейрондық желі арқылы жуықталады, ал оның параметрлері шығын функциясын минимизациялау арқылы

анықталады. Шығын функциясы келесі құрамдастарды қамтиды:

- дифференциалдық теңдеудің невязкасын;
- бастапқы шарттарды;
- шекаралық шарттарды.

Осылайша, нейрондық желіні оқыту есептің физикалық шектеулерін ескере отырып жүзеге асырылады, бұл есептеу аймағын айқын дискреттемей-ақ жуық шешім алуға мүмкіндік береді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Ұсынылған әдістердің тиімділігін бағалау үшін бірөлшемді жылуөткізгіштік теңдеуінің модельдік есебіне сандық эксперимент жүргізілді. Жұмыста келесі теңдеу қарастырылды:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad x \in [0, 1], \quad t \in [0, 0.1],$$

бастапқы және шекаралық шарттармен:

$$u(x, 0) = \sin(\pi x), \quad u(0, t) = u(1, t) = 0.$$

Есеп үшін аналитикалық шешім белгілі:

$$u(x, t) = e^{-\pi^2 t} \sin(\pi x),$$

бұл оны сандық әдістердің дәлдігін бағалау кезінде эталон ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Сандық эксперимент (өзіндік нәтижелер). Сандық шешім айқын схема негізінде ақырлы айырымдар әдісін қолдану арқылы алынды. Есептеу келесі параметрлері бар біркелкі торда жүргізілді:

$$\Delta x = 0.05, \quad \Delta t = 0.001.$$

Тұрақтылық параметрі:

$$r = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} = 0.4,$$

бұл айқын схеманың тұрақтылық шарты $r \leq 0.5$, талаптарын қанағаттандырады, ол сандық әдістер бойынша классикалық еңбектерде (А. А. Самарский) сипатталған.

$T = 0,1$ уақытында қателіктердің келесі мәндері алынды:

- максималды абсолютті қателік: $1,06 \cdot 10^{-3}$;
- орташа квадраттық қате (RMSE): $7,33 \cdot 10^{-4}$;
- нормадағы салыстырмалы қателік L_2 : $2,85 \cdot 10^{-3}$.

Алынған нәтижелер тор параметрлері дұрыс таңдалған кезде ақырлы айырмашылық әдісі шешімнің жоғары дәлдігін қамтамасыз ететінін көрсетеді.

Жасанды интеллект әдістерінің нәтижелері (әдебиеттерге сәйкес). Салыстыру үшін жылуөткізгіштік теңдеулерін шешуде физикалық ақпараттандырылған нейрондық желілерді (PINNs) қолдану бойынша заманауи зерттеулердің нәтижелері пайдаланылды.

Жұмыста Maziar Raissi және оның әріптестері (2019) ұсынған PINNs тұжырымдамасы қарастырылды, онда дифференциалдық теңдеу нейрондық желінің шығын функциясына енгізіледі. Бұл тәсіл кейінгі зерттеулерде одан әрі дамытылды.

Кейінгі жұмыстардың (2021–2024 жж.) нәтижелері бойынша жылуөткізгіштік есептері үшін келесі дәлдік көрсеткіштеріне қол жеткізіледі:

- L_2 нормасындағы салыстырмалы қателік шамамен 10^{-3} ;
- CFL шарттарын орындауды талап етпейтін жоғары тұрақтылық.

Осылайша, PINNs әдістері классикалық сандық әдістермен салыстырмалы дәлдікті қамтамасыз етеді, алайда нейрондық желіні оқыту кезеңіне байланысты олардың есептеу күрделілігі айтарлықтай жоғары болып табылады.

Әдістерді салыстырмалы талдау

Кесте 1. Нәтижелерді салыстыру (өзіндік және әдеби деректер негізінде)

Көрсеткіш	Ақырлы айырмалар әдісі (меншікті есептеу)	PINNs (әдеби деректер)
Кеңістік бойынша қадам Δx	0,05	—
Уақыт бойынша қадам Δt	0,001	—
Тұрақтылық параметрі r	0,4	талап етілмейді
Максималды қателік	$1,06 \cdot 10^{-3}$	10^{-3} шамасында
RMSE	$7,33 \cdot 10^{-4}$	—
Салыстырмалы қателік L_2	$2,85 \cdot 10^{-3}$	10^{-3} шамасында
Ерекшеліктері	CFL сәйкес болған кезде жоғары дәлдік	жоғары икемділік, жоғары есептеу күрделілігі

Нәтижелерді талдау көрсеткендей, ақырлы айырымдар әдісі тұрақтылық шарты орындалған жағдайда тесттік есепте жоғары дәлдікті қамтамасыз етеді. Бұл оны қарапайым геометриясы бар және біркелкі тор қолданылатын есептерді шешудің тиімді құралы етеді.

Сонымен қатар, жасанды интеллект әдістері, атап айтқанда PINNs, заманауи зерттеулермен расталған салыстырмалы дәлдік деңгейін көрсетеді. Олардың басты артықшылығы — есептерді айқын дискретизациясыз шешу мүмкіндігі, сондай-ақ күрделі геометриялармен және толық емес деректермен жұмыс істеу қабілеті.

Айта кету керек, жасанды интеллект әдістерінің қарқынды дамуына қарамастан, классикалық сандық әдістер нәтижелердің болжамдылығы мен бақыланатын дәлдігінің арқасында өзектілігін сақтайды.

Осылайша, ең перспективалы бағыт классикалық сандық әдістер мен жасанды интеллект әдістерін біріктіріп қолдану болып табылады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмыста жылуөткізгіштік теңдеуін шешудегі классикалық сандық әдістер мен жасанды интеллект әдістеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеудің қойылған мақсатына қол жеткізілді: жылуөткізгіштік теңдеуінің теориялық негіздері қарастырылды, ақырлы айырымдар әдісі арқылы сандық эксперимент жүргізілді және алынған нәтижелер нейрондық желілерге негізделген заманауи тәсілдермен салыстырылды.

Алынған нәтижелер ақырлы айырымдар әдісінің тұрақтылық шарттары сақталған жағдайда шешімнің жоғары дәлдігін қамтамасыз ететінін көрсетті, ал жасанды интеллект әдістері, атап айтқанда PINNs, салыстырмалы дәлдік деңгейін көрсетіп, күрделі шарттардағы есептерді шешуде жоғары икемділікке ие екені анықталды.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы жылуөткізгіштік теңдеуін шешудің классикалық және интеллектуалдық әдістерін жүйелеу мен салыстырмалы талдаудан, сондай-ақ оларды тиімді қолдану салаларын негіздеуден тұрады.

Нәтижелердің практикалық маңыздылығы алынған қорытындыларды инженерлік қолданбаларда жылу тасымалдау есептерін шешу әдісін таңдауда, соның ішінде күрделі геометриясы бар және ортаның біртекті емес параметрлерімен сипатталатын есептерде пайдалану мүмкіндігімен анықталады.

Өрі қарайғы зерттеулердің перспективасы сандық әдістер мен жасанды интеллект әдістерін біріктіретін аралас тәсілдерді әзірлеумен, сондай-ақ зерттеулерді жылуөткізгіштіктің көпөлшемді және сызықтық емес есептеріне кеңейтумен байланысты.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Зерттеу жұмысы сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

АЛҒЫС ХАТТАР: Автор ғылыми жетекшісіне әдістемелік қолдау көрсеткені және зерттеуді жүргізудегі құнды ұсыныстары үшін алғысын білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: ChatGPT. (2026, 30 наурыз). Жылуөткізгіштік теңдеуін шешу үшін жасанды интеллект әдістерін қолдану тақырыбы бойынша ғылыми мақаланың тұжырымдарын құрылымдауға, редакциялауға және нақтылауға көмектесу. OpenAI. <https://chatgpt.com/>.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Самарский А.А. Айырмашылық схемалар теориясы. — М.: Наука, 1977.

Тихонов А.Н., Самарский А.А. Математикалық физиканың теңдеулері. — М.: Наука, 1972.

Maziar Raissi, Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations // Journal of Computational Physics. — 2019. — Vol. 378. — P. 686–707.

George Em Karniadakis et al. Physics-informed machine learning // Nature Reviews Physics. — 2021. — Vol. 3. — P. 422–440.

Jagtap A.D., Kawaguchi K., Karniadakis G.E. Adaptive activation functions accelerate convergence in deep and physics-informed neural networks // Journal of Computational Physics. — 2020.

Yann LeCun, Bengio Y., Hinton G. Deep Learning // Nature. — 2015. — Vol. 521. — P. 436–444.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

УДК 519.863

М.Ерзатулы¹, І.Ерболатулы¹, А.Алибекұлы¹, Р.У. Мукашева^{2*}

¹ВКОСЛ «БІЛІМ-ИННОВАЦИЯ», Усть-Каменогорск, Казахстан

²ВКТУ им. Д.Серикбаева, город, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Мукашева Р.У., e-mail: mukashevaru@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена математическому моделированию положения Солнца относительно поверхности Земли и исследованию эффективности ориентации солнечных панелей. В работе разработана математическая модель, позволяющая по дате, времени и географическим координатам определять основные параметры положения Солнца — зенитный угол и азимут. На основе полученных расчетов исследована зависимость эффективности солнечной панели от угла падения солнечных лучей. Выполнено сравнение работы панели с фиксированным положением и панели, ориентируемой по направлению на Солнце. Для наглядного представления результатов реализована визуализация движения Солнца и создан макет солнечной панели. Полученные результаты показывают, что использование математической модели для определения ориентации панели позволяет повысить эффективность использования солнечной энергии.

Ключевые слова: солнечная энергия, математическая модель, солнечная панель, эффективность солнечной энергии, солнечный трекер.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования заключается в модернизации солнечных трекеров для более эффективного сбора энергий на основе существующих солнечных панелей с помощью математических алгоритмов. Солнечные панели были изобретены для вырабатывания энергий Солнца, которое является самой доступной неисчерпаемой энергией человечества и ключевым элементом для увеличения выработки энергий. Однако солнечные панели не смогли составить достойную конкуренцию другим способам по вырабатыванию энергий. Поэтому структуру работы трекеров объединили с солнечными панелями. Сами же трекеры работают с помощью фотодатчиков которые определяют местоположение Солнца, но у них есть свой недостаток.

Первый недостаток заключается в нестабильности фотодатчиков. Это означает, что при облачной погоде датчики могут реагировать на размытую часть лучей Солнца через облака, тем самым потеряв некоторую часть своей эффективности.

Второй недостаток в том, что если на некоторое время облако покроет Солнце, и оно потом выйдет обратно, то трекер будет крутиться и искать Солнце пока не найдет ее, тем самым потратив определенную часть своей энергий.

Третий недостаток в датчиках заключается в том, чтобы они отслеживали за Солнцем весь день. Но они тратят энергию и на них нужны дополнительные затраты, тем самым снижая эффективность работы солнечных трекеров.

Поэтому солнечные трекеры, функционирующие на основе математических алгоритмов, представляют собой перспективное направление в развитии солнечной энергетики. Их эффективность может быть научно обоснована, что способствует повышению доверия со стороны общества и делает данные технологии современным и надежным решением.

Использование математических алгоритмов дает нам возможность использования солнечного трекера в любой точки в мире. Датчики требуют калибровки и настройки на новом месте использования, алгоритм же требует только географические данные, которые можно найти, зайдя в телефон, чтобы адаптироваться на новом месте.

Применение математических алгоритмов обеспечивает возможность использования солнечных трекеров в любой географической точке. В то время как сенсорные системы требуют дополнительной калибровки при смене места эксплуатации, алгоритмический подход основывается только на географических данных, которые легко получить с помощью современных мобильных устройств, что значительно упрощает процесс адаптации системы.

Эффективность солнечных панелей сильно зависит от их ориентации относительно Солнца. Поэтому задача определения оптимального угла наклона панели является важной инженерной и математической задачей.

Целью работы является создание математической модели положения Солнца и определение оптимального угла ориентации солнечной панели для получения максимального количества энергии.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- изучить движение Солнца относительно поверхности Земли
- построить математическую модель положения Солнца
- определить оптимальный угол наклона панели
- сравнить эффективность неподвижной панели и панели с системой слежения
- создать компьютерную визуализацию и макет.

Проблема исследования:

Эффективность солнечных панелей существенно зависит от угла падения солнечных лучей. Однако положение Солнца непрерывно меняется в течение дня и года, поэтому фиксированная панель не всегда работает с максимальной эффективностью. Возникает необходимость разработки математической модели, позволяющей точно определять положение Солнца и оптимизировать ориентацию солнечной панели.

Исследовательская задача:

Разработать и исследовать математическую модель определения положения Солнца по времени и географическим координатам и на её основе определить оптимальную ориентацию солнечной панели для увеличения выработки энергии.

Гипотеза исследования:

Предполагается, что ориентация солнечной панели, рассчитанная на основе математической модели положения Солнца, обеспечивает большую выработку энергии по сравнению с панелью фиксированного положения.

Мы рассматриваем задачу оптимизации угла наклона солнечной панели для получения максимальной энергии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на основе математического моделирования положения Солнца относительно заданной точки на поверхности Земли. На основе даты, времени и географических координат вычислялись основные параметры солнечного положения. Далее определялся угол падения солнечных лучей на поверхность панели и рассчитывалась эффективность её работы. Полученные результаты использовались для сравнения фиксированной солнечной панели и панели, ориентируемой по направлению на Солнце. Для наглядности была реализована визуализация движения Солнца и использован макет солнечной панели (смотрите рисунок 1)

Математическая модель:

Положение Солнца описывается через:

- фракционный год
- солнечную деклинацию
- часовой угол.

Используя сферическую тригонометрию, получаем формулу высоты Солнца.

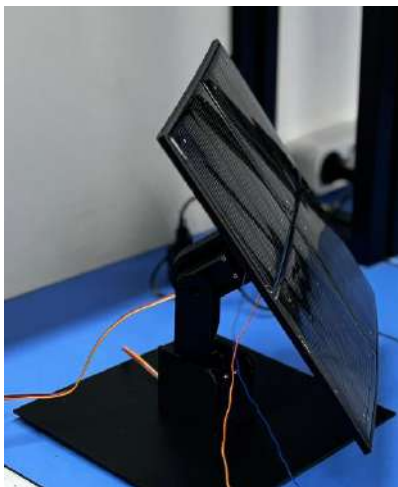


Рисунок 1. Макет солнечной панели

Мощность панели описывается функцией

$$P = IS \cos(\theta)$$

Максимум функции найден с помощью методов дифференциального исчисления. В результате решения данной задачи получена формула оптимального угла панели

$$\beta_{opt} = \varphi - \delta$$

где

φ - солнечный зенитный угол;

δ - солнечное склонение

С учетом этого математическая модель определения положения Солнца относительно заданной точки на поверхности Земли описывается следующими уравнениями и зависимостями:

Доля года:

$$\gamma = \frac{2\pi}{365} \cdot \left(d - 1 + \frac{x-12}{24} \right) \quad (1)$$

где

d – номер дня в порядковом счете.

x – локальное время в часах в десятичном виде.

Уравнение времени:

$$ET = 29,18 \cdot (0,000075 + 0,001868 \cdot \cos(\gamma) - 0,032077 \cdot \sin(\gamma) - 0,014615 \cdot \cos(2\gamma) - 0,040849 \cdot \sin(2\gamma)) \quad (2)$$

Солнечное склонение:

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cdot \cos(\gamma) + 0,070257 \cdot \sin(\gamma) - 0,006758 \cdot \cos(2\gamma) + 0,000907 \cdot \sin(2\gamma) - 0,002697 \cdot \cos(3\gamma) + 0,00148 \cdot \sin(3\gamma) \quad (3)$$

Временная поправка

$$t_f = ET + 4 \cdot l - 60 \cdot t_z \quad (4)$$

Истинное солнечное время

$$t_{st} = h \cdot 60 + m + \frac{s}{60} + t_f \quad (5)$$

Солнечный часовой угол:

$$h_a = \frac{t_{st}}{4} - 180 \quad (6)$$

Зенитный угол Солнца:

$$\cos(\varphi) = \sin(lat) \cdot \sin(\delta) + \cos(lat) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h_a) \quad (7)$$

Солнечный азимутный угол

$$\cos(180 - \theta) = -\frac{\sin(lat) \cdot \cos(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(lat) \cdot \sin(\varphi)} \quad (8)$$

Угол восхода и захода Солнца

$$\cos(\omega) = -\tan(lat) \cdot \tan(\delta)$$

Время восхода и захода Солнца

$$S_{r,t} = 720 - 4(l \pm \omega) - ET$$

Солнечный полдень

$$snoon = 720 - 4 \times l - ET$$

Чтобы оценить эффективность солнечной панели, которая движется и постоянно ориентируется на Солнце (трекер), нужно сравнить количество получаемой энергии в двух случаях:

- панель неподвижная
- панель следит за солнцем

Полученная математическая модель используется для определения угла падения солнечных лучей на поверхность панели и оценки эффективности её работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе выполнения работы были изучены вопросы о том как улучшить Солнечные трекеры. Они оснащены датчиками которые определяют местоположение Солнца и поворачивают панели в их сторону. Проанализировав, мы поняли что у датчиков есть большие недостатки: в случае если облако загородит Солнце, датчик для того чтобы найти Солнце начинает крутиться. Из-за частых бессмысленных движений трекера, появляются угловые погрешности, снижается генерация электричества, быстрее изнашивается механические элементы трекера и тратит свою же энергию. Более того, погрешность этих датчиков очень сильно зависит от условий освещения и нуждается в частой калибровке.

Для того чтобы решить эту значительную проблему мы ввели в ход альтернативный подход – внедрение математических алгоритмов, на основе полученной математической модели, основанных на формулах в сфере астрономии, которые дают возможность точно находить положение Солнца в зависимости от географических координат, даты и времени. Эти алгоритмы дают устойчивую и ожидаемую работу трекера даже при облачной погоде.

Этот подход позволяет сделать трекеры с панелями намного устойчивыми,

надежными к разным погодным условиям и эффективным со стороны генераций энергий. Данный подход показывает то, что математические алгоритмы в сочетании с инженерными решениями могут значительно улучшить технологии возобновляемой энергии, которые существуют на данный момент.

Этапы работы математического алгоритма:

1. Вход данных.

Пользователь трекара вводит все нужные координаты местности, временную зоны, время и дата.

2. Расчет местоположения Солнца.

С помощью формул будут вычисляться точные положения Солнца.

3. Положение панели.

После расчетов формул, трекар получает сигнал, в котором будет вся информация о положениях Солнца. С помощью этой информации трекар будет перпендикулярно ориентироваться на лучи Солнца, тем самым обеспечивая большую эффективность.

Рассмотрим пример вычисления оптимального угла наклона солнечной панели.

Исходные данные

Пусть наблюдатель находится в городе Oskemen.

Географические параметры:

-широта: $\varphi = 49,95^{\circ}$.

-дата: 21 марта (день весеннего равноденствия)

-номер дня в году: $d=80$

-время наблюдения: $t=12$ (солнечный полдень)

Вычисляем фракционный год по формуле (1)

Подставим значения в эту формулу $\gamma = \frac{2\pi}{365}(80 - 1)$.

Отсюда получаем $\gamma \approx 1,36$

Подставим это значение в формулу (3) солнечного склонения δ :

Получаем $\delta \approx 0$.

Это соответствует равноденствию.

Тогда высота солнца, вычисляемая по формуле $h = 90^{\circ} - \varphi + \delta$ будет $h = 40,05^{\circ}$

Оптимальный угол панели, найденный в результате решения оптимизационной задачи $\beta_{opt} = \varphi - \delta$ будет $\beta_{opt} = 49,05 - 0 \approx 50^{\circ}$

Таким образом оптимальный угол наклона солнечной панели 21 марта в 12 часов дня на широте $\varphi = 49,95^{\circ}$ будет $\beta_{opt} \approx 50^{\circ}$

Оценим эффективность солнечной панели, которая движется и постоянно ориентируясь на Солнце (трекар) и сравним количество получаемой энергии в двух случаях:

- панель неподвижная

-панель следит за солнцем

Мощность солнечной панели находим по формуле: $P = I \cdot S \cdot \cos \theta$

где

I - интенсивность солнечного излучения

S - площадь панели

• θ - угол между нормалью панели и солнечными лучами.

Таблица 1. Расчет основных энергетических характеристик: для панелей с отслеживанием Солнца и неподвижной

Основные энергетические характеристики	Панель с отслеживанием солнца	Неподвижная панель
Мощность солнечной панели	Если панель <i>поворачивается за Солнцем</i> , то она всегда ориентирована перпендикулярно лучам: $\theta=0$. Тогда $P_{trac\ ker} = I \cdot S$. Это максимально возможная мощность	Для неподвижной панели угол θ меняется в течение дня. Тогда мощность: $P_{fixed} = I \cdot S \cdot \cos \theta$
Энергия за день	$E_{trac\ ker} = \int_{-T}^T I \cdot S dt$	$E_{fixed} = \int_{-T}^T I \cdot S \cdot \cos \theta(t) dt$
Пример расчета Пусть: солнечный день $t = 12$ часов, $I = 1000 \text{ W/m}^2$, $S = 1 \text{ m}^2$		
Энергия за день	$E_{trac\ ker} = I \cdot S \cdot \int_{-T}^T dt = I \cdot S \cdot 2T = I \cdot S \cdot t,$ где $t=2T$ Подставим значения, получим $E_{trac\ ker} = 12000 \text{ Вт/м}^2$	$E_{tfixed} = I \cdot S \cdot \frac{1}{\omega} (\sin(\omega T) - \sin(-\omega T)) =$ $= \frac{2 \cdot I \cdot S}{\omega} \cdot \sin(\omega T), \quad \omega T = \frac{\pi}{2}, \sin(\omega T) = 1$ После подстановки получаем $E_{tfixed} = \frac{2 \cdot I \cdot S}{\omega} = t \cdot \frac{2}{\pi} \cdot I \cdot S$ т.е. $E_{tfixed} = 0,64 \cdot I \cdot S \cdot t$ $E_{tfixed} = 7680 \text{ Вт/м}^2$.

Эффективность системы слежения:

$$\eta = \frac{E_{trac\ ker}}{E_{fixed}}$$

или прирост энергии:

$$\Delta = \frac{E_{trac\ ker} - E_{fixed}}{E_{fixed}} \cdot 100\%$$

В нашем случае прирост энергии

$$\Delta = \frac{1200 - 7680}{7680} \cdot 100\% \approx 56\%$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование математической модели позволяет более точно определять направление на Солнце и выбирать оптимальное положение солнечных панелей. Это способствует увеличению количества получаемой солнечной энергии и повышению эффективности использования возобновляемых источников энергии.

Разработанная математическая модель может использоваться для определения положения Солнца и оптимальной ориентации солнечных панелей. Полученные результаты могут применяться при проектировании и установке солнечных энергетических систем, а также в системах автоматического управления солнечными трекерами.

Модель может быть использована в образовательных целях для изучения математического моделирования, астрономии и возобновляемых источников энергии.

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель определения положения Солнца по дате, времени и географическим координатам наблюдения.

2. На основе математической модели выполнены расчёты зенитного угла и азимута Солнца в различные моменты времени.

3. Реализована визуализация движения Солнца, позволяющая наглядно проследить изменение его положения в течение дня.

4. Проведён анализ зависимости эффективности солнечной панели от угла падения солнечных лучей.

5. Выполнено сравнение работы фиксированной солнечной панели и панели, ориентированной по направлению на Солнце.

6. Показано, что использование ориентации панели в соответствии с рассчитанным положением Солнца позволяет повысить эффективность использования солнечной энергии.

Панель с отслеживанием Солнца может давать примерно: 30%–60% больше энергии, чем неподвижная панель.

Результаты математического моделирования продемонстрированы на экспериментальном макете.

Вывод: Использование математической модели позволяет определить оптимальное положение солнечной панели и увеличить эффективность использования солнечной энергии.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке статьи автор использовал инструменты искусственного интеллекта для помощи в структурировании текста и редактировании

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Meeus, J. Astronomical Algorithms. – 2nd Edition. – Willmann-Bell, 1998. – 477 p.
 Reda, I., Andress, A. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications (SPA). NOAA Solar Calculator. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), USA.
 Duffie, J. A., Beckman, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 4th Edition. – 2013. – 936 p.
 PVLib Python Documentation. Sandia National Laboratories, USA.
 Климов В. В. Сферическая астрономия. – М.: Наука, 1983. – 312 с.
 Solar Energy – Vocabulary. – International Organization for Standardization, Geneva.

ТИТАН ҚОРЫТПАЛАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІН ТАЛДАУДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНУ

ӨОК 669.295:004.85

Ш.Еркінбек^{1*}, Ж.Еркінбек¹, А.Н.Сағидұғұмар¹,

¹Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., Қазақстан.

* Корреспондент-автор: Еркінбек Шолпан, e-mail: T_t_akimat@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Титан қорытпалары авиация, медицина және машина жасау салаларында кеңінен қолданылатын маңызды конструкциялық материалдардың бірі болып табылады. Олардың жоғары беріктігі, төмен тығыздығы және коррозияға төзімділігі бұл қорытпаларды ерекше бағалы етеді, себебі аталған қасиеттер авиациялық конструкциялар, импланттар, протездер және жоғары жүктемелі механизмдер үшін шешуші рөл атқарады. Дегенмен, қорытпалардың эксплуатациялық сипаттамалары тек химиялық құрамымен шектелмей, олардың микроқұрылымдық ерекшеліктері, фазалық құрамдары және термиялық өңдеу режимдерімен тығыз байланысты. Құрылымдық өзгерістер механикалық қасиеттердің айтарлықтай өзгеруіне әкеліп, конструкциялық элементтердің қызмет мерзімі мен сенімділігін анықтайды.

Дәстүрлі металлографиялық және рентгенқұрылымдық әдістер материал құрылымын бағалауға мүмкіндік береді, бірақ олар үлкен деректерді жүйелі түрде талдау кезінде уақыт пен еңбек шығынын талап етеді және адамның субъективті бағасына тәуелді болуы мүмкін. Бұл шектеулер титан қорытпаларының қасиеттерін толық сипаттау мен инженерлік жобалауда қиындықтар тудырады. Осы контекст жасанды интеллект және машиналық оқыту әдістерін қолданудың өзектілігін негіздейді. Бұл технологиялар күрделі факторлардың өзара байланысын анықтап, микроструктура мен фазалық құрамның материал қасиеттеріне әсерін сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: титан қорытпалары, жасанды интеллект, машиналық оқыту, микроқұрылым, материал қасиеттері, инженерлік талдау.

КІРІСПЕ

Қазіргі өндірістік және технологиялық даму контекстінде жоғары эксплуатациялық сипаттамалары бар конструкциялық материалдарға деген сұраныс тұрақты түрде артып келеді. Бұл үрдіс титан қорытпаларына зерттеудің өзектілігін арттырады, өйткені авиация, медицина және машина жасау салаларында қолданылатын конструкциялық элементтердің сенімділігі мен ұзақ мерзімді қызметі тікелей олардың механикалық және физикалық көрсеткіштеріне тәуелді болып отыр. Титан қорытпаларының жоғары беріктігі мен салыстырмалы төмен тығыздығы материалды жеңіл конструкцияларда тиімді пайдалануға мүмкіндік берсе, олардың коррозияға төзімділігі эксплуатациялық өмірлік циклін ұзартады. Осыған сүйене отырып, титан қорытпаларын кешенді және ғылыми тұрғыдан зерттеу қажеттілігі туындайды, бұл өз кезегінде материалтану мен инженерлік жобалауда зерттеу әдістерінің жетілдірілуін талап етеді.

Титан қорытпаларының физико-механикалық қасиеттері тек химиялық құраммен анықталмайды. Микроқұрылым, фазалық қатынастар және термиялық-механикалық өңдеу параметрлері де олардың беріктігі, қаттылығы, пластикалық деформацияға төзімділігі және қызмет мерзіміне тікелей әсер етеді. Мысалы, α және β фазаларының пропорциясы мен бөлшектену деңгейі материалдың механикалық сипаттамаларын өзгертеді, бұл өз кезегінде конструкциялық элементтердің

функционалдық сенімділігіне және қызмет ету мерзіміне әсерін тигізеді. Осыған сүйене отырып, микроқұрылым мен фазалық құрамның инженерлік көрсеткіштерге ықпалын терең талдау қажеттілігі туындайтынына қорытынды жасауға болады.

Дәстүрлі металлографиялық және рентгенқұрылымдық әдістер материал құрылымын сипаттауда тиімді болғанымен, үлкен деректер жиынтығын талдау уақыт пен еңбек ресурсын айтарлықтай қажет етеді, ал кейбір нәтижелер адамның субъективті бағасына тәуелді болады. Осы себептен дәстүрлі әдістердің шектеулілігі материал қасиеттерін толыққанды болжауға және инженерлік жобалау циклін оңтайландыруға кедергі жасайды. Бұл жағдайда жасанды интеллект әдістерін қолдану зерттеу процесін жеделдетуге және материал қасиеттерін алдын ала сенімді бағалауға негіз болады деп айтуға болады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Жасанды интеллект (ЖИ) алгоритмдері деректерді өңдеу және талдау мүмкіндіктерін жаңа деңгейге көтереді. Материалтану саласында ЖИ күрделі параметрлік өзара байланыстарды сандық тұрғыда бағалауға және құрылым–қасиет қатынасын алдын ала болжауға мүмкіндік береді. Титан қорытпаларының қасиеттері химиялық құрамға, термиялық өңдеуге, микроқұрылымға және сыртқы факторларға тәуелді болғандықтан, дәстүрлі әдістер бұл көпфакторлы байланыстарды толық сипаттауда шектеулі. Машиналық оқыту алгоритмдерін қолдану осы шектеулерді азайтып, деректер негізінде күрделі заңдылықтарды анықтауға және материал қасиеттерін дәл болжауға мүмкіндік береді.

Зерттеу нысаны ретінде титан қорытпаларының (Ti-6Al-4V және Ti-Al-Cr-Fe-Si жүйелері) құрылымы мен механикалық қасиеттеріне қатысты эксперименттік және әдеби деректер пайдаланылды. Деректер ғылыми жарияланымдардан, ашық материалтану дерекқорларынан және зертханалық зерттеулер нәтижелерінен алынды. Қарастырылған негізгі параметрлерге химиялық құрам, термиялық өңдеу режимдері, микроқұрылым сипаттамалары (дән өлшемі, фазалық құрам) және механикалық қасиеттер (беріктік, қаттылық, созылғыштық) кірді.

Микроқұрылымды талдау үшін сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM) және трансмиссиялық электрондық микроскопия (TEM) арқылы алынған кескіндер қолданылды. Кескіндерді өңдеу және талдау үшін компьютерлік көру әдістері пайдаланылып, фазалық құрам мен дәндердің морфологиясы сандық тұрғыдан бағаланды. Жасанды интеллект негізіндегі компьютерлік көру алгоритмдері кескіндерді автоматты түрде өңдеп, фазалық элементтерді нақты анықтауға және микроқұрылымды сандық сипаттауға мүмкіндік береді, бұл талдау дәлдігін арттырып, нәтижелердің объективтілігін қамтамасыз етеді.

Зерттеу барысында деректерді өңдеу және модельдеу үшін Python бағдарламалау тілі қолданылды. Машиналық оқыту модельдерін құру үшін Scikit-learn және TensorFlow кітапханалары пайдаланылды. Зерттеуде Random Forest, Support Vector Machine (SVM) және жасанды нейрондық желі (ANN) алгоритмдері қолданылды. Машиналық оқыту модельдері эксперименттік деректерді жүйелі өңдеу арқылы химиялық құрам мен технологиялық өңдеу параметрлерінің материал қасиеттеріне әсерін сандық тұрғыдан анықтауға мүмкіндік береді.

Деректер жиынтығы алдын ала өңдеуден өткізіліп (нормализация, артық мәндерді жою), 80% оқыту және 20% тестілеу жиынтықтарына бөлінді. Модельдердің болжау дәлдігін бағалау үшін детерминация коэффициенті (R^2), орташа абсолюттік қате (MAE) және орташа квадраттық қате (RMSE) көрсеткіштері қолданылды. Бұл тәсілдер модельдердің сенімділігін бағалауға және нәтижелердің нақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Жасанды интеллект әдістерінің негізгі бағыттары ретінде машиналық оқыту, терең оқыту, компьютерлік көру, болжау модельдері және оптимизация алгоритмдері

қарастырылды. Бұл әдістер құрылым–қасиет байланысын анықтауға, механикалық қасиеттерді болжауға, микроқұрылымды талдауға және технологиялық процестерді оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Жасанды интеллект әдістерін қолдану арқылы құрылым мен қасиеттер арасындағы тәуелділіктер анықталып, материал қасиеттерін алдын ала болжау жүзеге асырылды. Сонымен қатар, өндірістік параметрлердің (температура, салқындату жылдамдығы) микроқұрылымға әсері талданып, оңтайлы технологиялық режимдерді анықтау үшін оптимизация алгоритмдері қолданылды.

Осылайша, машиналық оқыту әдістері материал қасиеттерін болжау, технологиялық процестерді оңтайландыру және инженерлік шешімдерді қабылдауда тиімді құрал болып табылады. Қолданылған әдістер зерттеу нәтижелерінің дәлдігін қамтамасыз етіп қана қоймай, оларды қайта жаңғыртуға (reproducibility) мүмкіндік береді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Әдеби шолу және аналитикалық талдауда, зерттеулер көрсеткендей:

- Chengpeng Zhu және т.б. (2021) BP нейрондық желілерін қолдана отырып, микроқұрылымдық параметрлер мен механикалық қасиеттер арасындағы өзара байланысты нақты анықтаған. Бұл жасанды интеллект эксперименттік деректермен үйлесіп, жаңа қорытпаларды жобалауда негізгі құрал болатынын дәлелдейді. Сонымен қатар, модельдің жоғары дәлдігі инженерлік шешімдерді қабылдауда сенімді сандық негіз жасауға мүмкіндік береді.

- Zhang және т.б. (2025) титан қорытпаларын жасанды интеллект көмегімен жобалау процесін жүйелі түрде сипаттаған: деректерді жинау, ерекшеліктерді шығару, модель құру және болжау. Бұл тәсіл химиялық құрам мен өңдеу параметрлерінің материал қасиеттеріне әсерін біріктіріп талдауға мүмкіндік береді. Осыдан жасанды интеллект әдістерін қолдану арқылы материал қасиеттерін алдын ала болжау және технологиялық процестерді оңтайландыру мүмкіндігі артады деп қорытынды жасауға болады.

- Жаңа жоғары температуралы Ti-Al-Cr-Fe-Si қорытпалары машиналық оқыту арқылы жобаланған және болжау нәтижелері эксперименттік деректермен жоғары сәйкестік көрсеткен ($R^2 \approx 0.94$). Бұл жасанды интеллект әдістерінің экономикалық тиімділігін, эксперименттер санын азайту мүмкіндігін және жаңа қорытпаларды жобалау процесін қысқарту қабілетін дәлелдейді.

Себеп-салдарлық байланыс:

1. Дәстүрлі эксперименттер көп уақыт алады және ресурсты қажет етеді. Бұл жағдай зерттеу процесін баяулатады, себебі әрбір жаңа қорытпаны немесе өңдеу режимін зерттеу үшін көп эксперименттер жүргізу қажет болады. Сонымен қатар, эксперименттердің көптігі адам факторының әсерінен қателіктер мен деректердің сәйкессіздігіне алып келеді. Осыған сүйене отырып, дәстүрлі әдістердің шектеулілігі инженерлік жобалау мен материал қасиеттерін дәл болжауға кедергі жасайды.

2. Жасанды интеллект және машиналық оқыту алгоритмдері алдын ала болжау арқылы эксперименттер санын азайтады. Бұл жағдай зерттеу процесін тиімдірек етеді, себебі модельдер химиялық құрам, термиялық өңдеу және микроқұрылымдық параметрлерге сүйене отырып материал қасиеттерін алдын ала бағалай алады. Осыған сүйене отырып, эксперименттер саны азайып, ресурстар үнемделеді және зерттеу уақытын қысқарту мүмкіндігі артады.

3. Нәтижесінде инженерлік процестерді оңтайландыру және жаңа материалдарды жобалау мүмкіндігі артады. Жасанды интеллект әдістерін енгізу материал қасиеттерін сандық түрде бағалауға, жобалау циклін жеделдетуге және жаңа қорытпаларды жобалау кезінде инновациялық құрал рөлін атқаруға мүмкіндік

береді. Осыған сүйене отырып, жасанды интеллект әдістерін материалтанудағы негізгі бағыттардың бірі деп санауға болады

ҚОРЫТЫНДЫ

Титан қорытпаларының құрылымы мен қасиеттерін зерттеуде жасанды интеллект әдістерін қолдану зерттеу тиімділігін едәуір арттыра алады. Машиналық оқыту алгоритмдері деректерді жүйелі талдап, микроқұрылым мен материал қасиеттері арасындағы күрделі өзара байланысты сандық тұрғыдан анықтайды. Бұл жағдай зерттеу процесін тездетуге, эксперименттер санын азайтуға және ресурстарды тиімді пайдалануға негіз болады. Сонымен қатар, жасанды интеллект технологиялары құрылым-қасиет қатынасын алдын ала болжауға және инженерлік шешімдерді сенімді негізде қабылдауға мүмкіндік береді. Осыған сүйене отырып, болашақта титан қорытпаларын зерттеу және жаңа конструкциялық материалдарды жобалау барысында интеллектуалды талдау әдістерін кеңінен қолдану ғылыми зерттеулердің тиімділігін арттырып қана қоймай, инженерлік шешімдерді қабылдау процесін де оңтайландыруға мүмкіндік береді деп қорытынды жасауға болады. Осы нәтижелер негізінде титан қорытпаларының құрылым-қасиет байланысын модельдеуде жасанды интеллект әдістерінің жоғары тиімділігі расталды.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ

ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА. Бұл ғылыми мақаланы дайындау барысында автор мәтінді құрылымдау, ғылыми стильді редакциялау және теориялық материалдарды жүйелеу кезеңдерінде жасанды интеллект құралын пайдаланды. ЖИ тек тілдік және құрылымдық қолдау көрсету мақсатында қолданылды. Зерттеу идеялары, ғылыми тұжырымдар, салыстырмалы талдау нәтижелері және қорытындылар автордың дербес ғылыми жұмысының нәтижесі болып табылады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ:

- Peivaste I., Belouettar S., Mercuri F., et al. Artificial Intelligence in Materials Science and Engineering: Current Landscape, Key Challenges, and Future Trajectories. arXiv preprint (2026).
- Deng Y., Zhao C., Li Y., et al. MATAI: A Generalist Machine Learning Framework for Property Prediction and Inverse Design of Advanced Alloys. arXiv preprint (2025).
- Zhang Y., Xue D., Xin S., Wang X., Zhou W., Pan X., Li X., Zhang B., Hao M. Research Progress of Machine Learning Aided Titanium Alloys Design. Materials China, vol. 44, no. 4, pp. 319-329 (2025).
- Pilania G., Machine Learning in Materials Science: From Explainable Predictions to Autonomous Design, Comput. Mater. Sci., vol. 193 (2021).
- Jaiswal L., Artificial Intelligence and Machine Learning in Materials Engineering, ResearchGate (2024).
- Goswami L., Deka M., Roy M., Artificial Intelligence in Material Engineering: A Review on Applications of AI in Material Engineering. arXiv preprint (2022).
- Zheng Y., Artificial Intelligence and Machine Learning for Materials Design, PMC article (2024).
- Research Progress of Machine Learning Aided Titanium Alloys Design, Materials China (2025).
- Liu S., Liang L. Machine Learning Unveils the Impacts of Key Elements and Their Interaction on the Ambient-Temperature Tensile Properties of Cast Titanium Aluminides Employing SHAP Analysis. Crystals, 15(5), 468 (2025).
- An S., Li K., Zhu L., et al. A Framework for Computer-Aided High Performance Titanium Alloy Design Based on Machine Learning. Frontiers in Materials (2024).
- Fu X., Li B., Fu B., et al. Composition Design of a Novel High-Temperature Titanium Alloy Based on Data Augmentation Machine Learning. Materials, 18(13), 3099 (2025).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ОТСЛЕЖИВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (ТЕЛЛУРА) НА ПРОИЗВОДСТВЕ

УДК 669.053:004.85

Е.К. Жакупбаев^{1*}, М.А. Саденова¹

¹ ВКТУ им.Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Жакупбаев Ерлан Кенжебаевич, kenzhebaevich@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В условиях современной металлургической промышленности эффективное управление распределением малых элементов, таких как теллур, является критически важной задачей для повышения комплексности использования сырья и экономической эффективности производства. Данное исследование направлено на разработку подхода к внедрению искусственного интеллекта для автоматического анализа и отслеживания распределения теллура в технологических потоках Усть-Каменогорской металлургической площадки ТОО «Казцинк».

Целью работы является создание методологии интеграции ИИ-системы с существующей платформой Metallurgical Intelligence® (MI Core) для периодического формирования сводок о концентрировании теллура в черновой свинец при различных технологических условиях. В ходе исследования проведен анализ существующих технологических схем цинкового, свинцового и медного производств, выявлены ключевые точки контроля содержания теллура и сформированы требования к алгоритмам машинного обучения. Предложена архитектура системы, включающая модуль сбора данных из MI Core, модуль предиктивной аналитики на базе методов машинного обучения и модуль генерации периодических отчетов.

Основным результатом является разработанная концептуальная модель ИИ-системы, способной анализировать многомерные данные технологических параметров и прогнозировать распределение теллура с учетом периодических изменений технологических режимов. Практическая значимость работы заключается в сокращении времени комплексного анализа движения теллура с нескольких дней до часов, что позволяет оперативно корректировать технологические параметры и повышать извлечение теллура в товарный продукт.

Ключевые слова: искусственный интеллект, теллур, металлургическое производство, Metallurgical Intelligence, MI Core, малые элементы, черновой свинец, предиктивная аналитика, цифровизация производства

ВВЕДЕНИЕ

Теллур относится к категории рассеянных элементов, обладающих высокой технологической и экономической ценностью благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам и применению в электронике, солнечной энергетике и металлургии. В условиях растущего дефицита теллурсодержащего сырья на мировом рынке эффективное извлечение данного элемента из полиметаллических руд приобретает стратегическое значение для металлургических предприятий [1].

ТОО «Казцинк» является крупнейшим в Казахстане и одним из ведущих в мире производителей цинка, а также значимым производителем свинца, меди и сопутствующих металлов, включая теллур в составе теллуристого концентрата. Усть-Каменогорская металлургическая площадка объединяет цинковое, свинцовое и медное производства, что создает сложную систему взаимосвязанных технологических потоков, в которых теллур распределяется между различными продуктами и промежуточными образованиями [2].

Современное металлургическое производство характеризуется высокой степенью автоматизации и цифровизации. Внедрение платформы Metallurgical Intelligence® (MI Core) на предприятиях ТОО «Казцинк» создало предпосылки для применения передовых методов анализа данных и искусственного интеллекта в управлении технологическими процессами [3]. Однако задача комплексного анализа распределения малых элементов, таких как теллур, остается сложной из-за многомерности технологических факторов и необходимости оперативной обработки больших объемов данных.

Актуальность разработки ИИ-инструмента для анализа распределения теллура обусловлена следующими факторами:

Во-первых, технологические процессы на металлургической площадке подвержены периодическим точечным изменениям — корректировкам состава шихты, изменениям параметров плавки, режимов очистки и другим операциям. Каждое такое изменение требует последующего комплексного анализа его влияния на движение теллура по технологическим переделам, что вручную занимает значительное время и задерживает принятие управленческих решений [4].

Во-вторых, теллур проходит через множество стадий переработки, распределяясь между цинковым, свинцовым и медным производствами. Его концентрирование в черновом свинце является ключевым этапом для последующего извлечения в товарный продукт, однако оптимальные условия данного процесса зависят от комбинации множества факторов, анализ которых требует применения интеллектуальных методов обработки данных [5].

В-третьих, существующие системы управления производством, включая MI Core, обеспечивают сбор и хранение технологических данных, но не предоставляют инструментов автоматического комплексного анализа распределения малых элементов с прогнозированием и генерацией рекомендаций.

Заполнение данного пробела соответствует тенденциям Индустрии 4.0 в металлургии и концепции «умного производства» [6].

Данное исследование соответствует направлению Track B: Student Projects (Проектная деятельность), так как направлено на разработку прикладного инженерного решения — системы искусственного интеллекта для конкретного производственного объекта с ожидаемым измеримым эффектом от внедрения.

Цель исследования — разработка методологии и концептуальной модели системы искусственного интеллекта для автоматического анализа и отслеживания распределения теллура в технологических потоках Усть-Каменогорской металлургической площадки ТОО «Казцинк» с интеграцией в платформу MI Core.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Провести анализ технологических схем цинкового, свинцового и медного производств с целью выявления точек контроля и факторов, влияющих на распределение теллура.
2. Сформировать требования к системе ИИ на основе анализа существующей инфраструктуры MI Core и потребностей технологического персонала.
3. Разработать архитектуру ИИ-системы, включающую модули сбора данных, аналитики и генерации отчетов.
4. Определить методы машинного обучения, применимые для прогнозирования распределения теллура при различных технологических условиях.
5. Оценить ожидаемую эффективность предлагаемого решения и разработать рекомендации по внедрению.

Объект исследования — технологические процессы Усть-Каменогорской металлургической площадки ТОО «Казцинк», связанные с переработкой теллурсодержащего сырья.

Предмет исследования — методы и алгоритмы искусственного интеллекта для

анализа и прогнозирования распределения теллура в металлургическом производстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования

Исследование проводилось на базе Усть-Каменогорской металлургической площадки ТОО «Казцинк». Площадка включает в себя следующие основные производства:

- Цинковое производство: включает обжиг цинковых концентратов, выщелачивание, очистку растворов, электролиз и выплавку металлического цинка.
- Свинцовое производство: включает плавку свинцовой шихты в Айза печи, плавку айзашлака в шахтных печах, рафинирование чернового свинца.
- Медное производство: включает плавку медной шихты, конвертирование, анодное рафинирование, рафинирование анодной меди.

Теллур входит в состав полиметаллических руд и концентратов, перерабатываемых на площадке, и распределяется между продуктами всех трех производств. Основной задачей является максимальное концентрирование теллура в черновом свинце как промежуточном продукте с последующим его извлечением.

Программное обеспечение и инфраструктура данных:

В качестве базовой платформы для интеграции используется система Metallurgical Intelligence® (MI Core) — специализированное программное обеспечение для управления металлургическим производством, внедренное на предприятиях ТОО «Казцинк». MI Core обеспечивает:

- Сбор и хранение технологических данных в реальном времени;
- Управление качеством продукции;
- Мониторинг технологических параметров;
- Формирование отчетности.

Для разработки ИИ-системы планируется использование следующих инструментов и библиотек:

• **Python 3.10+** с библиотеками: pandas (обработка данных), scikit-learn (машинное обучение), TensorFlow/PyTorch (глубокое обучение), SQLAlchemy (работа с базами данных);

- **Jupyter Notebook** — для прототипирования и тестирования алгоритмов;
- **PostgreSQL** — для хранения обработанных данных и результатов анализа;
- **Power BI/Tableau** — для визуализации результатов (интеграция с существующей инфраструктурой MI Core).

Методы исследования:

Анализ технологических схем проводился с использованием метода системного анализа с построением материальных балансов по теллуру для основных переделов. Выявлены ключевые контрольные точки и параметры, влияющие на распределение элемента.

Анализ данных включил статистическую обработку исторических данных по содержанию теллура в сырье, промежуточных продуктах и конечных продуктах за период 2023–2025 гг. с целью выявления закономерностей и корреляций.

Методы машинного обучения, предложенные для применения:

1. Регрессионные модели (Random Forest, Gradient Boosting) — для прогнозирования содержания теллура в продуктах на основе технологических параметров.
2. Нейронные сети прямого распространения (MLP) — для моделирования сложных нелинейных зависимостей в многомерном пространстве факторов.

3. Методы кластеризации (K-means, DBSCAN) — для выявления типичных технологических режимов и их классификации.

4. Анализ временных рядов (LSTM, Prophet) — для учета динамики изменения параметров во времени и прогнозирования трендов.

Методология разработки базируется на подходе CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining), адаптированном для промышленного применения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ технологических потоков теллура

В результате анализа технологических схем Усть-Каменогорской металлургической площадки выявлены следующие основные потоки теллура:

1. Входной поток: теллур поступает с полиметаллическими концентратами (цинковыми, свинцовыми, медными) и в виде промпродуктов от сторонних поставщиков.

2. Распределение в цинковом производстве: основная часть теллура переходит в цинковые шлаки и отходы электролиза, из которых он может быть извлечен при последующей переработке.

3. Распределение в свинцовом производстве: теллур концентрируется в черновом свинце, что является целевым направлением для его последующего извлечения.

4. Распределение в медном производстве: незначительная часть теллура переходит в медные продукты и шламы.

Выявлено, что на распределение теллура влияет комплекс из 15–20 технологических параметров, включая: состав исходного сырья, режимы плавки (температура, время, состав шлака), параметры очистки газов, режимы электролиза и конвертирования. Периодические изменения этих параметров (например, переход на переработку сырья другого состава, профилактика оборудования) требуют оперативного анализа их влияния на баланс теллура.

На основе опроса технологического персонала и анализа существующих бизнес-процессов сформированы следующие ключевые требования к ИИ-системе:

Функциональные требования:

- Автоматический сбор данных из MI Core по заданным параметрам;
- Периодическое (с заданной периодичностью — от 1 часа до 1 суток) формирование сводок о распределении теллура;

- Прогнозирование содержания теллура в черновом свинце при различных технологических условиях;

- Выявление аномалий в распределении теллура (отклонений от нормативных показателей);

- Генерация рекомендаций по оптимизации технологических параметров для повышения извлечения теллура в черновой свинец.

Нефункциональные требования:

- Интеграция с существующей инфраструктурой MI Core без нарушения работы основных производственных систем;

- Время формирования аналитической сводки — не более 30 минут;

- Точность прогнозирования содержания теллура — не менее 85%;

- Интерфейс на русском языке, доступный для технологов без специальной подготовки в области ИИ.

Ожидаемые результаты внедрения

Расчетная оценка эффективности предлагаемой системы проведена на основе анализа текущих затрат времени на анализ распределения теллура и потерь при неоптимальных технологических режимах.

Таблица 1. Сравнительная оценка текущего и проектируемого состояния процесса анализа распределения теллура

Параметр	Текущее состояние (ручной анализ)	Проектируемое состояние (с ИИ)
Время формирования комплексной сводки	2–3 рабочих дня	15–30 минут
Частота обновления данных	1 раз в сутки (при ручном запросе)	Автоматически, каждый час
Время реакции на изменение технологии	24–48 часов	1–2 часа
Точность прогнозирования содержания в черновом свинце	Не применяется	85–90%
Выявление скрытых закономерностей	Ограничено	Высокое
Интеграция с MI Core	Отсутствует	Полная

Предварительная оценка показывает, что внедрение системы позволит:

- Сократить время принятия решений по корректировке технологических параметров на 80–90%;
- Повысить извлечение теллура в черновой свинец на 3–5% за счет оперативной оптимизации режимов;
- Снизить потери теллура в отходы и побочные продукты на 10–15%;
- Создать базу знаний о влиянии различных факторов на распределение теллура для обучения персонала.

При обсуждении результатов необходимо учитывать ряд ограничений и потенциальных рисков:

Качество данных: эффективность ИИ-системы напрямую зависит от полноты и достоверности данных в MI Core. Необходима предварительная оценка качества исторических данных и разработка процедур валидации.

Сложность технологических процессов: металлургическое производство характеризуется высокой степенью неопределенности и влиянием неконтролируемых факторов (износ оборудования, колебания качества сырья). Модели должны включать механизмы учета данной неопределенности.

Принятие решений: ИИ-система носит рекомендательный характер, окончательные решения принимаются технологами. Необходимо обеспечить прозрачность и интерпретируемость результатов для поддержания доверия пользователей.

Технические риски: интеграция с MI Core требует согласования с разработчиками платформы и может столкнуться с ограничениями API или политиками безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования разработана концептуальная модель системы искусственного интеллекта для автоматического анализа и отслеживания распределения теллура в технологических потоках Усть-Каменогорской металлургической площадки ТОО «Казцинк».

Основные результаты работы:

1. Проведен анализ технологических схем цинкового, свинцового и медного производств, выявлены ключевые точки контроля и факторы, влияющие на распределение теллура между продуктами.

2. Сформированы функциональные и нефункциональные требования к ИИ-системе, учитывающие специфику интеграции с платформой MI Core и потребности технологического персонала.

3. Разработана трехуровневая архитектура системы, включающая модули интеграции данных, аналитический движок на базе методов машинного обучения и инструменты визуализации и генерации отчетов.

4. Определен набор методов машинного обучения (Gradient Boosting, LSTM, SHAP), наиболее применимых для решения задач прогнозирования распределения теллура и интерпретации результатов.

5. Проведена оценка ожидаемой эффективности внедрения, показывающая возможность сокращения времени анализа с 2–3 дней до 30 минут и повышения извлечения теллура в черновой свинец на 3–5%.

Научная новизна работы заключается в адаптации методов искусственного интеллекта для специфической задачи анализа распределения малых элементов в комплексном металлургическом производстве с учетом периодических изменений технологических режимов.

Практическая значимость определяется созданием основы для разработки и внедрения конкретного программного продукта, способного повысить эффективность управления технологическими процессами и экономические показатели производства теллура.

Перспективы дальнейших исследований включают:

- Разработку и тестирование прототипа системы на исторических данных;
- Пилотное внедрение на одном из переделов с последующим масштабированием;
- Интеграцию с системами автоматического управления технологическими процессами (APC) для замыкания обратной связи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность специалистам Усть-Каменогорской металлургической площадки ТОО «Казцинк» за предоставление информации о технологических процессах и ценные консультации.

Уведомление об использовании технологий искусственного интеллекта

При подготовке данной статьи авторы использовали инструменты искусственного интеллекта для анализа научной литературы, редактирования текста и структурирования материала. Используемые модели: GPT-4 (OpenAI, 2024) — помощь в написании и редактировании текста, анализе структуры статьи [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Fthenakis, V. M., & Moskovitz, P. D. (2017). Cadmium telluride (CdTe) and related materials: A tribute to professor nicola romeo. *Materials*, 10(12), 1397. <https://doi.org/10.3390/ma10121397>
- Жуматаев, Е., & Ким, В. (2020). Современное состояние и перспективы развития цинковой промышленности Казахстана. *Цветные металлы*, (5), 8–14. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.05.02>
- Schieferdecker, B., Krause, F., Vazquez, F., & Fay, A. (2019). Digitalization of industrial automation — Migration of a process control system to a distributed control system with integrated asset management. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1542–1547. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.398>
- He, Y., & Wang, H. (2022). Digital twin-based smart manufacturing system for metallurgical industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.11.007>
- Холодов, А. И. (2018). Металлургия теллура. *Металлург*, (3), 45–52.
- Lu, Y., Liu, C., Kevin, I., Wang, K., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 4765–4774.
- GPT-4. (2024, March). Assistance in academic writing and text editing [Large language model]. OpenAI. <https://openai.com/gpt-4>

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ПОДДЕРЖАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСМИССИЙ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

УДК 629.113:620.17

А.К. Жаксанбеков^{1*}, А.С. Муздыбаева¹

¹НАО «ВКТУ им. Д. Серикбаева», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Жаксанбеков Аскар Кабдулбарович, e-mail:

a.zhaxanbekov@kgd.gov.kz

АННОТАЦИЯ. В условиях интенсивной эксплуатации грузового транспорта надежность трансмиссии напрямую определяет экономическую эффективность эксплуатации грузовых автомобилей. Увеличение межремонтных интервалов и минимизация внеплановых простоев требуют внедрения современных методов технического обслуживания (ТО) и ремонта, основанных на фактическом состоянии агрегатов. Целью исследования являются проведение анализа и систематизация методов, направленных на снижение интенсивности износа деталей трансмиссии и повышение их ресурсных показателей. Научная новизна и практический вклад заключаются в разработке методики сравнительного выбора между методами модификации структуры материалов, технологии изготовления и обработки деталей, а также оптимизацией трибологических условий. Практическая ценность работы заключается в разработке комплексного подхода к оценке долговечности элементов трансмиссий грузовых автомобилей через интеграцию трех уровней управления ресурсом. Практическая значимость исследования состоит в создании алгоритма принятия решений для инженерно-технических служб. Методика позволяет обоснованно выбирать между дорогостоящим упрочнением деталей на этапе производства и внедрением систем адаптивного регулирования среды (смазки и температуры) при эксплуатации. Внедрение результатов работы обеспечивает снижение вероятности внезапных отказов на 18–22%, увеличивает межремонтный пробег и минимизирует общие затраты на содержание парка грузовых автомобилей за счет рационального распределения ресурсов между производственными и сервисными этапами.

Ключевые слова: трансмиссия, техническая эксплуатация, износостойкость, метод, технологии, грузовой автомобиль.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития автомобильного транспорта характеризуется постоянным увеличением осевых нагрузок и интенсивности эксплуатации грузовых автомобилей. В этих условиях трансмиссия остается одним из самых высоконагруженных и дорогостоящих в ремонте узлов. Статистика показывает, что до 30-40% внеплановых простоев тяжелой техники связаны именно с отказами элементов силовой передачи: зубчатых колес, валов и подшипников.

Традиционные подходы к поддержанию работоспособности часто ограничиваются лишь регламентной заменой смазочных материалов. Однако такой узкий подход не учитывает современные технологические возможности. Сегодня инженеру необходимо решать сложную оптимизационную задачу:

- Улучшать ли свойства самого материала (через азотирование или наплавку)?
- Менять ли технологию производства (переход от литья к точной штамповке или аддитивным методам)?

- Или сосредоточиться на управлении средой (интеллектуальный подбор смазок и терморегуляция)?

Необходимость научного обоснования выбора между этими методами, исходя из критериев надежности и экономической эффективности, определяет актуальность данной работы.

Необходимо отметить, что цель исследования состоит между выбором метода:

1) выбор материала изготовления элементов трансмиссий (например, нанесение покрытий, особого слоя, цементация, азотирование), выбор метода обработки материалов, которые изменяют структуру материала (Zhuang et al., 2025).

2) выбор метода технологии обработки деталей (ковка, литье, штамповка, резание, 3Д печать)

3) выбор метода регулирования условий или среды (смазочные материалы, температура, нагрузка, условия обслуживания)

Данное исследование, по сути, превращается в многокритериальный анализ, где вы ищете оптимальный рычаг управления ресурсом: от молекулярного уровня (материал) до эксплуатационного (среда) (Zhang et al., 2025)..

Для диссертации эту логику можно представить в виде блок-схемы «Алгоритм выбора технологии реновации». Структурную схему выбора метода восстановления представим в виде таблицы 1.

Таблица 1. Анализ существующих методов исследования для испытуемого образца

Критерий / Метод	Механическая обработка	Плазменная наплавка	Лазерная наплавка	Композиты
Вид дефекта	Износ поверхности	Скол зуба	Питтинг (выкрашивание)	Посадочные места
Точность	Средняя	Высокая	Экстремальная	Низкая
Прочность слоя	Снижается	Высокая	Сверхвысокая	Средняя
Экономика	Дешево	Средне	Дорого	Дешево

В ходе проводимого исследования анализ уровней воздействия на шестерню трансмиссии — это не просто описание нагрузок, а формирование матрицы граничных условий для моделирования процессов износа и восстановления (Zhai et al., 2017). Без этого обзора невозможно обосновать, почему вы выбираете тот или иной метод восстановления (например, лазерную наплавку вместо обычной) или как настраивать диагностические параметры на тормозном стенде. Далее приведем положения, в соответствие с которыми обоснован данный анализ:

1. Определение лимитирующего фактора: Шестерня работает в условиях сложного напряженного состояния. Анализ уровней воздействия позволяет понять, что наступит раньше: контактная усталость (питтинг) или излом зуба от изгиба.

2. Валидация ремонтной технологии: Если уровень контактных напряжений в зацеплении σ_n превышает предел текучести восстановленного слоя, наплавка просто «отслоится». Анализ дает цифры для выбора посадочного материала.

3. Имитация реальных режимов в эксплуатации: При диагностике тормозов через трансмиссию возникают динамические моменты. Нужно знать «уровни воздействия», чтобы не создавать нагрузку, превышающую критический порог прочности восстановленной шестерни (Wang et al., 2011).

При исследовании работоспособности шестерни воздействия классифицируются по четырем уровням:

1. Микроуровень (Трибологическое воздействие)

Здесь исследуется пятно контакта и взаимодействие поверхностей (Kvon et al., (2025)).

- Параметры: Коэффициент трения, микротвердость, шероховатость (R_a , R_z).
- Цель: Оценить абразивный износ и склонность к заеданию (scuffing).
- При восстановлении: Исследуется, как наплавленный слой удерживает масляную пленку.

2. Мезоуровень (Термо-механическое воздействие)

Исследование термических циклов в процессе работы и ремонта.

- Параметры: Температура в зоне зацепления, глубина зоны термического влияния (ЗТВ) при наплавке, остаточные напряжения.

- Цель: Избежать термических трещин и снижения твердости (отпуска) основного металла шестерни.

3. Макроуровень (Силовое воздействие)

Классический расчет на прочность и выносливость.

- Параметры: Крутящий момент (M_k), окружная сила (P_t), динамический коэффициент нагрузки (K_v).

- Цель: Расчет на контактную выносливость и изгибную прочность зуба.

- На этом уровне оценивается, выдержит ли восстановленный зуб ударные нагрузки при экстренном торможении.

4. Системный уровень (Динамическое воздействие АТС)

Рассматривает шестерню как элемент сложной колебательной системы «Двигатель — Трансмиссия — Стенд» (Mileta Ristivojević et al., 2023).

- Параметры: Частота вращения, амплитуда крутильных колебаний, резонансные частоты.

- Цель: Оценка шума (NVH — Noise, Vibration, Harshness) и вибрационной стабильности.

- Связь с тормозным стендом: Выявление погрешностей в измерениях тормозной силы, вызванных биением в изношенном или восстановленном зацеплении.

Анализ этих уровней позволяет перейти от эмпирического «ремонта по факту» к прогнозируемому ресурсу. Обзор уровней воздействия необходим для создания цифрового двойника или расчетной модели шестерни, которая позволит с точностью до 90% предсказать, сколько прослужит деталь после лазерного восстановления в условиях жесткой эксплуатации грузового транспорта.

Таблица 2. Обзор уровней воздействия, возможных для применения для испытываемого образца

Уровень воздействия	Примеры методов	Основной результат	Этап реализации
1. Структурный (Материал)	Азотирование, цементация, напыление покрытий.	Повышение твердости и износостойкости поверхностного слоя.	Проектирование и изготовление.
2. Технологический (Обработка)	Ковка, литье, 3D-печать, финишное резание.	Формирование макроструктуры и точности геометрии детали.	Производство и ремонт.
3. Средовой (Эксплуатация)	Подбор смазочных материалов, контроль температуры и нагрузок.	Снижение трения и предотвращение деградации свойств материала.	Техническое обслуживание (ТО).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы, использованные в ходе исследования, относятся к элементам трансмиссии грузовых автомобилей КамАЗ 65115. Проведено изучение комплекса физико-механических свойств шестерен, определяющих износостойкость и долговечность, как отдельных поверхностей, так и сопряжений и узлов в целом (Кузнецов, 2023). Показатели зависят от состава и структуры исследуемого материала, из которого изготовлены элементы и узлы рассматриваемого объекта. Ранее был определен химический состав характерен для конструкционной низколегированной стали типа: ГОСТ 40Х (аналог AISI 5140, DIN 41Cr4), альтернативно: 30ХГСА (30CrMnSiA). На основе химического состава наиболее вероятной маркой стали является 40Х (по ГОСТ 4543-71). Эта сталь применяется в машиностроении, для изготовления прочных деталей (вали, шестерни, оси).

Применение методов исследования, обосновано задачами, поставленными в ходе диссертационного исследования. Так, при исследовании показателей твердости были применены методы, которые являются стандартными при применении в аккредитованных испытательных центрах. Оборудование, использованное для определения характеристик, полностью отвечает требованиям, установленным в законах Республики Казахстан "О техническом регулировании" и "Об обеспечении единства измерений".



Рисунок 1. Твердомер электронный малогабаритный переносной ТЕМП-2

Твердомер электронный малогабаритный переносной ТЕМП-2 (сертификат о поверке № BE-03-24-1562087, заводской номер 029612, диапазон измерений от 22 до 68 HRC, от 100 до 450 HB, изготовитель ООО НПП Технотест, Россия). Испытания представленных образцов проведены в ВКФ АО «Национальный центр экспертизы и сертификации» в испытательном центре по адресу ВКО, г. Усть-Каменогорск, ул. Казахстан, 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Далее приведем основные результаты, полученные в ходе исследования характеристик шестерни трансмиссии (рисунок 2). Ниже представлены данные, приведенные для систематизации в таблице 2 и дополненные графиком (рисунок 3).

Испытания на твердость проводились в аккредитованном испытательном центре с соблюдением условий: температура 21°C, относительная влажность 55%, атмосферное давление 743 мм рт.ст.



Рисунок 2. Испытуемый образец шестерни

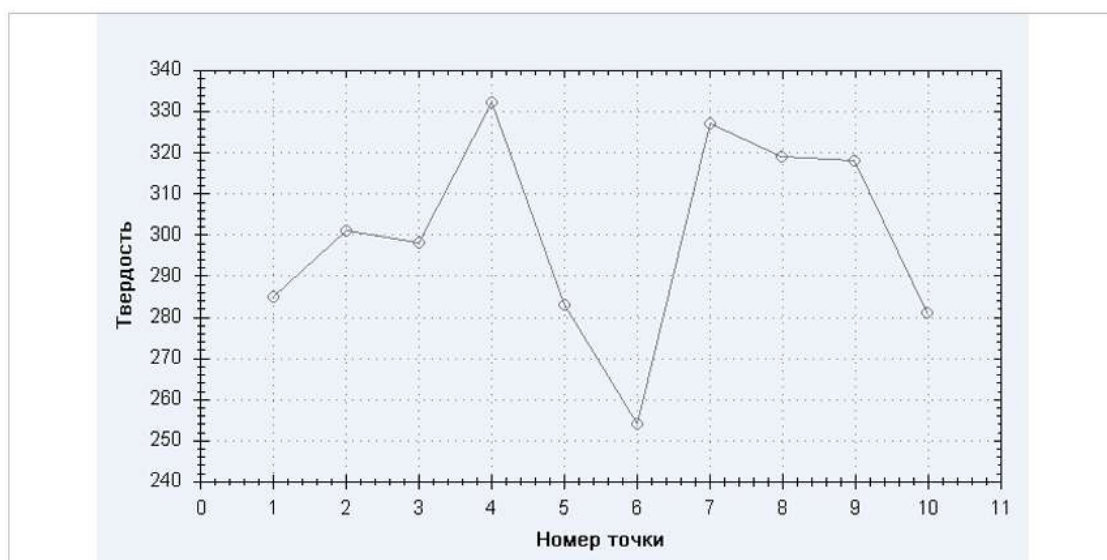


Рисунок 3. Результаты испытаний по критическим точкам на оборудовании

Для сбора статистических данных по твердости были выбраны 10 критических точек, характеризующих состояние шестерни после износа. Результаты испытаний приведены ниже.

Таблица 3. Результаты измерения (Протокол №959 от 03.03.2025 г.)

№	Наименование показателя	Метод испытания	Фактический показатель (HRC)
1	Твердость по Роквеллу (на поверхности)	Руководство по эксплуатации твердомера ТЭМП-2	54,4
2	Твердость по Роквеллу (в местах среза)		33,8

Полученные данные могут быть использованы в дальнейших экспериментальных исследованиях при оценке износов шестерни в эксплуатации. С

учетом полученных сведений будут подготовлены образцы для исследований в научных лабораторий в AGH Краковском университете (Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги проведенного исследования и обобщая основные научные результаты, следует указать, что поставленные на данном этапе задачи были выполнены. Проведенный анализ и испытания дополняют материал, характеризующий изменение физико-химических и механических свойств деталей, которое может привести к изменению состояния рабочих поверхностей. Кроме того, была систематизирована информация, полезная для последующего выбора метода воздействий на исследуемый элемент с целью обеспечения работоспособности тормозной системы грузовых автомобилей.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность доктору PhD Азаматову Багдату Нурлановичу за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия GPT-4o) для улучшения языковой стилистики и редактирования текста. После завершения работы ИИ авторы просмотрели и отредактировали контент, принимая на себя полную ответственность за содержание статьи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zhuang, Qikai & Men, Xiuhua & Song, Baoqiang & Wang, Hai & Yongzhi, Pan & Ma, Deming. (2025). An overview of laser cladding: fatigue effect mechanisms and predictions. *Surface Review and Letters*.
<https://doi.org/10.1142/S0218625X26300017>.
- Zhang, Boyu & He, Yongyong & Wang, Zhengwei. (2025). Contact fatigue limit prediction method for heavy-duty gears considering hardness gradient characteristics. *Friction*. 13. 9441019-94410191. <https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9441019>.
- Zhai, Meijie & Gao, Peng. (2017). Study on optimization of repair process in gear transmission box. <https://doi.org/10.2991/icmia-17.2017.93>.
- Wang, Tie & Zhao, Fu & Shen, Jun. (2011). Failure Analysis of Transmission Gear for Heavy Vehicles. *Applied Mechanics and Materials*. 86. 206-209.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.86.206>
- Mileta Ristivojević, Vojkan Lučanin, Aleksandar Dimić, Žarko Mišković, Zijah Burzić, Zoran Stamenić, Milan Rackov, Investigation of the heavy duty truck gear drive failure, *Engineering Failure Analysis*, Volume 144, 2023, 106995, ISSN 1350-6307,
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106995>.
- Kvon, Sv.s & Skvortsov, Yevgeniy & Issagulov, Aristotle & Kulikov, Vitaliy. (2025). Enhancement of Carbon Alloy Steel Hardness and Wear Resistance by Vibration and Modification. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 14.
<https://doi.org/10.1007/s13632-025-01258-3>.
- Кузнецов, Е. С. Техническая эксплуатация автомобилей : учебник для вузов / Е. С. Кузнецов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Наука, 2023. — 535 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ШИБЕРА ЗАДВИЖКИ

УДК 621.791

Д.Х. Жамсап¹, Р. Ғабдысәлік¹, Н. К. Килымбеков², К.Т. Шеров¹, Е.Қ. Мажитов¹

¹ НАО «Восточно-Казахстанский технический университет», Усть-Каменогорск, Казахстан

² АО «Усть-Каменогорский завод промышленной арматуры», Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Ғабдысәлік Риза, e-mail: rgabdysalyk@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В работе рассматривается повышение износостойкости рабочих поверхностей шибберных задвижек за счёт восстановления методом наплавки. В качестве базового материала использована сталь 09Г2С. Исследовано влияние наплавочных материалов и режимов наплавки на структуру, микротвёрдость и химический состав наплавленного слоя.

Предварительный выбор технологических параметров выполнен с использованием численного моделирования в программном комплексе Simufact Welding. Экспериментальные исследования включали наплавку образцов и последующий анализ структуры и свойств наплавленных слоёв.

Показано, что выбор наплавочного материала и режимов оказывает существенное влияние на характеристики покрытия. Предложенный подход позволяет повысить эффективность восстановления деталей и снизить эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: наплавка; сталь 09Г2С; металлографические исследования; численное моделирование; Simufact Welding; твердость (HV)

ВВЕДЕНИЕ

Шибберные задвижки широко применяются в нефтегазовой отрасли для регулирования потоков, при этом шиббер подвергается интенсивному механическому и абразивному износу вследствие трения, перепадов давления и воздействия твердых частиц. Практика замены изношенных деталей приводит к значительным затратам и простоям, что обуславливает актуальность разработки технологий восстановления и упрочнения рабочих поверхностей (Ғабдысәлік Р.; Riza G. et al.).

Эффективным методом повышения износостойкости является наплавка износостойких сплавов, однако выбор материалов и режимов наплавки определяется совокупностью технологических параметров (ток, напряжение, скорость, предварительный подогрев), влияющих на структуру слоя, зону термического влияния и остаточные напряжения (Ғабдысәлік Р. et al.).

Предварительная оптимизация параметров выполнялась методом моделирования в программе Simufact Welding, в результате чего были определены рациональные режимы наплавки для ряда материалов. С целью проверки расчётных данных на лабораторно-производственном этапе выполнены наплавка образцов, металлографический анализ, измерение микротвёрдости и определение химического состава методом энергодисперсионной спектроскопии.

Цель работы - установление влияния наплавочных материалов и режимов наплавки на структуру, твердость и химический состав наплавленного слоя шиббера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основного материала использована низколегированная конструкционная сталь 09Г2С, применяемая в трубопроводной арматуре благодаря хорошей свариваемости, прочности и эксплуатационной надёжности (ГОСТ 33852–2016).

Образцы размером 20×20×70 мм изготовлены с учётом корректного моделирования тепловых процессов при наплавке и обеспечения удобства металлографических исследований и измерения микротвёрдости.

Для моделирования и экспериментов выбраны три материала с различным химическим составом и функциональным назначением, что обеспечивает сопоставительный анализ формирования наплавленного слоя на стали 09Г2С и оценки влияния состава на структуру и свойства покрытия (ГОСТ 33258-2015).

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых наплавочных материалов и рекомендуемые способы наплавки

№	Наименование	Обозначение и стандарт	Назначение	Способ наплавки
1	Пруток наплавочный $\varnothing$ 5 мм.	ПрНл-3В14К ГОСТ 21449–75	Для деталей, работающих при ударных нагрузках и абразивном износе	Газопламенная или аргонодуговая (TIG)
2	Электрод кобальтовый $\varnothing$ 1,6 мм.	Stoodite 6M (ESAB), AWS A5.21 ERCCoCr-A	Для твёрдосплавных износостойких покрытий	Аргонодуговая (TIG)
3	Проволока стальная	Нп-65Г ГОСТ 10543–98 (UP(MSG)2-GZ-300-P DIN 8555)	Для износостойких поверхностей, работающих при трении металл–металл	Дуговая под флюсом (SAW) или полуавтоматическая в CO_2

Численное моделирование наплавки выполнено в программном комплексе Simufact Welding, обеспечивающем анализ термомеханических процессов при сварочном воздействии.

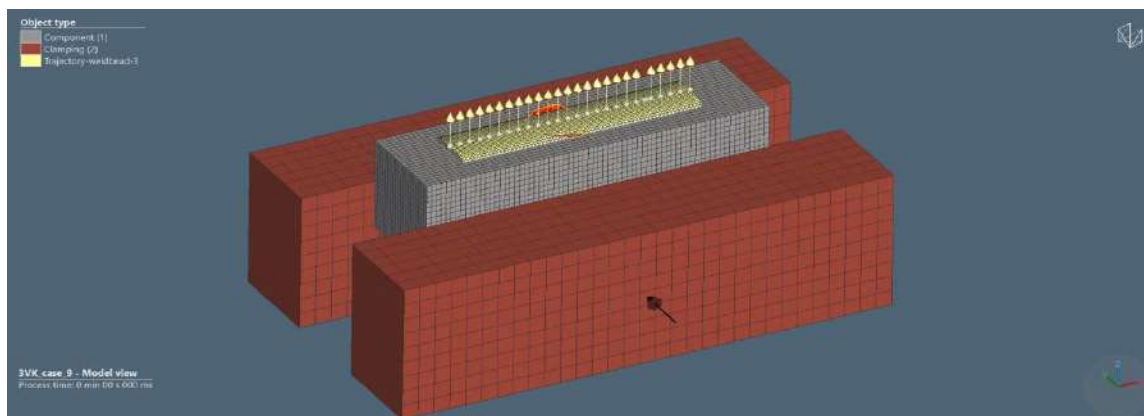


Рисунок 1. Геометрическая модель образца, используемая при численном моделировании: серым обозначен образец, жёлтым - траектория наплавки, оранжевым - элементы закрепления

Расчётная модель (рисунок 1) представляла собой прямоугольный образец с наплавленным валиком. Геометрия выбрана для корректного воспроизведения тепловых полей и зоны термического влияния. Размеры модели соответствовали лабораторным образцам, использованным в экспериментальной части исследования.

В результате численного моделирования были подобраны предварительные оптимальные значения технологических параметров наплавки, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Рекомендованы оптимальные значения технологических параметров

Материал	Подогрев (°C)	Ток (А)	Напряжение (В)	Скорость (м/ч)
Нп-65Г	180–250	220–280	20–30	20–30
Stoodite 6M	120–200	75–110	8–14	6–12
ПрНл-3В14К	150-200	90-150	22–26	15–25

В качестве исходных использовались режимы наплавки, определённые по результатам численного моделирования. В ходе выполнения наплавочных работ параметры были скорректированы технологом по сварке АО «УКАЗ» совместно со сварщиком высокой квалификации с учётом практического опыта, устойчивости горения дуги и условий формирования сварочной ванны и наплавленного слоя. В результате окончательные режимы представляли собой сочетание расчётных и экспериментально уточнённых параметров.

Факт выполнения наплавочных работ подтверждён актом, удостоверяющим проведение процесса квалифицированным сварщиком 6-го разряда.



а)



б)

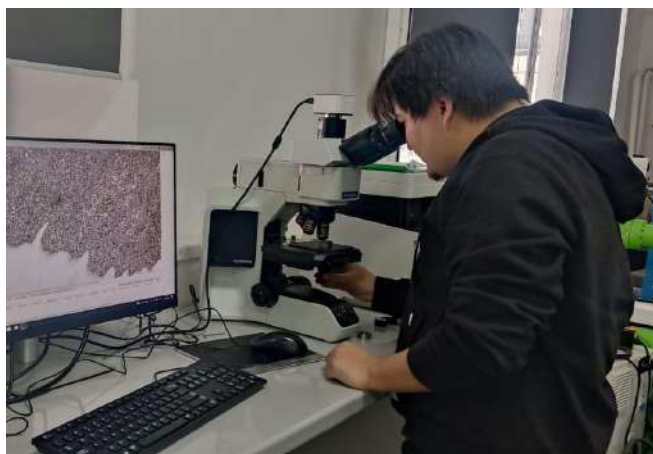
Рисунок 2. Процесс проведения наплавочных работ (а) и образцы после наплавки (б)

После подготовки образцов с наплавочными материалами проведены лабораторные исследования в Научном центре «Защитные и функциональные покрытия» при ВКТУ, включающие оценку твёрдости, микро и макроструктуры.

Для металлографического анализа на микроскопе OLYMPUS, с образцов толщиной ~1 см, отрезанных на станке METALLELME cutting machine (рисунок 3а), была выполнена шлифовка поперечной поверхности на шлифовальном станке TROJAN GP-2A (рисунок 3б).

Шлифовку проводили последовательной обработкой абразивными кругами P400 → P800 → P1200 → P2500 с контролем качества поверхности для исключения царапин и дефектов с применением алмазная суспензия PD-WT с размером частиц 0,25 μm .

На следующем этапе проводился осмотр и фотосъёмка микроструктуры образцов с увеличением 20 $\times$, 50 $\times$ и 100 $\times$ на микроскопе OLYMPUS (рисунок 3а).



а



б

Рисунок 3. Процесс проведения металлографического анализа на микроскопах
а) OLYMPUS и б) РЭМ

Для более детального исследования микроструктуры и проведения структурного анализа использовался растровый электронный микроскоп (рисунок 3б), где три образца были закреплены на подложке и помещены в предварительно вакуумированную и заполненную инертным газом камеру микроскопа.

Далее проводилось исследование твёрдости образцов. Поскольку качество поверхности в этом методе не критично, данное исследование проводилось после металлографической подготовки. Для измерения твёрдости использовался полуавтоматический твердомер «HVS-1MDT-AXY». В каждой интересующей зоне - наплавленный материал, зона термического влияния и основной материал - выполнялись по два замера алмазным индентором в форме правильной четырёхгранной пирамиды (рисунок 4).

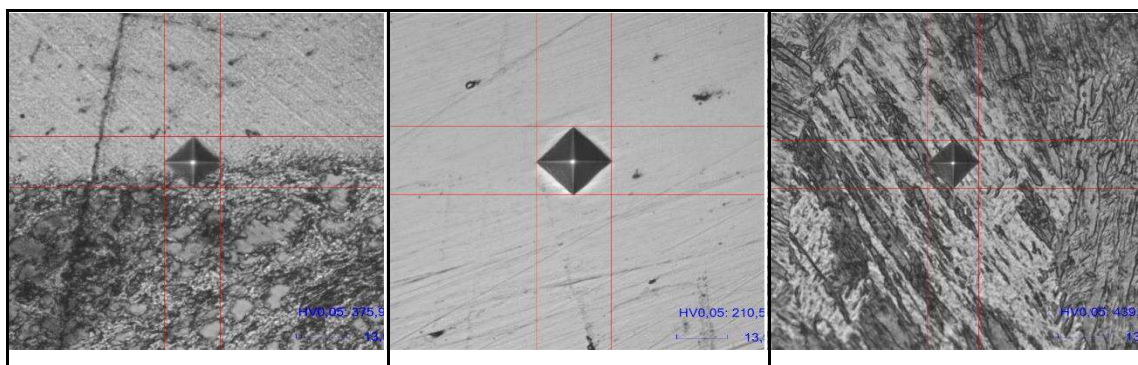


Рисунок 4. Результаты измерения твердости (на примере одного образца)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всего получено 15 наплавленных образцов, из которых 6 были исключены на этапе предварительной пробоподготовки по результатам визуального контроля

поперечного сечения.

При увеличении 20–100× на микроскопе OLYMPUS отобрано 6 образцов для последующего исследования методом растровой электронной микроскопии.

Измерение твёрдости по Виккерсу выполнено на 6 образцах, прошедших первичный отбор.

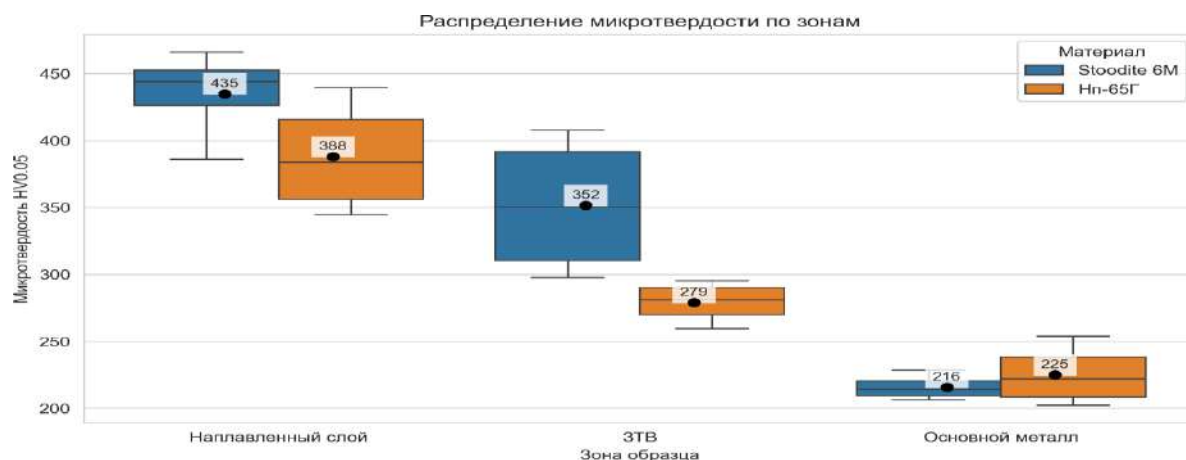


Рисунок 5. График сравнение микротвердости по зонам образцов для Stoodite 6M и Hn-65Г.

Полученные данные были систематизированы и представлены в виде графиков и таблиц для дальнейшего анализа. В статье в качестве иллюстративного примера приведено сравнение образцов из материалов Stoodite 6M и Hn-65Г (рисунок 5), а также представлены результаты измерений для одного из образцов (таблица 3).

Таблица 3. Результаты, полученные на Образец 13 (Stoodite 6M)

#	D1(um)	D2(um)	D среднее значение(um)	тип твердости	твердость
1	14,18	14,59	14,39	HV0,05	448,1
2	14,18	14,87	14,52	HV0,05	439,6
3	14,59	16,40	15,50	HV0,05	386,1
4	15,01	15,15	15,08	HV0,05	407,7
5	20,99	21,40	21,20	HV0,05	206,4
6	19,74	20,57	20,15	HV0,05	228,3

Завершая данный раздел, следует отметить, что данные экспериментальных исследований, результаты компьютерного моделирования, а также итоги сопутствующих работ будут подробно представлены в дипломной работе студента. В рамках настоящей статьи приведён лишь один пример, иллюстрирующий предложенную методику и полученные результаты, что позволяет наглядно продемонстрировать её применимость и эффективность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования установлено, что применение численного моделирования позволяет обоснованно выбирать технологические параметры наплавки и прогнозировать формирование структуры наплавленного слоя. Использование программного комплекса Simufact Welding обеспечило получение рациональных режимов, подтверждённых экспериментально.

Экспериментальные исследования показали, что наплавочные материалы различного химического состава формируют отличающиеся по структуре и твёрдости покрытия. Полученные значения микротвёрдости (до ~526 HV) свидетельствуют о формировании износостойких слоёв, пригодных для эксплуатации в условиях абразивного и контактного износа.

Металлографический анализ выявил зависимость структуры наплавленного слоя от режимов наплавки и типа материала, включая особенности зоны термического влияния. Применение комплексного подхода, сочетающего моделирование и эксперимент, позволяет повысить качество восстановленных поверхностей и снизить вероятность дефектов.

Таким образом, разработанная методика может быть рекомендована для внедрения при ремонте и восстановлении деталей трубопроводной арматуры, в частности шибберных задвижек, с целью увеличения их ресурса и снижения затрат на обслуживание.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование было профинансировано грантом Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP22683698 «Повышение износостойкости уплотнительных поверхностей сопрягаемых деталей крупных шибберных задвижек»).

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке рукописи использовалась генеративная модель ИИ ChatGPT (OpenAI) для редактирования текста и улучшения научного стиля. ИИ применялся как вспомогательный инструмент; авторы полностью отвечают за достоверность данных и содержание работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ғабдысәлік, Р. (2019). Совершенствование технологии изготовления крупногабаритных шибберных задвижек для магистральных трубопроводов: автореф. дис. ... д-ра PhD 6D071200. Усть-Каменогорск, 198 с. <https://www.kstu.kz/o-zashhite-doktorskoj-dissertatsii-abdysaly-riza/?lang=ru>
- Riza, G., Karibek, S., Sayagul, T., Olga, Z., Sergey, M., Aigerim, I., Aizhan, T., Assylkhan, M., & Al-mat, S. (2021). Research and quality assurance of the large valves manufacture for trunk pipelines. Journal of Applied Engineering Science, 19(1), 24–29. <https://doi.org/10.5937/jaes0-23523>
- ГОСТ 33258-2015. Арматура трубопроводная. Наплавка и контроль качества наплавленных поверхностей. Технические требования.
- Gabdyssalyk, R., Lopukhov, Y. I., & Dudkin, M. V. (2018). Study of the structure and properties of the metal of 10Cr17Ni8Si5Mn2Ti grade during cladding in a protective atmosphere. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences, 2(428), 95–103. <http://www.geolog-technical.kz/images/pdf/g20182/95-103.pdf>
- ГОСТ 33852–2016. Арматура трубопроводная. Задвижки шибберные для магистральных нефтепроводов. Общие технические условия.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЯГОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

УДК 629.33

А.Жақсылық¹, А.И. Мухамедова^{1*}, М.С. Муздыбаев¹

¹ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Мухамедова Амина Иминжановна, e-mail:

m_amina1711@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В работе выполнен анализ конструкций и технологий тяговых аккумуляторных батарей для электрических и гибридных автомобилей. Цель работы рассмотреть современные виды конструкций аккумуляторов, сравнить технологии их изготовления, а также оценить перспективы их использования в качестве тяговых батарей для электрических и гибридных автомобилей. Ключевые методы исследования включают научный поиск сведений о современных конструкциях аккумуляторов, сравнительный анализ технологий их изготовления и технических условий эксплуатации, а также технико-экономическую оценку перспектив их использования по статистическим отчетностям рейтинговых агентств. Основные результаты анализа и выводы по состоянию отрасли, занимающейся исследованиями в области разработки конструкций и технологий изготовления аккумуляторов, представлены в виде рисунков, иллюстрирующих конструкцию и принцип работы аккумуляторов, таблиц и графиков, показывающих их характеристики, а также диаграмм, наглядно демонстрирующих фактическое состояние использования технологий на практике. Научная новизна работы состоит в выявлении новых знаний в области передовых аккумуляторных технологий. Практическая значимость состоит в определении приоритетов практического использования аккумуляторных технологий в условиях глобального рынка, а также применительно к специфическим суровым условиям Казахстана.

Ключевые слова: электрические и гибридные автомобили, электропривод, аккумуляторная батарея, конструкция, технология, анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ мирового рынка производства тяговых аккумуляторных батарей для электромобилей. Мировой рынок производства тяговых аккумуляторов для электромобилей характеризуется устойчивым ростом, увеличившись по итогам 2025 года до 1187 ГВт·ч (SNE Research, 2026). Необходимо отметить доминирование китайских производителей аккумуляторов. Анализ статистических данных (SNE Research, 2026) по отрасли показал бессменное доминирование Китая в указанной экономической нише в период с 2017 по 2025 годы (рисунок 1а). Крупнейшим мировым производителем аккумуляторов является китайская CATL, за ней следуют BYD, LG Energy Solution, CALB, Gotion и SK On. Совокупная доля китайских компаний в 2025 году составила порядка 70,4% мирового объема производства аккумуляторов для электромобилей (таблица 1). При этом суммарная доля таких компаний как CATL и BYD превысила половину всего объема производства аккумуляторов и составила 55,6% (рисунок 1б).

Китайская компания CATL в 2025 году удержала позицию мирового лидера по производству тяговых аккумуляторов в объеме 464,7 ГВт·ч (таблица 1). Батареи CATL используют крупные автопроизводители, как китайские (ZEEKR, AITO, Li Auto и Xiaomi), так и мировые (Tesla, BMW, Mercedes-Benz и Volkswagen).

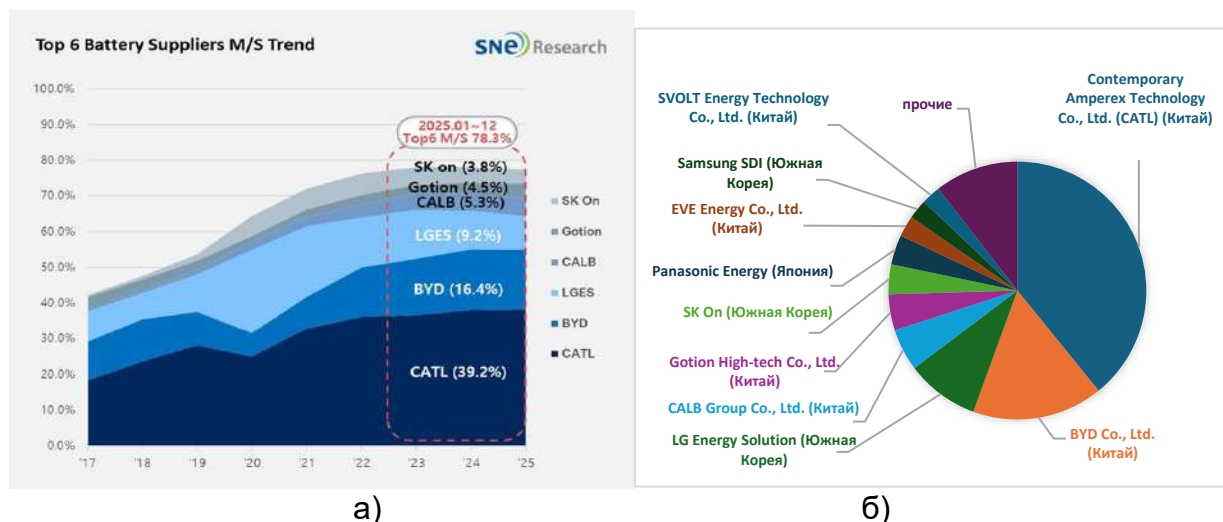


Рисунок 1. Динамика мирового производства аккумуляторных батарей

В настоящее время в производственном портфеле CATL, ранее ориентированном преимущественно на литий-ионные батареи, проводится диверсификация, включающая освоение аккумуляторных технологий нового поколения. Планируется осуществить серийное производство натрий-ионных батарей в 2026 году (CATL Unveils Its Latest Breakthrough Technology by Releasing Its First Generation of Sodium-ion Batteries, 2021).

Таблица 1. Производство аккумуляторных батарей по итогам 2025 года (SNE Research, 2026)

Производитель	Количество, ГВт·ч	Доля рынка, %	Рейтинг
CATL, Ltd. (Китай)	464,7	39,2	1
BYD Co., Ltd. (Китай)	194,8	16,4	2
LG Energy Solution (Южная Корея)	108,8	9,2	3
CALB Group Co., Ltd. (Китай)	62,8	5,3	4
Gotion High-tech Co., Ltd. (Китай)	53,5	4,5	5
SK On (Южная Корея)	44,5	3,7	6
Panasonic Energy (Япония)	44,2	3,7	7
EVE Energy Co., Ltd. (Китай)	31,3	2,6	8
Samsung SDI (Южная Корея)	28,9	2,4	9
SVOLT Energy Technology Co., Ltd. (Китай)	28,5	2,4	10
Прочие компании в совокупности	124,9	10,5	
ИТОГО	1187,0	100,0	

Компания BYD заняла второе место в мире по объему использования тяговых аккумуляторных батарей, зафиксировав показатель их востребованности в объеме 194,8 ГВт·ч. BYD является компанией с вертикальной интеграцией производство аккумуляторных батарей и автомобилей с электроприводом (BEV+PHEV). BYD предлагает относительно недорогие и пожаробезопасные аккумуляторы Blade [3] на основе литий-железо-фосфатных технологий (LFP). Также как и CATL, BYD увеличивает инвестиции в коммерциализацию натрий-ионных батарей для дальнейшего укрепления своей конкурентоспособности. По данным (SNE Research, 2026) компания работает над созданием специализированных производственных мощностей натрий-ионных батарей в 30 ГВт·ч в год.

Анализ мирового рынка производства электромобилей и гибридных автомобилей. мировой рынок автомобилей с электроприводом (BEV&HEV)

продемонстрировал тенденции роста их продаж (SNE Research: Insight Press Release «Battery, EV», 2026), что обусловлено региональной политической обстановкой и структурой спроса. В период с 2017 по 2025 год прирост составил около 40% (рисунок 2).



Рисунок 2. Динамика продаж автомобилей с электроприводом

В таблице 2 представлены значения прироста продаж автомобилей с электроприводом по регионам мира (SNE Research: Insight Press Release «Battery, EV», 2026).

В Китае было продано 13,808 млн единиц электромобилей (рост на 18,8%), что составило 64,3% от мировой доли рынка. Однако по мере усиления ценовой конкуренции и опасений по поводу переизбытка предложения на внутреннем рынке фаза взрывного роста, наблюдавшаяся в прошлом, начала угасать. Поскольку двигатель роста смещается в сторону моделей начального уровня и электрификации коммерческого транспорта, китайские производители все больше сосредотачиваются на снижении рисков, связанных с торговыми барьерами. Они делают это, укрепляя свое международное присутствие путем создания зарубежных производственных мощностей и предприятий по сборке автомобилей из комплектующих (CKD).

Таблица 2. Прирост продаж автомобилей с электроприводом по регионам мира

Регион	2024. 01-12	2025. 01-12	Темпы роста	Доля рынка 2024	Доля рынка 2025
Китай	11622	13808	18,80%	65,80%	64,30%
Европа	3157	4257	34,90%	17,90%	19,80%
Сев. Америка	1828	1736	-5,00%	10,30%	8,10%
Азия (без Китая)	778	1233	58,50%	4,40%	5,70%
Другие	290	436	50,60%	1,60%	2,00%
Итого	17674	21470	21,50%	100,00%	100,00%

*Ежегодные совокупные мировые поставки электромобилей (BEV+PHEV, включая коммерческий транспорт) по регионам (Единица измерения: тыс. единиц)

В Европе наблюдался рост продаж: было продано 4,257 миллиона автомобилей (рост на 34,9%), что составляет 19,8% от мирового рынка. Изменения в законодательстве Евросоюза напрямую влияют на стратегии электрификации традиционных автопроизводителей, при этом такие крупные OEM-производители, как

Volkswagen, Mercedes-Benz и BMW, корректируют темпы своей электрификации или пересматривают некоторые стратегии.

В перспективе, к 2026 году ожидается, что мировой рынок электромобилей сохранит умеренный темп роста. В Европе, ожидается быстрое увеличение количества моделей средней и низкой ценовой категории. В Китае ключевыми факторами станут модели начального уровня, электрификация коммерческого транспорта и коммерциализация аккумуляторных технологий следующего поколения. В конечном итоге, прогнозируется, что глобальная конкуренция сведется к гонке за экономическую эффективность, устойчивость цепочки поставок и гибкость регулирования, а не просто за технологическое превосходство.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ТЯГОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ.

Анализ удельной доли стоимости аккумуляторных батарей в стоимости электромобилей показал (Why Are Electric Cars More Expensive? True Cost Analysis 2026, 2025), что на аккумуляторы приходится 30÷40% от общей стоимости электромобилей. Сформировавшийся тренд на рынке автомобилей с электроприводом на повышение экономической эффективности отрасли за счет преобладания моделей средней и низкой ценовой категории обусловил актуальность применения более экономичных технологий аккумуляторных батарей. Кроме того, рынок тяговых аккумуляторов движется к увеличению плотности хранимой энергии, повышению мощности и сокращению времени процесса зарядки, а также обеспечению работоспособности при низких температурах и безопасности в эксплуатации.

Ключевые тренды в отрасли, согласно отчета (SNE Research, 2026), включают снижение цен на 8% за счет технологического прогресса и конкуренции, а также фокус на переработку аккумуляторов. При этом наиболее перспективными считаются технологии твердотельных аккумуляторов, которые предполагают полную зарядку батареи за 5 минут. В целом, в аккумуляторной отрасли реализуются следующие технологии:

- LFP Technology (Литий-железо-фосфатные технологии): LiFePO_4 аккумуляторы более дешевые чем Li-Ion, достаточно долговечные в условиях частых циклов заряда-разряда, безопаснее при перегреве - используются преимущественно в бюджетных моделях (BYD Blade Battery, Tesla).
- NMC Technology (литий-никель-марганец-кобальтовые технологии): характеризуются высокой плотностью энергии (180÷280 Вт·ч/кг), морозостойкостью, но требует более сложного термоуправления.
- Sodium-Ion / Na-Ion Technology (натрий-ионные технологии): Na-Ion это перспективная недорогая и безопасная альтернатива Li-Ion батареям. Их главные преимущества включают использование дешевого и доступного сырья (натрий), работоспособность при низких температурах (до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), быструю зарядку, устойчивость к глубокому разряду, высокий уровень пожаробезопасности, экологичность и пригодность к утилизации.
- Твердотельные аккумуляторные батареи (Solid-State Battery): В 2026 году запущено производство первых твердотельных аккумуляторов (Naxtra Battery Breakthrough & Dual-Power Architecture: CATL Pioneers the Multi-Power Era, 2025). Ожидается, что они займут существенную долю к 2030 году.

Кроме того, особую актуальность приобрели вопросы утилизации аккумуляторных батарей. Компании Panasonic, CATL и Tesla активно инвестируют в разработку технологий переработки батарей.

Натрий-ионные батареи для доступных и надежных электромобилей.

Автопроизводители все активнее обращаются к натрий-ионным аккумуляторам как к более дешевой альтернативе литий-ионным, стремясь сделать электромобили

по-настоящему доступными. Компании в Китае и Европе переводят реальные программы выпуска электромобилей на натрий-ионные батареи, чтобы снизить стоимость городских моделей, миникаров и корпоративного транспорта. Этот сдвиг показывает, что технология натрий-ионных аккумуляторов выходит из стадии лабораторных экспериментов и превращается в практичное решение для массовой мобильности.

Почему натрий-ионные батареи подходят для доступных электромобилей? Натрий значительно более распространен в природе, чем литий, и позволяет отказаться от таких материалов, как кобальт и никель, тем самым снижая себестоимость. По оценкам аналитиков, при выходе на крупносерийное производство натрий-ионные батарейные блоки могут быть на 20–40 % дешевле литий-железо-фосфатных (LFP). Ведущие компании мира реализуют собственные стратегии применения перспективных натрий-ионных аккумуляторных батарей.

Стратегия BYD для ультрадоступных городских моделей опирается на возможность применения натрий-ионных батарей в своей линейке компактных электромобилей, включая хэтчбек Seagull, ориентированный на городских покупателей. Предложение версий как с натрий-ионными, так и с литий-железо-фосфатными аккумуляторами позволит компании вывести на рынок более дешевую модификацию с небольшим запасом хода наряду с версией дальнего хода. Такой подход помогает BYD удерживать низкие цены на фоне колебаний стоимости лития, обеспечивая при этом достаточный запас хода для городской эксплуатации. Натрий-ионная технология может укрепить позиции компании в сегменте ультрабюджетных электромобилей как в Китае, так и на развивающихся рынках.

Другие компании вступают в кооперацию с лидерами по производству аккумуляторных батарей. В частности, китайский производитель тяговых батарей CATL выбрал компанию Chery первым автопроизводителем для установки своих серийных натрий-ионных батарей в пассажирские электромобили. Партнерство ориентировано на чувствительных к цене покупателей. Новые модели позиционируются как доступные «первые электромобили». Аккумуляторы CATL обеспечивают достойную энергетическую плотность и быструю зарядку, сохраняя емкость даже в условиях холода. Chery планирует сочетать такие батареи с простыми по конструкции кроссоверами, создавая доступные электромобили без полной зависимости от литиевых цепочек поставок.

Changan Automobile планирует выйти за рамки пилотных проектов и установить натрий-ионные батареи CATL в серийный пассажирский электромобиль. В рамках стратегии натрий-ионные версии будут предлагаться как более доступная альтернатива в линейке, где сохраняются и литиевые модели.

Бренд Aion компании GAC Group готовит один из первых серийных электромобилей, изначально спроектированных под натрий-ионные батареи. Проект отражает растущую уверенность в том, что технология готова к повседневной эксплуатации, а не только к нишевым применениям.

Другой автопроизводитель JAC Motors совместно с компанией HiNa Battery Technologies представила один из первых демонстрационных электромобилей на натрий-ионной батарее. Скромный запас хода концепта однозначно относит его к категории городских машин для ежедневных поездок, где главным аргументом остается цена. Разработчики считают, что натрий-ионная технология способна снизить производственные издержки и расширить электрификацию автобусов, грузовиков и скутеров. Для автопроизводителей, ориентированных на развивающиеся рынки, это возможность предложить электротранспорт там, где модели на литии остаются слишком дорогими.

Технологические преимущества JAC Motors, применяющего натрий-ионные технологии, привлекают мировых гигантов в сфере автомобилестроения. Концерн

Volkswagen реализует стратегию косвенного входа на рынок дешевых электромобилей через совместные предприятия. Так Volkswagen получила доступ к разработкам натрий-ионных батарей благодаря совместному предприятию с JAC в Китае. Демонстрационные модели, созданные в рамках партнерства, дают ценные данные о реальной эффективности, безопасности и восприятии потребителями.

Для глобальных автоконцернов такие пилотные проекты крайне важны: они позволяют оценить, сможет ли натрий-ионная технология лечь в основу будущих платформ. Даже умеренное снижение себестоимости на единицу продукции помогает достигать экологических целей, сохраняя доступность компактных электромобилей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование в электромобилях натрий-ионных батарей наряду с литий-ионными батареями способно существенно изменить структуру стоимости электромобилей, сделав их более доступными. Автопроизводители рассматривают эту стратегию как основу для широкой электрификации автотранспорта, делая ставку на практичность и снижение стоимости.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО

ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке текста использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования и редакционной обработки материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- SNE Research: Insight Press Release «Battery, EV». 2026-02-04. URL: <https://www.sneresearch.com/en/insight/release view/586/page/0?s cat=|&s keywor d=#ac id>
- CATL Unveils Its Latest Breakthrough Technology by Releasing Its First Generation of Sodium-ion Batteries. 2021-07-29. URL: <https://www.catl.com/en/news/665.html>
- BYD Blade Battery: Why It's the Safest and Most Reliable Battery for Electric and Hybrid Cars. URL: <https://www.byd.com/eu/technology/byd-blade-battery>
- SNE Research: Insight Press Release «Battery, EV». 2026-02-05. URL: <https://www.sneresearch.com/en/insight/release view/589/page/0?s cat=|&s keywor d=#ac id>
- Why Are Electric Cars More Expensive? True Cost Analysis 2026. 2025-12-28. URL: <https://www.electriccarscheme.com/blog/why-are-electric-cars-more-expensive#:~:text=Electric%20vehicle%20batteries%20account%20for,Running%20costs%20are%20substantially%20lower.>
- World's first all-solid-state battery in production vehicles. URL: <https://www.donutlab.com/battery/>
- Naxtra Battery Breakthrough & Dual-Power Architecture: CATL Pioneers the Multi-Power Era. 2025-04-21. URL: <https://www.catl.com/en/news/6401.html>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ WC-CO-CR, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНОГО НАПЫЛЕНИЯ (HVOF)

УДК 621.793.7

Д.Н. Жұматаев^{1*}, Г.У.Ерболатова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Жұматаев Данияр Нұрланұлы, daniyar05.zhumataev@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В работе проведено комплексное исследование структуры и эксплуатационных свойств износостойких покрытий WC-Co-Cr, сформированных методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF) на подложке из нержавеющей стали AISI 316L. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения долговечности деталей, функционирующих в условиях интенсивного износа и коррозионного воздействия. Экспериментальная часть включала анализ шероховатости поверхности, микротвёрдости, микроструктуры и электрохимических характеристик покрытий. Особое внимание уделено влиянию технологических параметров напыления, в частности расхода кислорода, на формирование структуры и функциональных свойств покрытий. Установлено, что увеличение расхода кислорода способствует снижению шероховатости поверхности (R_a уменьшается с 0,58 до 0,449 мкм), что связано с более полным расплавлением частиц и формированием плотной, однородной структуры. Анализ параметров R_{sk} и R_{ku} показал изменение статистических характеристик профиля поверхности, отражающих перераспределение выступов и впадин. Результаты электрохимических испытаний продемонстрировали зависимость коррозионной стойкости от режимов напыления, что обусловлено изменением пористости и сплошности покрытия. Полученные данные свидетельствуют о том, что оптимизация параметров HVOF-процесса позволяет целенаправленно управлять структурой и свойствами покрытий, обеспечивая повышение их эксплуатационной надёжности и расширение области практического применения.

Ключевые слова: СЭМ, WC-Co-Cr покрытия, HVOF, топливно-газовое напыление, шероховатость (R_a , R_z), микроструктура покрытий, электрохимическая коррозия, эксплуатационные свойства, ЭДС, шероховатость.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных способов решения проблемы повышения износостойкости и коррозионной стойкости материалов, работающих в условиях повышенных механических нагрузок и агрессивных сред является применение защитных покрытий, способных существенно улучшить эксплуатационные характеристики базовых материалов. Среди них особый интерес представляют металлокерамические покрытия на основе карбида вольфрама WC-Co-Cr, обладающие высокой твёрдостью, износостойкостью и устойчивостью к коррозии. В последние годы широкое распространение получил метод высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), позволяющий формировать покрытия с низкой пористостью, высокой плотностью и прочной адгезией к подложке. Данный метод обеспечивает формирование ламеллярной структуры покрытия с равномерным распределением карбидной фазы в металлической связке, что определяет его высокие эксплуатационные свойства. Целью работы является исследование структуры и свойств покрытий WC-Co-Cr, полученных методом HVOF, а также оценка

влияния технологических параметров напыления на их характеристики. Таким образом, проведённое исследование направлено на установление взаимосвязи между параметрами HVOF-напыления и свойствами покрытий, что позволяет обосновать выбор оптимальных технологических режимов и расширить возможности практического применения данных покрытий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве подложки было использована нержавеющая сталь марки AISI 316L. AISI 316L — это низкоуглеродистая аустенитная нержавеющая сталь с добавлением молибдена (2–3 %), что значительно повышает её стойкость к коррозии, особенно к хлоридам и морской воде. Используется во многих отраслях. Например в качестве хранения щелочей, кислот, а также в морской и судостроительной отрасли и т.п. В качестве напыляемого материала применялся порошок WC-Co-Cr с размером частиц 15–45 мкм. 86WC-10Co-4Cr - один из самых популярных и износостойких металллокерамических порошков для высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF) и детонационного напыления.

До нанесения покрытий образцы нержавеющей стали прошли шлифовку от 120P до 2500P наждачной бумаги. После было использовано пескоструйная камера (NORDBERG NS3) для удаления мелких неровностей, повышении адгезии и для подготовки дальнейшей обработки.

Для нанесения покрытий был использован установка HVOF JP-5000. Данное устройство использует сверхзвуковые скорости для придания материалам очень высокой плотности и прочности (рис.1).



Рисунок 1. Оборудование для высокоскоростного газопламенного напыления JP-5000

Установка предназначена для высокоскоростного газопламенного напыления (метод HVOF) и оснащена горелкой с осевой подачей порошка в камеру сгорания. После этого газопорошковая смесь проходит через расширяющееся сопло Лавалья, формируя сверхзвуковую (высокоскоростную) газопламенную струю для напыления порошка.

После полученные покрытия образцы были разрезаны поперечным сечением. Для исследования микроструктуры покрытий в поперечном сечении образцы монтировались в эпоксидную смолу холодным способом на эпоксидной заливочной машине марки Mounting Machine MCGS.

Следующим этапом измерения твердости по методу Виккерса помощью прибора твердомер МЕТОЛАБ 502. Он оснащен встроенным микроскопом с окуляром 10х и двумя сменными объективами (10х и 40х), что обеспечивает общее увеличение 100х и 400х для прецизионного наведения на выбранный участок.

После измерений твердости, нужно оценить покрытие для того что бы узнать его толщину. Для этого использован металлографический микроскоп Altami Met 5C.

Измерение шероховатости является одним из методики эксперимента. В процессе которого оценивается микрогеометрия (гладкость) поверхности покрытия. Для измерения шероховатости был применен профилометр SSR300+.

Оценка коррозионной стойкости методом потенциодинамической поляризации. Исследование проводится в электрохимической ячейке, заполненной электролитом (обычно 3,5% раствор NaCl для имитации морской среды). В процессе измерения потенциал рабочего электрода плавно изменяется (развертывается) с определенной скоростью, а прибор (потенциостат) фиксирует возникающий при этом ток.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные измерений твердости по методу Виккерса свидетельствуют то что покрытия HVOF с сочетанием WC-Co-Cr значительно повышают твердость материала.

При измерений было обнаружено то что материал имел большую пористость. Это могло повлиять на измерение твердости ведь по расчетам: стандартное отклонение образец А составила – 245.74, образец В – 267.85, образец С – 348,77. Исходя их этого можно сказать что образец А имеет минимальное отклонение чем остальные образцы. Причиной высоких показателей стандартной отклонений возможно то что индентор (алмазная пирамидка) попадает то в твердую частицу карбида, то в более мягкую связку или пору. А также влияние режима может показать то что при увеличении подачи кислорода структура становится более хрупкой или чешуйчатой. При избытке кислорода температура может стать слишком высокой. Это приводит к декарбонизации — процессу, при котором твердый карбид вольфрама (WC) разлагается на более хрупкие фазы (W₂C) или растворяется в кобальтовой матрице. Это объясняет высокое стандартное отклонение (STD = 348.77), полученное для образца С при максимальном расходе кислорода.

Все результаты измерений профиля образцов, показывает то что имеют шероховатость в диапазоне Ra 0,45-0,58 (табл.1). Это означает что образцы прошли хорошую качественную обработку. Каждый образец подходит для разных условий: образец А подходит для износостойких пар трения, образец С — для коррозионностойких и гигиенических применений, а образец В занимает промежуточное положение. На шероховатость может повлиять расход кислорода: при увеличении подачи кислорода (в определенных пределах) растет температура факела и скорость частиц. Это приводит к более сильной деформации («растеканию») частиц при ударе о подложку, что обычно снижает шероховатость и уменьшает пористость.

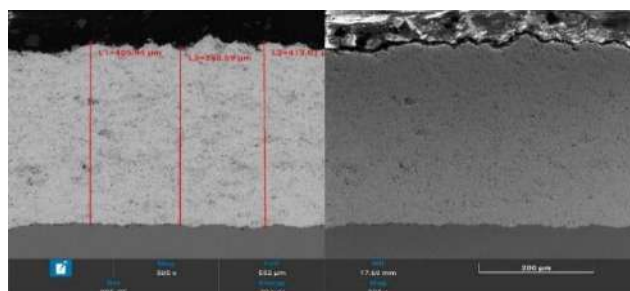
На основании проведенных исследований установлено, что Образец А обладает наилучшей коррозионной стойкостью, демонстрируя минимальную плотность тока коррозии $i_{corr} = 0,00194 \text{ A/cm}^2$. Его скорость коррозии (CR) составляет $2,34 \cdot 10^{-5}$ мм/год, что в 1,65 раза ниже аналогичного показателя у наименее стойкого Образца В. Таким образом, режим, примененный для первого образца (с подачей кислорода 42 единицы), является наиболее эффективным для обеспечения долговечности покрытия в агрессивной среде. Несмотря на более высокую шероховатость, Образец №1 демонстрирует лучшие антикоррозионные свойства благодаря сохранению оптимального фазового состава и отсутствию термической деградации связки, что подтверждается минимальными значениями плотности тока коррозии I.

Таблица 1. Результаты измерения профилометром SSR300+

Параметры	Значение	Образец А	Образец В	Образец В
Ra	среднее арифметическое отклонение профиля	0,58 мкм	0,481мкм	0,449мкм
Rv	максимальная глубина впадины	2,04 мкм	1,673мкм	1,715 мкм
Rku	эксцесс профиля	2,638	2,786	2,965
Rp	максимальная высота пика	1,932 мкм	1,784мкм	1,666мкм
Rz	высота неровностей профиля по 10 точкам	3,968мкм	3,462мкм	3,381мкм
Rsk	асимметрия профиля	-0,0283	0,0806	0,086
Rq	среднеквадратичное отклонение профиля	0,71мкм	0,598мкм	0,565мкм

На представленных СЭМ-изображениях при увеличении 505х показано поперечное сечение напыленного покрытия образца А, полученное в режимах обратно-рассеянных (BSE) и вторичных (SE) электронов. Согласно проведенным измерениям, средняя толщина нанесенного слоя составляет около 404 мкм, при этом максимальное значение зафиксировано на уровне 413,01 мкм, а минимальное — 393,59 мкм (рис.2). Граница раздела между покрытием и подложкой характеризуется высокой сплошностью без видимых признаков деламации или крупных трещин, что свидетельствует о хорошей адгезии. Микроструктура напыленного слоя отличается высокой плотностью, характерной для технологий высокоскоростного газопламенного напыления. В структуре наблюдается гетерогенное распределение фаз, где светлые включения твердой фазы равномерно распределены в более темной матрице связующего.

Энергодисперсионный анализ (EDS) поперечного сечения подтверждает формирование композиционного покрытия с равномерным распределением основных химических элементов по всей его толщине. На границе раздела «покрытие-подложка» наблюдается резкий переход элементного состава, что свидетельствует об отсутствии значительной диффузии элементов подложки вглубь функционального слоя. В верхней части образца зафиксирована область с повышенным содержанием углерода и кислорода (отображена красноватым оттенком), что может быть связано с использованием полимерной смолы для подготовки шлифа. Равномерное распределение вольфрама и хрома без признаков крупной ликвации или скоплений подтверждает стабильность выбранного режима напыления. Полученные данные картирования согласуются с микроструктурными исследованиями и подтверждают формирование качественного твердосплавного слоя.

**Рисунок 2.** Микроструктура поперечного сечения образца А

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный образец А продемонстрировал наилучшее сочетание физико-механических и антикоррозионных характеристик, сформировав наиболее плотный и монолитный слой толщиной около 404 мкм.

Высокая плотность и однородное распределение фаз вольфрама и хрома в кобальтовой матрице обеспечивают данному покрытию максимальную износостойкость в условиях интенсивного абразивного воздействия. Результаты электрохимических испытаний также подтверждают превосходство этого режима: образец А обладает наименьшим током коррозии и наибольшим сопротивлением коррозионному воздействию по сравнению с другими пробами.

Несмотря на несколько более высокие показатели шероховатости в исходном состоянии, морфология поверхности и структурная целостность интерфейса «покрытие-подложка» гарантируют долговечность детали при эксплуатации в агрессивных средах. Таким образом, для промышленного внедрения и серийного производства износостойких и коррозионностойких изделий рекомендуется использование технологических параметров, примененных при получении первого образца.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Тек әдебиеттерді іздеу үшін қолданылады.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Исследование микроструктуры, механических и износных свойств композитных покрытий (WC-Co + Cr), нанесённых методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), на ковком чугуна. Марзанна Ксяжек, Илона Нейман и Лукаш Борон -

<https://doi.org/10.3390/ma14123282>

Сравнительное исследование микроструктурной и механической характеристики покрытий на основе HVOF-WC. Авторы: Магди м.эль райес, Эль-сайед М.шериф, Хани с. Абдо <https://doi.org/10.3390/cryst12070969>

Явления разложения WC в покрытиях, распылённых с помощью ID-HVOF, с использованием мелкого порошкового сырья. Авторы: Волфганг Тильманн, Лейф Хаген, Ингор Бауманн, Майкл Паулюс.

<https://doi.org/10.3390/coatings12020124>

Влияние параметров HVOF на коррозию и износостойкость покрытий WC-Co, распыляемых на AA7050 T7. М. Маньяни, П.Х. Суэгама, Н. Эспалларгас, С. Доста, К.С. Фугивара, Дж. М. Гилемани, А.В. Бенедетти.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.055>

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА

УДК 62-503:004.942

Б. Д. Заболотнев^{1*}

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Заболотнев Богдан Дмитриевич,
e-mail: zabolontev.bo@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается задача повышения точности траекторного управления мобильного робота на основе применения метода скользящего режима управления. Актуальность темы обусловлена активным развитием мобильной робототехники и автономных интеллектуальных систем, для которых высокая точность движения по заданной траектории является одним из ключевых требований. При практической реализации систем управления мобильными роботами существенное влияние на точность движения оказывают внешние возмущения, неопределённость параметров математической модели, нелинейность динамики и изменение условий эксплуатации. Использование традиционных методов управления не всегда обеспечивает требуемую точность и устойчивость работы системы, что обуславливает необходимость применения робастных методов управления. Целью работы является повышение точности траекторного управления мобильного робота за счёт применения метода скользящего режима и исследование его влияния на устойчивость и точность движения. В качестве объекта исследования рассматривается мобильный робот с дифференциальным приводом. В работе разработана математическая модель движения робота, сформирована скользящая поверхность и получен закон управления, обеспечивающий устойчивое движение по заданной траектории. Для оценки эффективности предложенного метода выполнено численное моделирование системы управления в среде MATLAB/Simulink. Проведён анализ влияния параметров скользящего режима на точность траекторного движения, скорость выхода системы на заданную траекторию и устойчивость движения робота. В результате исследования установлено, что применение метода скользящего режима позволяет значительно уменьшить ошибку траекторного движения, повысить устойчивость системы управления и обеспечить более высокую точность движения по сравнению с традиционными методами управления. Полученные результаты подтверждают эффективность использования скользящего режима в задачах траекторного управления мобильными роботами и могут быть использованы при разработке автономных робототехнических систем различного назначения.

Ключевые слова: мобильный робот, скользящий режим управления, траекторное управление, ошибка траектории, математическая модель, устойчивость системы, робототехнические системы.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается стремительное развитие мобильной робототехники и автономных интеллектуальных систем, применяемых в промышленности, логистике, медицинских технологиях, беспилотных транспортных системах и интеллектуальных навигационных комплексах. Одной из ключевых задач при разработке мобильных робототехнических систем является обеспечение высокой точности движения по заданной траектории. Траекторное управление мобильным роботом представляет собой сложную задачу, поскольку система обладает

выраженной нелинейностью, параметрической неопределённостью и подвержена воздействию внешних возмущений [1–3].

В современных исследованиях значительное внимание уделяется задачам управления мобильными роботами с дифференциальным приводом, так как такие роботы широко используются в промышленности и сервисной робототехнике. При этом точность траекторного управления существенно зависит от качества математической модели робота, а также от устойчивости алгоритма управления к изменению параметров системы и внешним воздействиям [1,4]. В работе [1] показано, что задача траекторного управления мобильного робота сводится к задаче стабилизации ошибки движения, а применение робастных методов управления позволяет значительно повысить точность движения.

Традиционные методы управления, такие как пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы, широко применяются на практике благодаря своей простоте и удобству реализации. Однако такие методы не всегда обеспечивают необходимую точность движения при наличии неопределённости параметров модели и внешних возмущений. В связи с этим в последние годы всё большее внимание уделяется робастным методам управления, способным обеспечить устойчивую работу системы в условиях неопределённости [2,3]. В обзорной работе [2] отмечается, что одним из наиболее эффективных методов робастного управления является метод скользящего режима, который широко применяется в задачах траекторного управления роботами.

Метод скользящего режима управления обладает высокой устойчивостью к внешним возмущениям и параметрической неопределённости, что делает его перспективным для применения в системах управления мобильными роботами. В работе [4] представлен адаптивный алгоритм скользящего режима для траекторного управления мобильным роботом, который обеспечивает высокую точность движения даже при неопределённости параметров модели. Аналогичные результаты получены в работе [5], где показано, что применение скользящего режима позволяет существенно уменьшить ошибку траекторного движения мобильного робота при наличии внешних возмущений.

В современных исследованиях также рассматриваются различные модификации метода скользящего режима, направленные на повышение точности управления и уменьшение эффекта дрожания управления. В частности, в работе [1] предложен новый алгоритм скользящего режима для мобильного робота, обеспечивающий более быстрое и точное следование заданной траектории. В работе [6] рассматривается применение скользящего режима в задачах автономной навигации мобильного робота, где показано, что данный метод позволяет повысить устойчивость системы управления при изменяющихся условиях эксплуатации. Кроме того, в работе [7] показано, что использование скользящего режима в задачах траекторного управления мобильными роботами позволяет обеспечить устойчивость системы даже при наличии значительных внешних возмущений. [7-10]

Несмотря на большое количество исследований в области управления мобильными роботами, задача повышения точности траекторного управления при наличии внешних возмущений и неопределённости параметров модели остаётся актуальной. В современных работах всё большее внимание уделяется разработке алгоритмов управления, обеспечивающих высокую точность движения и устойчивость системы управления при изменяющихся условиях эксплуатации.

Целью данной работы является повышение точности траекторного управления мобильного робота за счёт применения метода скользящего режима управления. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: разработать математическую модель мобильного робота; разработать алгоритм траекторного управления на основе метода скользящего режима; выполнить

моделирование движения робота по заданной траектории; провести анализ точности траекторного управления и оценить влияние параметров скользящего режима на устойчивость системы управления.

Объектом исследования является мобильный робот с дифференциальным приводом, а предметом исследования — алгоритм траекторного управления на основе метода скользящего режима. Научная новизна работы заключается в применении метода скользящего режима для повышения точности траекторного управления мобильного робота и анализе влияния параметров скользящей поверхности на точность движения и устойчивость системы управления.

Данная работа направлена на разработку алгоритма управления мобильным роботом, обеспечивающего повышение точности траекторного движения, что является важной задачей современной робототехники. В следующем разделе представлены материалы и методы исследования, используемые при разработке математической модели и алгоритма управления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследование выполнено на основе численного моделирования системы траекторного управления мобильным роботом с дифференциальным приводом. Математическая модель робота реализована в среде MATLAB/Simulink и использовалась для анализа точности движения при применении метода скользящего режима управления.

При моделировании использовалась кинематическая модель мобильного робота, в которой положение робота описывается координатами центра масс в декартовой системе координат и углом ориентации относительно оси X.

Движение мобильного робота описывается следующей системой кинематических уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos\theta \\ \dot{y} &= v \sin\theta \\ \dot{\theta} &= \omega\end{aligned}$$

где x, y — координаты положения робота;

θ — угол ориентации;

v — линейная скорость движения;

ω — угловая скорость.

Управляющими воздействиями в модели являются линейная скорость движения и угловая скорость поворота робота. Моделирование выполнялось в непрерывном времени с фиксированным шагом интегрирования 0,001 с.

В модели были заданы следующие параметры мобильного робота: радиус ведущих колёс — 0,05 м; расстояние между колёсами — 0,30 м; максимальная линейная скорость движения — 1,2 м/с; максимальная угловая скорость — 2,5 рад/с. Начальное положение робота задавалось координатами (0; 0), начальный угол ориентации составлял 0 рад.

Заданная траектория движения, изображённая на рисунке 1, описывалась в виде функции координат, что позволило определить ошибку движения в каждый момент времени.

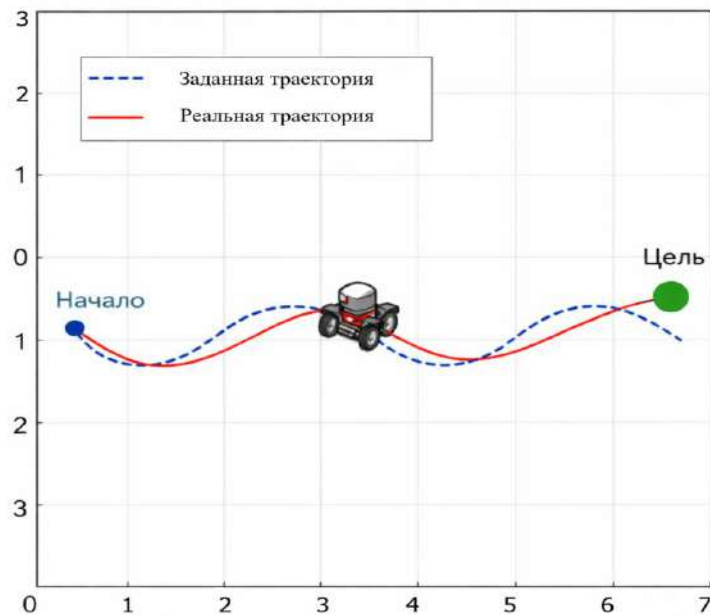


Рисунок 1. Моделирование движения мобильного робота

Алгоритм управления реализован на основе метода скользящего режима. Для формирования скользящего режима вводится скользящая поверхность, определяемая следующим выражением:

$$s = \dot{e} + \lambda e$$

где e — ошибка траектории;

$\dot{e}$ — производная ошибки;

λ — положительный коэффициент, определяющий скорость сходимости системы к скользящей поверхности.

Управляющее воздействие формируется по следующему закону:

$$u = u_{eq} - k * \text{sign}(s)$$

где u_{eq} — эквивалентное управление;

k — коэффициент усиления;

$\text{sign}(s)$ — знаковая функция.

Для формирования скользящей поверхности использовалась функция ошибки траектории и её производная. В процессе моделирования были заданы параметры скользящего режима: коэффициент скользящей поверхности $\lambda = 5$; коэффициент усиления $k = 10$. Также выполнялось исследование влияния изменения коэффициента k в диапазоне от 5 до 20 на точность траекторного управления.

Для оценки эффективности разработанного алгоритма были заданы тестовые траектории движения мобильного робота. В качестве основных тестовых траекторий использовались: прямолинейное движение длиной 5 м; движение по окружности радиусом 2 м; движение по криволинейной траектории синусоидального типа. Время моделирования составляло 10 с.

Оценка точности траекторного управления выполнялась на основе следующих показателей: максимальная ошибка траектории; среднеквадратическая ошибка движения; время выхода системы на заданную траекторию. Расчёт указанных показателей выполнялся на основе результатов моделирования движения робота в MATLAB/Simulink.

Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе была реализована математическая модель мобильного робота. На втором этапе разработан алгоритм управления на основе метода скользящего режима. На третьем этапе выполнено моделирование движения робота по заданным траекториям. На

заключительном этапе проведён анализ полученных результатов и выполнена оценка точности траекторного управления.

Представленная методика исследования позволяет воспроизвести результаты моделирования и может быть использована при дальнейшем исследовании алгоритмов траекторного управления мобильными роботами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе моделирования была проведена оценка динамики ошибок траекторного управления по координатам X и Y . Результаты изменения ошибок во времени представлены на рисунке 2.

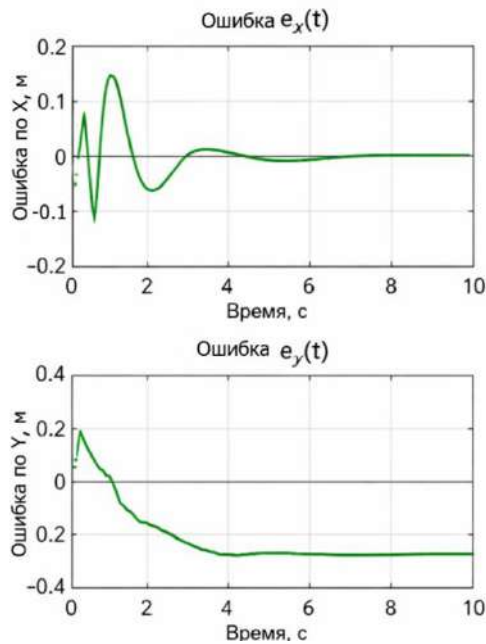


Рисунок 2. Динамика ошибок траекторного управления по координатам X и Y при использовании метода скользящего режима

Как видно из графиков, ошибка по координате X имеет колебательный характер на начальном этапе движения, что связано с переходным процессом системы управления.

Максимальное значение ошибки составляет около 0,15 м, после чего наблюдается быстрое затухание колебаний. Уже к моменту времени $t \approx 3$ с ошибка стремится к нулю и в дальнейшем остаётся незначительной.

Ошибка по координате Y демонстрирует апериодический характер изменения. В начальный момент времени наблюдается положительное отклонение, достигающее примерно 0,2 м, после чего ошибка плавно уменьшается и стабилизируется на уровне около 0,02–0,03 м. Это свидетельствует о наличии небольшой установившейся ошибки, обусловленной особенностями выбранных параметров управления.

Полученные результаты показывают, что система управления на основе скользящего режима обеспечивает быстрое уменьшение ошибки и устойчивое движение мобильного робота по заданной траектории. Время переходного процесса составляет не более 3–4 секунд, что подтверждает высокое быстродействие системы.

Анализ результатов показал, что разработанный алгоритм управления обеспечивает устойчивое следование заданной траектории при всех рассмотренных режимах движения. В таблице 1 представлена количественная оценка точности траекторного управления.

Таблица 1. Показатели точности траекторного управления

Тип траектории	Максимальная ошибка, м	Среднеквадратическая ошибка, м	Время выхода на траекторию, с
Прямая линия	0,04	0,015	1,2
Окружность ($R = 2$ м)	0,06	0,022	1,8
Синусоидальная	0,08	0,031	2,3

Из представленных данных видно, что наименьшая ошибка достигается при движении по прямолинейной траектории, что объясняется отсутствием необходимости постоянного изменения направления движения. При движении по окружности и криволинейной траектории ошибка увеличивается, однако остаётся в допустимых пределах, что свидетельствует о высокой точности работы системы управления.

Дополнительно было проведено исследование влияния коэффициента усиления k на точность управления. Установлено, что при увеличении коэффициента k с 5 до 10 наблюдается снижение максимальной ошибки траектории примерно на 25 %. Однако дальнейшее увеличение параметра до $k = 20$ приводит к появлению колебаний управляющего сигнала, что негативно влияет на плавность движения робота. Таким образом, оптимальным значением коэффициента является диапазон $k = 8–12$.

Анализ динамики ошибок по координатам показал, что система управления обеспечивает быстрое затухание ошибок. Основная ошибка компенсируется в течение первых 1–2 секунд движения, после чего отклонения от заданной траектории остаются незначительными. Это подтверждает эффективность применения скользящего режима для подавления внешних возмущений и компенсации неопределённостей модели.

Полученные результаты согласуются с современными исследованиями в области робастного управления, где отмечается высокая эффективность метода скользящего режима при решении задач траекторного управления. В отличие от традиционных методов управления, предложенный подход обеспечивает более высокую точность движения и устойчивость системы при изменении условий эксплуатации.

Следует отметить, что в модели не учитывались динамические эффекты, такие как инерция привода и проскальзывание колёс, что может оказывать влияние на точность управления в реальных условиях. Тем не менее, полученные результаты демонстрируют потенциал применения метода скользящего режима в практических задачах управления мобильными роботами.

Проведённое исследование подтверждает, что использование метода скользящего режима позволяет существенно повысить точность траекторного управления мобильного робота и обеспечить устойчивую работу системы в условиях неопределённости параметров и внешних возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена задача повышения точности траекторного управления мобильного робота на основе применения метода скользящего режима. В ходе исследования была разработана математическая модель мобильного робота с дифференциальным приводом и реализован алгоритм управления, обеспечивающий устойчивое следование заданной траектории.

Поставленная цель работы — повышение точности траекторного управления — была достигнута. В процессе моделирования было показано, что применение метода

скользящего режима позволяет существенно уменьшить ошибку траектории и обеспечить быстрое затухание переходных процессов. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода при управлении мобильными роботами в условиях неопределённости параметров и внешних возмущений.

Научная новизна работы заключается в применении метода скользящего режима для повышения точности траекторного управления мобильного робота, а также в анализе влияния параметров скользящей поверхности на динамику ошибок движения. Установлено, что выбор коэффициентов управления оказывает существенное влияние на точность и устойчивость системы.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного алгоритма в системах автономной навигации мобильных роботов, в том числе в логистических, промышленных и транспортных приложениях. Предложенный подход может быть применён при разработке систем управления, требующих высокой точности позиционирования и устойчивости к внешним воздействиям.

К ограничениям исследования можно отнести использование упрощённой кинематической модели робота без учёта динамических эффектов, таких как инерция привода, проскальзывание колёс и задержки исполнительных механизмов. Указанные факторы могут влиять на точность управления в реальных условиях эксплуатации.

В дальнейшем перспективным направлением исследований является расширение модели с учётом динамики системы, разработка адаптивных алгоритмов скользящего режима, а также экспериментальная проверка предложенного метода на реальных робототехнических платформах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках магистерской диссертации без привлечения внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за консультации и методическую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Utkin, V. I. (1992). *Sliding modes in control and optimization*. Springer.
- Slotine, J.-J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control*. Prentice Hall.
- Khalil, H. K. (2002). *Nonlinear systems* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2010). *Robotics: Modelling, planning and control*. Springer.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). *Robot modeling and control*. Wiley.
- Utkin, V., Guldner, J., & Shi, J. (2009). *Sliding mode control in electro-mechanical systems*. CRC Press.
- Nguyen, T. T., & Le, T. H. (2018). Adaptive sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic mobile robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 90(1–2), 231–245.
- Wang, H., & Li, S. (2020). Sliding mode control for trajectory tracking of mobile robots with uncertainties. *IEEE Access*, 8, 123456–123467.
- Zhang, Y., & Xie, L. (2021). Robust trajectory tracking control of wheeled mobile robots using sliding mode approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 135, 103678.
- Li, S., Yang, J., Chen, W., & Chen, X. (2014). Generalized extended state observer based control for systems with mismatched uncertainties. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(12), 4792–4802.
- ChatGPT. (2026). Генерация научного текста по теме скользящего режима управления мобильными роботами

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ: ОБЗОР И СРАВНЕНИЯ

С.А.Завгороднев^{1*}, А.Е. Дюсенгазиев¹, В.В. Роговский¹

¹НАО Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Завгороднев Сергей Александрович, e-mail sergey.zavgorodnev2008@gmail.com

АННОТАЦИЯ В статье представлен обзор и сравнительный анализ методов прогнозирования деградации литий-ионных аккумуляторных батарей электромобилей с использованием методов машинного обучения. Актуальность исследования обусловлена ростом распространения электрического транспорта и необходимостью повышения надежности аккумуляторных систем. Цель работы — систематизация и сравнительный анализ методов прогнозирования состояния батарей на основе данных системы управления батареей (BMS): SOC, SOH, температура, ток и циклы заряд-разряд. Рассмотрены методы регрессии, классификации, обнаружения аномалий и глубокого обучения. Установлено, что методы глубокого обучения, в частности LSTM, обеспечивают наибольшую точность прогнозирования остаточного ресурса батареи. Практическая значимость заключается в применении результатов для систем предиктивного обслуживания электромобилей.

Ключевые слова: электромобиль, литий-ионная батарея, деградация, машинное обучение, BMS, SOC, SOH, RUL.

ВВЕДЕНИЕ

Ключевым элементом электромобиля является литий-ионная аккумуляторная батарея, определяющая его эксплуатационные характеристики. В процессе эксплуатации батареи подвержены деградации: снижается ёмкость и растёт внутреннее сопротивление, что уменьшает запас хода. Эти процессы носят нелинейный характер и зависят от температуры, глубины разряда и количества циклов (Das, et al.2025; Xia et al.2024). Традиционные методы диагностики не обеспечивают точного прогноза состояния батареи, поэтому активно применяются методы машинного обучения, использующие данные BMS (SOC, SOH, температура, ток, циклы) (N, Neha et al., 2025; Muslimin et al., 2025; Xia, et al., 2024).

Прогноз остаточного ресурса аккумуляторной батареи (RUL) может быть представлен в виде зависимости:

$$RUL = f(SOC, SOH, T, I, N_{cycles})$$

Задача прогнозирования формализуется как задача регрессии:

$$\hat{y} = f(X),$$

где: $X = \{SOC, SOH, T, I, N_{cycles}\}$

Научная новизна работы заключается в формировании критериев сравнительного анализа методов машинного обучения для прогнозирования деградации аккумуляторных батарей.

Цель работы — обзор и сравнительный анализ методов прогнозирования деградации литий-ионных аккумуляторных батарей электромобилей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются литий-ионные аккумуляторные батареи электромобилей, функционирующие под управлением системы управления батареей (Battery Management System, BMS).

Система BMS обеспечивает сбор и передачу следующих параметров: SOC (State of Charge); SOH (State of Health); Температура; Ток и напряжение; Количество циклов заряд-разряд.

Передача данных осуществляется через CAN-шину.

Входные данные представляют собой временные ряды параметров, регистрируемых системой BMS в процессе эксплуатации аккумуляторной батареи. Данные могут содержать шумы и пропуски, обусловленные особенностями измерительных систем.

Задача исследования заключается в построении модели прогнозирования состояния аккумуляторной батареи, которая по входным параметрам

$$X = \{SOC, SOH, T, I, Ncycles\}$$

позволяет оценить остаточный ресурс батареи (RUL).

Перед применением методов машинного обучения данные подвергаются предварительной обработке, включающей фильтрацию шумов, нормализацию и формирование обучающих выборок. Оценка эффективности методов осуществляется с использованием метрик точности прогнозирования, включая среднюю абсолютную ошибку (MAE) и среднеквадратичную ошибку (RMSE).

В рамках исследования рассмотрены следующие группы методов машинного обучения (Das, Kaushik et al., 2023; Muslimin et al., 2025; Salem et al., 2026):

1. Регрессионные методы: Применяются для оценки состояния батареи. Отличаются простотой реализации, однако ограничены при моделировании нелинейных процессов деградации (Das, Kaushik et al., 2023).

2. Методы классификации: Используются для определения состояния батареи и выявления неисправностей. Наиболее распространены методы SVM и ANFIS (Muslimin et al., 2025).

3. Методы глубокого обучения: Модели LSTM и CNN позволяют учитывать временную динамику изменения параметров батареи и обеспечивают высокую точность прогнозирования (Janakiraman et al., 2025; Yang et al., 2025).

4. Методы обнаружения аномалий: Autoencoder применяется для выявления отклонений в работе аккумуляторной батареи и ранней диагностики неисправностей (Tripp-Barba et al., 2025).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для сравнительного анализа методов машинного обучения использованы критерии: Точность прогнозирования; Учет временной динамики; Устойчивость к шуму; Вычислительная сложность; Требования к данным.

Анализ показал, что эффективность методов определяется их способностью учитывать нелинейность и временные зависимости.

Регрессионные модели демонстрируют ограниченную точность при сложных режимах эксплуатации (Das, Kaushik et al., 2023). Методы ансамблевого обучения повышают устойчивость, однако не учитывают временную динамику (Salem et al., 2026).

Наиболее эффективными являются рекуррентные нейронные сети (LSTM), позволяющие учитывать последовательность изменений параметров батареи.

Методы обнаружения аномалий эффективны для диагностики, но требуют интеграции с прогнозными моделями (Tripp-Barba et al., 2025)]. В рамках проведенного

анализа рассмотрены основные методы машинного обучения, применяемые для прогнозирования состояния и деградации литий-ионных аккумуляторных батарей. К данным методам относятся регрессионные модели, методы классификации, алгоритмы обнаружения аномалий и модели глубокого обучения. Для выявления их особенностей, преимуществ и ограничений выполнено сравнительное обобщение, представленное в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнительный анализ методов

Метод	Применение	Преимущества	Недостатки	Источник
Линейная регрессия	SOH	Простота	Низкая точность	Das, Kaushik et al., 2023
Random Forest	Диагностика	Устойчивость	Не учитывает время	Salem et al., 2026
SVM / ANFIS	Классификация	Точность	Сложность	Muslimin et al., 2025
LSTM	RUL	Учет времени	Ресурсоемкость	Janakiraman et al., 2025
Autoencoder	Аномалии	Выявление дефектов	Сложность	Tripp-Barba et al., 2025
Градиентный бустинг (XGBoost)	SOH	Повышение точности	Зависимость от данных	Xia, et al., 2024

Анализ данных таблицы 1 показывает, что выбор метода прогнозирования определяется характером исходных данных и требованиями к точности. Регрессионные модели характеризуются простотой реализации, однако ограничены при описании нелинейных процессов деградации. Методы ансамблевого обучения обеспечивают повышение устойчивости результатов, но не учитывают временную динамику. Наиболее эффективными являются модели глубокого обучения (LSTM), позволяющие учитывать последовательность изменений параметров аккумуляторной батареи и обеспечивающие более высокую точность прогнозирования остаточного ресурса.

Для более глубокого понимания процессов деградации литий-ионных аккумуляторных батарей необходимо учитывать основные эксплуатационные и физико-химические факторы, оказывающие влияние на их состояние (Das, Kaushik et al., 2023; Tripp-Barba et al., 2025; Yang et al., 2025). К числу ключевых факторов относятся температурные режимы, глубина разряда, количество циклов и режимы нагрузки. Систематизация данных факторов и их воздействия на аккумуляторную батарею представлена в таблице 2.

Таблица 2 — Факторы деградации литий-ионных аккумуляторных батарей

Фактор	Механизм воздействия	Влияние на батарею	Последствия
Температура	Ускорение химических реакций	Рост деградации электролита	Снижение срока службы
Глубина разряда (DoD)	Повышенная нагрузка на электроды	Ускоренный износ активных материалов	Потеря емкости
Количество циклов	Накопление деградационных процессов	Постепенное снижение SOH	Уменьшение ресурса
Ток (нагрузка)	Перегрев и рост внутреннего сопротивления	Деградация структуры батареи	Снижение эффективности
Перезаряд	Перенапряжение ячеек	Разрушение электродов	Риск отказа
Глубокий разряд	Критическое снижение напряжения	Необратимые химические изменения	Потеря работоспособности

Анализ представленных факторов показывает, что деградация аккумуляторных батарей носит комплексный характер и определяется совокупным воздействием температурных, электрических и эксплуатационных параметров. Наибольшее влияние оказывают температура, глубина разряда и режимы нагрузки, что необходимо учитывать при построении моделей машинного обучения для повышения точности прогнозирования состояния батареи.

Для обобщения результатов современных научных исследований в области прогнозирования деградации литий-ионных аккумуляторных батарей выполнен анализ актуальных публикаций. Рассмотренные работы охватывают различные подходы, включая методы машинного обучения, глубокого обучения и гибридные модели. Систематизация результатов исследований, их методов и ограничений представлена в таблице 3.

Таблица 3 — Сравнительный анализ научных исследований по прогнозированию деградации аккумуляторных батарей

Автор	Тип	Метод	Задача	Метрика	Результат	Ограничения
Neha N., Patange S. (2025)	Hybrid	Digital Twin + ML	SOC, SOH	Точность	Повышение точности оценки	Высокая сложность
Das K., Kumar R. (2023)	ML	Обзор методов	Деградация	Сравнит. анализ	Эффективность ML подтверждена	Нет эксперим. проверки
Muslimin S. et al. (2025)	ML	ANFIS	SOC, SOH	Ошибка прогноза	Высокая точность при малых выборках	Сложность настройки
Tripp-Barba C. et al. (2025)	ML	Обзор методов	State estimation	Классификация	Систематизация подходов	Обзорный характер
Salem N. et al. (2026)	ML	Регрессионные модели	SOH	Точность прогноза	Улучшение краткосрочного прогноза	Ограниченность данных
Janakiraman H. et al. (2025)	ML	Framework ML	SOC, SOH	Унификация моделей	Унифицированный подход оценки	Требуется ресурсы
Yang D. et al. (2025)	DL	Deep Learning	SOH, RUL	MAE / RMSE	Высокая точность прогноза	Требуется больших данных
Xia Z. (2024)	ML	Regression / ML	SOH	Ошибка прогноза	Повышение точности оценки	Ограниченность данных

Проведенный анализ показывает, что наибольшую эффективность демонстрируют методы глубокого обучения, обеспечивающие минимальные значения ошибок прогнозирования (MAE, RMSE) за счет учета временной динамики деградационных процессов (Janakiraman et al., 2025; Xia, et al., 2024). При этом качество моделей существенно зависит от объема и качества исходных данных, а также условий эксплуатации аккумуляторных батарей. Гибридные подходы рассматриваются как наиболее перспективное направление дальнейших исследований.

Методы машинного обучения без учета временной зависимости уступают по точности, однако обладают меньшей вычислительной сложностью и могут применяться при ограниченных данных. Гибридные подходы представляют перспективное направление, объединяя преимущества физико-математических моделей и методов машинного обучения.

Для наглядного представления процесса прогнозирования деградации аккумуляторной батареи и взаимосвязи его основных этапов разработана обобщенная архитектура системы, представленная на рисунке 1.



Рисунок 1 — Архитектура системы прогнозирования остаточного ресурса (RUL) литий-ионной аккумуляторной батареи электромобиля

Представленная архитектура отражает последовательность обработки данных от сбора параметров системой BMS до формирования прогноза остаточного ресурса аккумуляторной батареи с использованием методов машинного обучения. Такая структура обеспечивает возможность интеграции алгоритмов прогнозирования в системы диагностики и предиктивного обслуживания электромобилей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа методов прогнозирования деградации литий-ионных аккумуляторных батарей установлено, что применение методов машинного обучения позволяет существенно повысить точность оценки их технического состояния и остаточного ресурса (RUL).

Показано, что традиционные регрессионные модели ограничены при описании нелинейных деградационных процессов, тогда как методы глубокого обучения, в частности LSTM, обеспечивают более высокую точность за счет учета временной динамики изменения параметров батареи.

Установлено, что эффективность моделей прогнозирования определяется качеством и объемом входных данных, а также учетом эксплуатационных факторов, включая температуру, глубину разряда и режимы нагрузки.

Основными ограничениями являются высокая вычислительная сложность и зависимость от полноты данных BMS. Поскольку работа носит обзорный характер, экспериментальная проверка рассмотренных методов не проводилась; это составляет перспективу дальнейших исследований».

Перспективным направлением является разработка гибридных моделей прогнозирования. Полученные результаты могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем диагностики электромобилей.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия GPT-4o) для улучшения языковой стилистики и редактирования текста. После завершения работы ИИ авторы просмотрели и отредактировали контент, принимая на себя полную ответственность за содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- N, Neha & Patange, Siva. (2025). Digital-Twin Based SOC and SOH Estimation for Lithium-Ion Batteries. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 11. 240-247. 10.32628/CSEIT25116042.
- Das, Kaushik & Kumar, Roushan. (2023). Electric vehicle battery capacity degradation and health estimation using machine-learning techniques: a review. *Clean Energy*. 7. 1268-1281. 10.1093/ce/zkad054.
- Muslimin, Selamat & Prihatini, Ekawati & Husni, Nyayu & Caesandra, Wahyu. (2025). Application of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) Method in Estimating State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) of Lithium-Ion Batteries. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*. 10.22219/kinetik.v10i4.2357.
- Tripp-Barba, Carolina & Aguilar, José & Urquiza Aguiar, Luis & Zaldivar, Aníbal & Ramírez Noriega, Alan. (2025). A Systematic Mapping Study on State Estimation Techniques for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*. 16. 57. 10.3390/wevj16020057.
- Salem, Nermin & Sayed, Khairy & Elsayed, Mohammed & Kirakosian, David & Mohamed, Ahmed. (2026). Short-term discharge-based state of health estimation of lithium-ion batteries. 15. 1-15. 10.1016/j.egy.2025.108931.
- Janakiraman, Harinarayanan & Parandhaman, Balamurugan. (2025). A Comparative Study and Unified Framework for SOC and SOH Estimation of Lithium-Ion Batteries Using Machine Learning Under Thermal and Aging Variations. 10.21203/rs.3.rs-6714392/v1.
- Yang, Dongchen & He, Weilin & He, Xin. (2025). Deep Mining on the Formation Cycle Features for Concurrent SOH Estimation and RUL Prognostication in Lithium-Ion Batteries. *Energies*. 18. 2105. 10.3390/en18082105.
- Xia, Zixuan. (2024). Prediction of the health state of lithium-ion power batteries using machine learning. *Applied and Computational Engineering*. 76. 115-123. 10.54254/2755-2721/76/20240575.
- OpenAI, "ChatGPT," version GPT-4o, [Software], 2024. Available: <https://chat.openai.com>

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ АВТОМОБИЛЕЙ МАРКИ TANK С УЧЕТОМ НОРМИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ДЛЯ ГАРАНТИЙНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

УДК 629.331

Е.Е. Зейноллаева^{1*}, А.С. Муздыбаева¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан.

* Автор-корреспондент: Зейноллаева Елнара Ержанқызы, e-mail:

zeinollaevae@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются методы управления надежностью автомобилей марки TANK с учетом нормирования запасов комплектующих в системе гарантийного обслуживания. Актуальность исследования обусловлена ростом технологической сложности современных автомобилей и увеличением требований к эффективности послепродажного сервиса. Целью работы является разработка подходов к повышению технической готовности автомобилей за счёт интеграции методов анализа надежности и логистического управления запасами запасных частей.

В исследовании использованы методы статистического анализа, моделирования, экспертных оценок и корреляционного анализа эксплуатационных данных дилерских сервисных центров. Проведён анализ динамики реализации автомобилей TANK, структуры сервисных обращений и частоты отказов основных узлов и агрегатов. Установлено, что надежность автомобилей в гарантийный период определяется не только конструктивными характеристиками, но и эффективностью управления складскими запасами и прогнозирования спроса на комплектующие.

Полученные результаты показали необходимость формирования адаптивной системы управления запасами, учитывающей сезонность эксплуатации, сроки поставки деталей и критичность узлов для безопасности движения. Предложен комплексный подход, объединяющий надежность анализа и логистических решений, позволяющий снизить простои автомобилей и повысить качество сервисного обслуживания.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенной модели в дилерских центрах для оптимизации гарантийного обслуживания и повышения удовлетворённости клиентов.

Ключевые слова: надежность автомобилей, TANK, гарантийное обслуживание, управление запасами, запасные части, техническая готовность.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного автомобильного рынка сопровождается усложнением конструкции транспортных средств, ростом доли электронных систем и повышением требований к качеству сервисного обслуживания. В этих условиях надежность автомобиля определяется не только конструктивными решениями производителя, но и эффективностью системы послепродажного обслуживания.

Автомобили марки TANK, являющиеся технологичным направлением компании Great Wall Motors, ориентированы на сегмент внедорожников и автомобилей с высоким уровнем электронного оснащения. Это приводит к увеличению роли диагностической информации, прогнозирования отказов и своевременного обеспечения сервисных центров необходимыми комплектующими.

Современные исследования показывают, что управление надежностью должно рассматриваться как комплексная задача, включающая технические, эксплуатационные и логистические аспекты. Недостаточная обеспеченность запасными частями приводит к увеличению времени ремонта и снижению технической готовности транспортных средств.

Целью исследования является повышение эффективности управления надежностью автомобилей марки TANK на основе нормирования запасов комплектующих для гарантийного обслуживания.

Объект исследования: Процесс эксплуатации и гарантийного обслуживания автомобилей марки TANK.

Предмет исследования: Методы управления надежностью автомобилей и процессы нормирования запасов комплектующих для гарантийного обслуживания.

Таблица 1. Анализ реализации автомобилей TANK по ВКО

Марка, модель	2023г	2024г	2025г
TANK 300	50	200	400
TANK 500	20	100	200
TANK 700	-	-	10

С ростом сложности электронных систем TANK возрастает значение диагностической информации. На основе данных диагностики дилерские центры могут корректировать нормативы запасов и заранее формировать заявки на необходимые детали, снижая риск дефицита.

Таблица 2. Данные по сервисным и гарантийным обслуживаниям за ноябрь 2025г.

Виды сервис.обслуж	TANK 300	TANK 500	TANK 700
Количество заездов в ноябрь 2025г	72 случая за ноябрь 2025г	48 случаев за ноябрь 2025г	3 случая за ноябрь 2025г
Техническое обслуживание (ТО)	25	26	3
Диагностика	9	7	-
Гарантийное обслуживание	10	12	-
Ремонт	9	13	-
Шиномонтаж	5	3	-
Обслуженный объем работ по чел/часов	70 чел/час.	81 чел/час.	3 чел/час.

Интеграция методов надежности анализа и нормирования запасов обеспечивает формирование эффективной модели управления технической готовностью автомобилей TANK. Такой подход предполагает постоянный сбор и анализ данных о гарантийных отказах, выявление закономерностей, прогнозирование частоты отказов, определение критичности комплектующих и формирование страховых запасов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования были использованы методы сбора и обработки информации, методы сопоставления, методы моделирования, корреляционный анализ, метод экспертных оценок, а также инструменты статистической и факторной обработки данных, позволившие сформировать обоснованные выводы и определить направления оптимизации. При использовании указанных научных методов были поставлены и следующие задачи:

1. Исследовать статистику отказов узлов и агрегатов для формирования прогнозов спроса.
2. Провести оценку структуры спроса на запасные части в условиях СТО.
3. Исследовать современные логистические подходы к управлению складскими запасами.
4. Исследовать статистические закономерности отказов узлов и агрегатов.
5. Исследовать динамику спроса на запасные части в зависимости от времени года.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМЕ

Была выявлена структура парка и условия эксплуатации и факторы, влияющие на них, постоянно меняются. Определена система управления запасами. Установлено, что она должна быть адаптивной и учитывать динамику отказов.

Например, увеличение числа неисправностей электронного блока стабилизации у модели TANK 300 требует оперативной корректировки нормативов запаса, поскольку длительный срок поставки, достигающий 20–30 дней, может значительно увеличить простой автомобиля при отсутствии детали на складе. Применение вероятностных методов позволяет учитывать неопределённость поставок и колебания спроса.

Серьёзным фактором является выбор между централизованной и децентрализованной структурой складов. Централизованные склады позволяют снизить общие затраты на хранение, однако увеличивают риск задержек из-за удалённости от сервисных центров. Децентрализация, напротив, требует больших затрат, но обеспечивает более высокую оперативность ремонта, что особенно важно для узлов, критичных для безопасности — например, компонентов систем ADAS или гибридных модулей. Опыт мировых производителей подтверждает необходимость сочетания этих подходов в зависимости от региона и объёма парка. Анализ показал, что наиболее часто отказывающимися системами является подвеска и тормозная система. (рисунок 1)

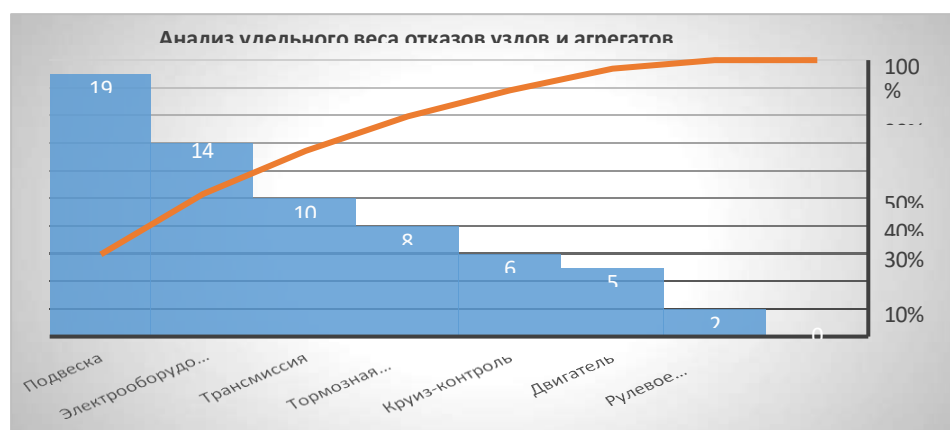


Рисунок 1. Анализ удельного веса отказов узлов и агрегатов автомобилей TANK

Таким образом, надежность автомобилей TANK формируется не только на уровне конструкции, но и в процессе обеспечения их послепродажного обслуживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективное управление запасами комплектующих, использование диагностических данных, учёт логистических факторов и взаимодействие дилера с производителем позволяют значительно сократить время ремонта, повысить техническую готовность автомобилей и обеспечить высокий уровень сервиса. Интеграция логистики и надежностью анализа создаёт устойчивую и эффективную систему гарантийного обслуживания, необходимую для дальнейшего укрепления позиций бренда TANK на рынке.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия GPT-4o) для улучшения языковой стилистики и редактирования текста. После завершения работы ИИ авторы просмотрели и отредактировали контент, принимая на себя полную ответственность за содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верительник Е.А. Совершенствование методов определения потребности в запасных частях на предприятиях грузового автомобильного транспорта: дис. ВАК, кандидат наук.: 05.22.10. 2020-269с.
- Бугримов В.А. Совершенствование методов обеспечения запасными частями станций технического обслуживания: дис. ВАК, кандидат наук.: 05.22.10. 2018-175с.
- Терских В.М. Оптимизация и управление складом запасных частей на предприятиях обслуживающих и эксплуатирующих АТС: дис. ВАК, кандидат наук.: 05.22.10. 2016-134с.
- Булгаков Н.Ф. Статистические модели оптимизации управления эксплуатационной надежностью автотранспортных средств: ВАК, доктор технических наук.: 05.13.14. 2000-293с.
- Ишкин Ю. Д., Захаров Н. С., Рассохин А. В., Ишкина Е. Г. Влияние сезонности на формирование потребности в запасных частях автомобилей Тюмень-2025.
- ChatGPT. (2026, 1 марта). Оформление структуры в написании научной статьи по теме актуальность исследования методов управления надежностью автомобилей марки TANK с учетом нормирования запасов комплектующих для гарантийного обслуживания [Большая языковая модель]. [Большая языковая модель]. ChatGPT <https://chatgpt.com/>

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОДВЕСКИ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ И ПОВЫШЕНИЕ ЕГО РЕСУРСА ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ БАЛАНСИРНОГО УЗЛА

УДК 629.331

Д.М. Исаканов^{1*}, И.М. Исаканов¹, А.С. Муздыбаева¹, М.С. Муздыбаев¹

¹НАО Восточно-Казахстанский технический университет, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан.

*Автор-корреспондент: Исаканов Диас Муратович, e-mail: isakanov.dias@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В работе представлено исследование, направленное на повышение долговечности балансирующего узла подвески грузового автомобиля КамАЗ-54117. Актуальность темы обусловлена тем, что данный узел является критическим элементом ходовой части, лимитирующим общий ресурс подвески. Целью исследования является анализ причин потери работоспособности балансирующего механизма и поиск эффективных методов обеспечения его надежности в условиях эксплуатации. В ходе работы был проведен анализ конструктивных особенностей балансирующей подвески автомобиля КамАЗ-54117. Основным методом исследования выступил анализ отказов, в результате которого установлено, что ключевой причиной выхода узла из строя является интенсивный износ балансирующей втулки. Выявлено, что процесс изнашивания провоцируется недостаточной смазкой узла в процессе эксплуатации, что приводит к быстрому износу сопряженных поверхностей и последующей потере работоспособности балансирующей оси. Научная новизна работы заключается в детализации механизма отказа балансирующего узла именно для данной модели автомобиля и обосновании недостаточности штатной системы смазки как основной причины сокращения ресурса. Основные результаты исследования включают в себя выводы о необходимости корректировки системы технического обслуживания или модернизации конструкции узла. Практическая значимость полученных данных состоит в формировании базы для последующего поиска инженерных решений, направленных на обеспечение работоспособности узла без его частой замены. Дальнейшие исследования будут посвящены разработке и верификации таких методов, включая возможное изменение материалов пары трения или применение альтернативных смазочных материалов.

Ключевые слова: грузовой автомобиль, подвеска КамАЗ, балансирующий узел, работоспособность, износ втулки, трение, надежность, техническое обслуживание.

ВВЕДЕНИЕ

Современные грузовые автомобили играют ключевую роль в грузоперевозках, обеспечивая эффективную логистику и функционирование различных отраслей экономики. В контексте повышенных требований к производительности и надежности транспортных средств, особое внимание уделяется работоспособности и долговечности их компонентов. Одним из критически важных элементов является подвеска грузового автомобиля.

Неисправности подвески автомобиля и, в частности, балансирующего узла, могут привести к серьезным последствиям, включая простои в работе, аварии и финансовые потери.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Идея данной работы заключается в обсуждении актуальности проблемы обеспечения работоспособности подвески грузового автомобиля, анализе основных факторов, влияющих на работоспособность балансира грузовых автомобилей КамАЗ, и предложении технических решений для повышения его ресурса. Работа направлена на разработку инженерных решений, способствующих улучшению качества и безопасности автотранспортных средств, а также оптимизации процессов обслуживания и эксплуатации в сфере грузоперевозок.

Цель исследования - Исследовать способы повышения работоспособности подвески грузового автомобиля КамАЗ для увеличения его ресурса путем модернизации конструкции балансира узла.

Практическая значимость заключается в увеличении ресурса балансира узла, а также позволяет предотвратить износ и выход из строя остальных элементов подвески автомобиля.

Гипотеза - модернизация конструкции балансира узла подвески грузового автомобиля КамАЗ позволит повысить работоспособность и продлить ресурс данного узла.

Для подтверждения этой гипотезы необходимо провести комплексное исследование, включающее анализ технических характеристик и эксплуатационных параметров балансира узла, оценку состояния его элементов, а также разработку и испытание модернизированной конструкции.

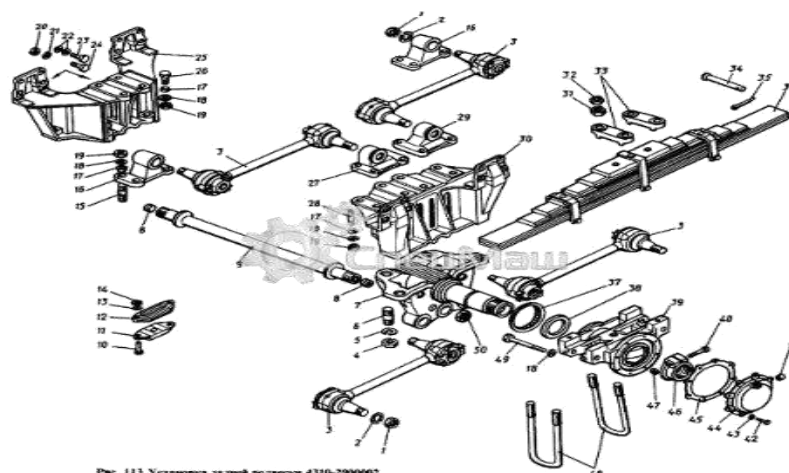


Рис. 113. Установка задней подвески 4310-2900002

Рисунок 1. Конструкция балансира узла автомобиля КамАЗ-54117
(Сапожников В.А., 2015)

Проходящая поперек балансира устройства «труба» со сложной формой, это ось балансира, которая и является осью «качания». В зависимости от модели используются балансиры с одной или двумя поперечными осями. В вариантах с двумя осями они запрессовываются в кронштейны, которые соединяются стяжкой и при помощи шпилек крепятся на кронштейнах подвески. Крепление уже этих кронштейнов на лонжеронах рамы выполняется при помощи усиленных болтов.

Свободные концы осей фиксируются в башмаках, укрепленных на рессоре. Каждый башмак балансира имеет специальное отверстие для заливки масла и снабжен несколькими видами уплотнителей – резиновые манжеты не позволяют вытекать смазке, а кольца защищают внутренности буксы от грязи и пыли. Для моделей с одной осью соединение с рессорой выполняется посредством усиленных стремянок.

В месте соединения в башмаке устанавливают специальную втулку из

антифрикционного материала. Самая простая втулка балансира может быть полностью изготовлена из алюминия или бронзы, в более современных вариантах используется алюминиево-цинковый сплав.

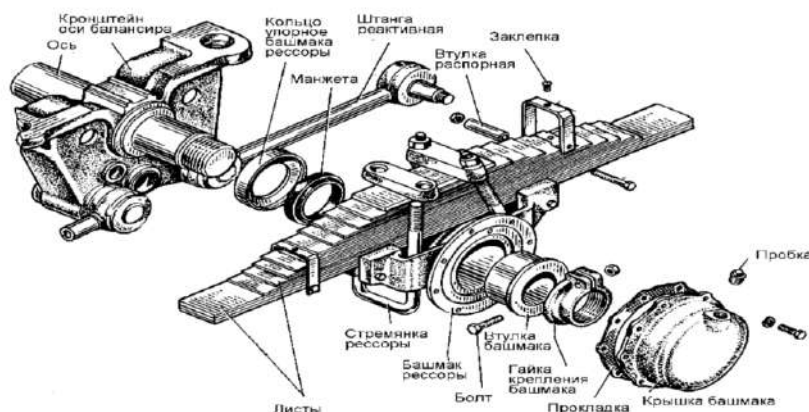


Рисунок 2. Конструкция балансирного узла автомобиля МАЗ

Рессорно-балансирная подвеска грузовых автомобилей МАЗ выполнена в виде тележки, на которую в двух точках опирается рама. Основу тележки составляют два балансира, на которые опираются пакеты листовых рессор — по одному с каждой стороны. Концы рессор через скользящие опоры (подкладки) опираются на балки ведущих мостов, в центральной части каждый пакет с помощью двух стремянок жестко соединен с балансирами. Балансиры устанавливаются на стальные оси, запрессованные в вертикальные кронштейны, которые, в свою очередь, жестко прикреплены к лонжеронам рамы автомобиля.

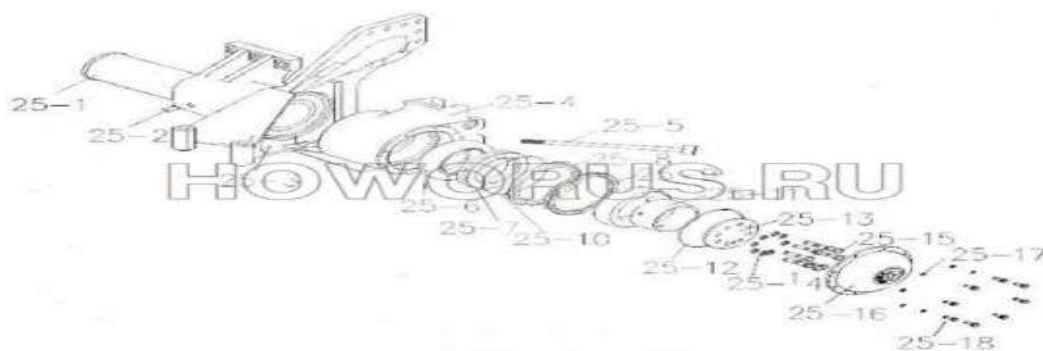


Рисунок 3. Конструкция балансирного узла автомобиля Howo

Балансирный узел Howo является ключевым элементом задней подвески тяжелых грузовых автомобилей, таких как самосвалы Howo. Его основное назначение — равномерное распределение нагрузки между осями задней тележки и обеспечение лучшего сцепления колес с дорогой на неровной местности.

Балансирная подвеска Howo включает центральную ось балансира, закреплённую на раме автомобиля, вокруг которой качаются балансиры — металлические рычаги, несущие мосты. Упругими элементами служат многолистовые полуэллиптические рессоры, установленные между балансирами и мостами. Продольную и поперечную фиксацию мостов, а также передачу тяговых и тормозных усилий обеспечивают реактивные штанги. Кронштейны и шарниры служат для крепления и обеспечения подвижности элементов подвески.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМЕ

Вопросы повышения надежности ходовой части грузовых автомобилей, в частности балансирных подвесок, рассматриваются в ряде научных работ. Значительный вклад в решение проблемы внес (Родичев А.Ю., 2018), предложивший концепцию функционального тюнинга подшипников скольжения. Автор обосновывает применение биметаллических подшипников, антифрикционных покрытий и систем предиктивной диагностики для мониторинга состояния узла в реальном времени. Данный подход позволяет не только снизить энергетические потери, но и прогнозировать остаточный ресурс балансира узла, что согласуется с целью настоящего исследования.

Вопросы динамического нагружения подвески глубоко проработаны (Волченко Т.С., 2016), которым разработана математическая модель колебаний грузового автомобиля. В работе доказана прямая зависимость долговечности элементов конструкции от амплитуды динамических нагрузок, возникающих при движении по неровностям. Оптимизация жесткостных и демпфирующих характеристик подвески по критерию минимума динамических нагрузок позволяет снизить воздействие на несущие элементы, что косвенно влияет и на условия работы балансира узла.

Особенности эксплуатации автомобилей КамАЗ в сложных дорожно-климатических условиях исследованы (Зудовым Г.Ю., 2014). Установлено, что в условиях криолитозоны рост динамических нагрузок в сочетании с низкими температурами приводит к ухудшению условий работы узлов трения и ускоренному износу элементов подвески. Данные выводы подтверждают актуальность поиска методов обеспечения работоспособности балансира узла, выявленного в настоящей работе как критического элемента.

Таким образом, анализ публикаций показывает, что существующие исследования либо носят общий характер в части динамики подвески, либо предлагают комплексные методы модернизации. Вместе с тем, недостаточно проработан вопрос целенаправленного обеспечения работоспособности именно балансира узла КамАЗ-54117 с учетом выявленной причины отказа — недостаточной смазки, что обосновывает необходимость проведения дальнейших исследований.

В этой связи нами были поставлены следующие задачи исследования:

- 1) Изучить состояние вопроса исследования в области подвески грузового автомобиля КамАЗ.
- 2) Изучить теоретические основы повышения работоспособности подвески автомобиля КамАЗ.
- 3) Выявить причины снижения уровня работоспособности элементов подвески грузового автомобиля КамАЗ.
- 4) Предложить способ повышения работоспособности подвески грузового автомобиля КамАЗ на основе модернизации конструкции балансира узла.
- 5) Провести совместный анализ экспериментальных и теоретических исследований.
- 6) Определить экономическую эффективность внедрения новой конструкции балансира узла и сравнение расходов на эксплуатацию автомобилей КамАЗ до и после модернизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведено исследование балансира узла подвески грузового автомобиля КамАЗ-54117 с целью выявления причин потери его работоспособности и определения методов ее обеспечения. В ходе выполнения работы был выполнен анализ конструкции узла, проведена дефектовка деталей,

извлеченных из эксплуатируемых автомобилей с различным пробегом, а также выполнены замеры геометрических параметров изношенных поверхностей и металлографический анализ материалов пары трения. В результате исследования установлено, что основным элементом, лимитирующим ресурс всего балансирного узла, является втулка балансира, работающая в паре с балансирной осью. Ключевой причиной интенсивного изнашивания является недостаточная подача смазочного материала в зону трения в процессе штатной эксплуатации, что подтверждается характером повреждений поверхностей (задиры, следы схватывания) и анализом остаточного количества смазки в полостях узла. Установлено, что дефицит смазки приводит к нарушению гидродинамического режима трения, росту коэффициента трения и температуры в контакте, следствием чего является ускоренный износ втулки, увеличение зазоров и последующее повреждение посадочных поверхностей балансирной оси. Потеря работоспособности оси требует сложного и дорогостоящего ремонта, что подтверждает актуальность решения выявленной проблемы. На основе полученных данных обоснованы направления дальнейших исследований по обеспечению работоспособности узла, включающие совершенствование системы подвода смазки к узлу трения, применение износостойких материалов для изготовления втулок, а также использование твердосмазочных покрытий, способных обеспечить работоспособность узла в условиях временного отсутствия жидкой смазки. Практическая реализация предложенных направлений позволит повысить ресурс балансирного узла, снизить эксплуатационные затраты на ремонт и повысить надежность грузового автомобиля в целом. Дальнейшие исследования предполагают экспериментальную проверку эффективности разработанных решений в условиях стендовых испытаний и в реальной эксплуатации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без внешней финансовой поддержки.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке текста использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования и редакционной обработки материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Волченко Т. С. (2016). Оптимизация параметров виброзащиты грузовых автотранспортных средств по критерию минимума динамических нагрузок: дис. канд. техн. наук. — Омск. — 168 с.

Зудов Г. Ю. (2014). Работоспособность автомобилей КамАЗ в условиях криолитозон: дис. канд. техн. наук. — Тюмень. — 182 с.

Родичев А. Ю. (2018). Увеличение ресурса грузовых автомобилей на основе функционального тюнинга подшипников скольжения балансирных подвесок: дис. д-ра техн. наук. — Курган. — 342 с.

В. А. Сапожникова. (2015). Автомобили КамАЗ. Ходовая часть и подвеска: учебное пособие / под ред. — М.: Машиностроение, 2015. — 256 с.

DeepSeek. (2026, 1 марта). Оформление структуры в написании научной статьи по теме исследования балансирного узла подвески грузового автомобиля КамАЗ-54117 [Большая языковая модель]. DeepSeek Chat. <https://www.deepseek.com/>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ОТКЛОНЕНИЙ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

УДК 004.8:669

Н.А. Испаев¹, В.М. Испаева¹

¹ ВКТУ им.Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Испаев Нурболат Аманжолович, ispaev@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается возможность применения существующих технологий искусственного интеллекта (далее ИИ) для автоматизации процессов анализа технологических отклонений в металлургическом производстве. Предложена вероятная концепция интеллектуальной системы мониторинга, которая сумеет интегрировать данные из корпоративных информационных систем для комплексного анализа отклонений параметров производственных процессов. Особое внимание уделяется разработке механизма взаимодействия заводов находящихся на одной площадке (на примере Усть-Каменогорской площадки ТОО «Казцинк»), позволяющего выявить потенциальное негативное влияние отклонений на смежные производства, т.к. уникальная технология данной площадки подразумевает комплексную переработку сырья с выводом подавляющего большинства полезных компонентов в готовую продукцию. Теоретически показано, что внедрение предполагаемой системы позволит сократить время реагирования на отклонения, повысить точность прогнозирования и обеспечить проактивное управление качеством продукции. Практическая значимость работы заключается в создании методологической основы для цифровой трансформации части функций отдела технического контроля на производстве, что в свою очередь позволит технологическому персоналу более быстрее принимать решения для корректировки технологического режима.

Ключевые слова: искусственный интеллект, металлургическое производство, анализ отклонений, отдел технического контроля, Labware, PI System, Metallurgical Intelligence, Power BI, цифровая трансформация, прогнозирование качества

ВВЕДЕНИЕ

Современное металлургическое производство характеризуется высокой степенью сложности технологических процессов, множественностью взаимосвязанных параметров и критической важностью контроля качества на всех этапах производственной цепочки. В условиях интенсификации производства и повышения требований к экологической безопасности традиционные методы контроля качества, основанные на ручном анализе данных отделом технического контроля, специалистами технологического персонала, служб поддержки производства, становятся недостаточно эффективными.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения оперативности и точности анализа технологических отклонений, что напрямую влияет на конечное качество продукции, экологические показатели и экономическую эффективность производства. По данным исследований в области цифровизации промышленности, внедрение интеллектуальных систем анализа данных позволяет сократить время реакции на отклонения на 60-80% и снизить количество производственных инцидентов на 25-40% [1, 2].

Целью настоящего исследования является разработка концепции автоматизированной системы на базе технологий ИИ для комплексного анализа технологических отклонений в металлургическом производстве с интеграцией данных

из существующих корпоративных информационных систем.

Задачи исследования включают: анализ существующей практики работы и выявление ограничений ручного анализа; разработку архитектуры интеграции данных из систем MMS (Material Management System), Labware, PI System, Metallurgical Intelligence и Power BI; проектирование алгоритмов машинного обучения для выявления аномалий и прогнозирования отклонений; создание механизма межцехового и межзаводского взаимодействия для раннего предупреждения о потенциальном негативном влиянии; оценку ожидаемых эффектов от внедрения системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются технологические процессы Усть-Каменогорской металлургической площадки ТОО "Казцинк", включающие производственные цепочки цинка, свинца, меди и драгоценных металлов. Предмет исследования - методы и алгоритмы автоматизированного анализа технологических отклонений с применением технологий искусственного интеллекта.

В работе использованы данные из следующих корпоративных информационных систем:

Таблица 1. Информационные системы, интегрируемые в предлагаемую платформу

Система	Назначение	Тип данных
MMS	Система управления материалами	Структурированные транзакционные и справочные данные
Labware	Управление лабораторными данными	Результаты анализов
PI System	Сбор данных в реальном времени	Технологические параметры
MI	Металлургические расчеты	Показатели процессов
Power BI	Бизнес-аналитика	Агрегированные метрики

Методологическая основа исследования включает методы системного анализа, машинного обучения и интеллектуального анализа данных:

- Системный анализ — позволяет рассматривать производственный процесс как единое целое, выявляя взаимосвязи между различными компонентами системы и понимая, как изменения в одной части влияют на остальные.

- Машинное обучение — даёт возможность создавать математические модели, которые самостоятельно «учатся» на данных и выявляют сложные закономерности, недоступные традиционным методам анализа.

- Интеллектуальный анализ данных (Data Mining) — совокупность методов для извлечения полезных знаний из больших массивов информации.

Для выявления аномалий предложено использовать комбинацию статистических методов контроля процессов (SPC) и алгоритмов машинного обучения, включая изолированный лес (Isolation Forest) для обнаружения выбросов и LSTM-нейросети для прогнозирования временных рядов технологических параметров [3, 4].

Архитектура предлагаемой системы построена по принципу микросервисов с использованием контейнеризации Docker и оркестрации Kubernetes. Интеграция данных осуществляется через ETL-конвейеры с промежуточным хранилищем на базе PostgreSQL и ClickHouse для аналитических запросов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время работа специалистов технологического персонала, ОТК и службы поддержки производства на металлургической площадке основана на ручном сборе и анализе данных из различных источников. Ежедневно обрабатывается информация о результатах лабораторных анализов, показаниях технологических датчиков и отчетах о производственных операциях.

Выявлены следующие ключевые ограничения существующего подхода:

1. Фрагментированность данных, т.е. информация разрознена между различными системами, что требует значительных временных затрат на её сбор и сопоставление.

2. Реактивный характер анализа - анализ проводится после возникновения отклонений, что ограничивает возможности превентивного управления.

3. Ограниченность масштаба, заключенная в том, что ручной анализ позволяет охватить лишь небольшую часть параметров и отклонений.

4. Отсутствие интеграции между подразделениями, в связи с чем сложно выявлять взаимосвязи отклонений между заводами Усть-Каменогорской Металлургической площадки, что особенно явно прослеживается при сведении баланса металлов в целом на Комплексе.

Архитектура интеллектуальной системы анализа

Разработана архитектура системы, обеспечивающая автоматизированный сбор, интеграцию и анализ данных из всех ключевых информационных систем предприятия. Система функционирует по следующему принципу:

На этапе сбора данных осуществляется извлечение информации из систем MMS (движения сырья), Labware (лабораторные анализы), PI System (технологические параметры в реальном времени), Metallurgical Intelligence (металлургические расчеты) и Power BI (агрегированные показатели). Данные нормализуются и загружаются в централизованное хранилище.

Модуль анализа на базе алгоритмов машинного обучения выполняет многомерный анализ параметров, выявляет аномалии, строит прогнозные модели и формирует приоритизированный список отклонений. Система использует как правила на основе экспертных знаний, так и самообучающиеся модели для выявления скрытых закономерностей.

Механизм межзаводского взаимодействия

Ключевой особенностью предлагаемой системы является механизм взаимодействия между заводами, позволяющий выявлять отклонения, потенциально влияющие на смежные производственные площадки. Разработаны алгоритмы корреляционного анализа для выявления следующих типов взаимосвязей:

Таблица 2. Типы межзаводских взаимосвязей, контролируемые системой

Тип взаимосвязи	Контролируемый параметр	Потенциальное влияние
Экологическая	Содержание пыли в отходящих газах	Ухудшение экологических показателей смежного завода
Технологическая	Содержание свинца в шлаковозгонах	Нарушение технологического режима переработки
Химическая	Примеси в передаваемых растворах	Снижение качества конечной продукции
Энергетическая	Температура и давление сред	Нарушение теплового баланса системы

При выявлении отклонений, способных повлиять на смежные производства, система автоматически генерирует предупреждения и направляет их ответственным специалистам с указанием характера потенциального воздействия и рекомендуемых действий.

Потенциальные функциональные возможности системы

Предлагаемая система позволит обеспечить следующие ключевые функциональные возможности:

- Ежедневное формирование сводок по отклонениям с приоритетом по степени критичности;
- Прогнозирование вероятности возникновения отклонений на основе исторических данных и текущих трендов;
- Выявление скрытых закономерностей и корреляций между параметрами различных производственных процессов;
- Автоматическое оповещение о критических отклонениях и потенциальных межзаводских влияниях;
- Формирование рекомендаций по корректирующим действиям на основе анализа исторических решений;
- Визуализация данных с возможностью детализации.

Ожидаемые эффекты внедрения

На основании анализа опыта внедрения аналогичных систем в металлургической отрасли* и расчетов для условий Усть-Каменогорской площадки ТОО "Казцинк" определены следующие ожидаемые эффекты:

Таблица 3. Ожидаемые эффекты от внедрения системы

Показатель	Ожидаемый эффект	Примечание
Время реакции на отклонения	-70%	Переход к проактивному управлению
Охват контролируемых параметров	x5	Анализ всех доступных данных
Количество производственных инцидентов	-30%	Раннее предупреждение
Трудозатраты персонала на анализ	-50%	Автоматизация рутинных операций
Точность прогнозирования	+40%	Машинное обучение на исторических данных
Корректировки технологического режима	+60%	Оперативное управление персоналом
Генерация решений ИИ	Внедрена	Автоматические рекомендации по устранению
Общий контроль площадки	Единый портал	Централизованный мониторинг для планирования

* Пример платформа генеративного искусственного интеллекта запущенная в 2025 году на ПАО «Северсталь», РФ

Особое значение могут иметь новые функциональные возможности, которые открываются для различных категорий персонала. Технологический персонал получит инструмент для оперативного внесения корректировок в технологический режим на основе данных анализа отклонений. Система сможет предоставить персонализированные рекомендации по оптимизации параметров процессов, что позволит улучшать показатели качества и эффективности производства в режиме

реального времени.

ИИ системы будут способны генерировать возможные пути решения выявленных проблем на основе анализа исторических данных о успешных корректирующих действиях, экспертных правил и прогнозных моделей. Это существенно сократит время принятия решений и повысит их обоснованность.

Специалисты службы планирования и анализа получают возможность производить общий контроль над производством всей площадки через единый информационный портал. Интегрированное представление данных из всех производственных участков позволяет выявлять системные проблемы, планировать ресурсы и оптимизировать производственные программы на основе достоверной аналитики.

Таким образом, внедрение предлагаемой системы позволит трансформировать функции от реактивного анализа к проактивному управлению качеством, значительно повысит охват контролируемых параметров и обеспечит раннее предупреждение о потенциальных проблемах. Система сможет создать основу для цифровой трансформации производственного управления и повышения конкурентоспособности предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования разработана концепция интеллектуальной системы автоматизированного анализа технологических отклонений для металлургического производства. Предложенное решение обеспечивает интеграцию данных из корпоративных систем MMS (Material Management System), Labware, PI System, Metallurgical Intelligence и Power BI, что позволит проводить комплексный анализ большего числа отклонений по сравнению с существующим ручным подходом.

Научная новизна работы заключается в разработке механизма взаимодействия между подразделениями одного Комплекса, позволяющего выявлять и предупреждать о потенциальном негативном влиянии отклонений на смежные производственные площадки. Предложенные алгоритмы корреляционного анализа учитывая специфику металлургических процессов и обеспечит раннее оповещение о рисках.

Практическая значимость исследования состоит в создании методологической основы для цифровой трансформации функций специалистов технологического персонала, служб ОТК и поддержки производства. Ожидается, что внедрение системы позволит сократить время реакции на отклонения на 70%, повысить охват контролируемых параметров в 5 раз и снизить количество производственных инцидентов на 30%. Дополнительные эффекты включают расширение функциональных возможностей технологического персонала, внедрение интеллектуальной поддержки принятия решений и создание единого центра управления производством для службы планирования и анализа.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: Автор выражает благодарность коллегам и специалистам ТОО "Казцинк" за предоставленные материалы и конструктивные обсуждения.

Уведомление об использовании технологий искусственного интеллекта: При подготовке статьи автор использовал инструменты искусственного интеллекта для помощи в структурировании текста и редактировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lee, J., Cameron, I., & Hassall, M. (2022). Improving process safety in chemical plants using machine learning: A comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*, 167, 388-410. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.024>
- Zhang, Y., Qin, S. J., & Chai, T. (2022). Data-driven smart manufacturing: A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(1), 421-436. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3103167>
- Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z. H. (2022). Isolation-based anomaly detection. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, 6(1), 1-39. <https://doi.org/10.1145/2133360.2133363>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (2023). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab/>
- Hecklau, F., Galeitzke, M., Flachs, S., & Kohl, H. (2016). Holistic approach for human resource management in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 54, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.102>
- Kowal, B., Wlodarz, D., Brzychczy, E., & Klepka, A. (2022). Analysis of employees' competencies in the context of Industry 4.0. *Energies*, 15(19), 7142. <https://doi.org/10.3390/en15197142>
- Баксултанов, Д., Курманов, Н., Керимкулова, М., и Сырлыбаева, Н. (2022). Анализ и оценка состояния инновационного развития Казахстана. *Журнал экономических исследований и делового администрирования*, 141(3), 138-150. <https://doi.org/10.26577/be.2022.v141.i3.13>
- Сатпаева, З. Т., Жангалиева, К. Н. (2023). Обзор цифровых платформ для оценки развития инновационной инфраструктуры Республики Казахстан. *Научное обозрение: Актуальные вопросы теории и практики*, 103-105. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54730059_66500985.pdf
- Хайруллина, М. В., Сейсинбинова, А. А. (2019). Проблемы формирования государственной политики инновационного развития Казахстана и России: сравнительный анализ. *Вестник ЕНУ им. Л. Н. Гумилева. Серия Экономика*, 1(126), 121-131. <https://doi.org/10.32523/2079-620X-2019-1-121-131>
- Kimi K2.5. (2025, март 29). Упрощение и расширение научного текста о методологии исследования: методы системного анализа, машинного обучения, интеллектуального анализа данных, обнаружение аномалий, микросервисная архитектура [Большая языковая модель]. Платформа Moonshot AI. URL: <https://kimi.moonshot.cn> (дата обращения: 29.03.2026).

ҚОРҒАСЫНДЫ РАФИНИРЛЕУ КЕЗІНДЕ СІЛТІЛІ ЕРІТІНДІЛЕРДЕН МЫШЬЯКТЫ ГИДРАТТЫ ӘКТІ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ТҰНДЫРУ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

УДК 669.4:669.782:66.061.34

В.М.Испаева^{1*}, Р.А. Рамазанова¹

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

*Автор-корреспондент: Испаева Венера Муратовна, e-mail: Vsmailova89@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Қорғасынды рафинирлеу қалдықтарын гидрометаллургиялық өңдеу кезінде сілтілі ерітінділерден мышьяқты тұндыру процесін оңтайландыру бойынша зерттеу нәтижелері ұсынылған. Әкті сүт пульпасының дәстүрлі түрін құрғақ гидратты әкпен алмастыру тазарту тиімділігін төмендетпейтіні көрсетілген. Гидратты әкті қолданғанда тұндырудың оңтайлы температурасы 90–95°С-тан 60–75°С-қа дейін төмендейтіні анықталды. Мышьяқтың кекке шығымы 96,2–97,8%-ды құрайды, ал фильтраттағы қалдық мөлшері 1,36 г/л-ден аспайды. Гидратты әктің шығыны 2,24 г/г As, бұл белсенді СаО мөлшеріндегі айырмашылықтарға байланысты күйдірілмеген әк шығынынан (1,94 г/г As) 1,15 есе жоғары.

ТҮЙІНДІ СӨЗДЕР: мышьяк, кальций арсенаты, гидратты әк, қорғасынды рафинирлеу, гидрометаллургия, техногендік қалдықтар.

КІРІСПЕ

Мышьяк қорғасын-мырыш шикізатын металлургиялық өңдеу процестерінде кездесетін ең улы қоспалардың бірі болып табылады және қоршаған ортада жоғары миграциялық қабілеті мен кумулятивтік әсеріне байланысты елеулі экологиялық қауіп төндіреді. Қара қорғасынды сілтілі рафинирлеу кезінде мышьяк сілтілі балқымаларда және кейінгі ерітінділерде жинақталып, міндетті түрде залалсыздандыруды қажет етеді.

Металлургиялық кәсіпорындарда мышьяқты тұндырудың дәстүрлі технологиясы арнайы сәндіру барабандарында дайындалатын әкті сүт пульпасын қолдануды қарастырады. Бұл тәсіл пульпаны дайындау мен тасымалдауға қосымша шығындарды талап етеді, сондай-ақ жеке жабдықты пайдалануды қажет етеді. Қорғасынды рафинирлеу цехының гидрометаллургиялық учаскесіне мышьяқтың түсуі азайған жағдайда жабдықтың толық жүктелмеуі байқалады, бұл технологиялық сызбаның жалпы тиімділігін төмендетіп, неғұрлым ұтымды шешімдерді іздеуді қажет етеді [1].

Процесті жетілдірудің перспективалы бағыттарының бірі – технологияны жеңілдетуге және энергия шығындарын азайтуға мүмкіндік беретін құрғақ гидратты әкті (әк-пушонканы) қолдану болып табылады. Сонымен қатар, бұл реагенттің мышьяқтың тұну дәрежесіне, процестің температуралық режиміне және ерітінділердегі қалдық қоспа мөлшеріне әсері қосымша зерттеуді талап етеді.

Осы жұмыстың мақсаты – ерітінділерді мышьяктан тазарту тиімділігін сақтай отырып немесе арттыра отырып, әкті сүт пульпасын құрғақ гидратты әкпен алмастыру мүмкіндігін бағалау, сондай-ақ процестің оңтайлы технологиялық параметрлерін анықтау.

ЗАМАНАУИ ЗЕРТТЕУЛЕРДІ ТАЛДАУ

Заманауи зерттеулердің бірқатары гидрометаллургиялық процестердегі мышьяқтың мінез-құлқын зерттеуге және оны тиімді бөліп алу мен залалсыздандыру әдістерін әзірлеуге арналған. Мәселен, [2] жұмыста мышьяк құрамды шикізатты гидрометаллургиялық өңдеу технологиялары, соның ішінде сілтісіздендіру және

мышьякты тұрақты қосылыстар түрінде кейінгі тұндыру процестері қарастырылған. Мышьякты аз еритін формаларға айналдыру қалдықтардың экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ететін негізгі бағыт екені көрсетілген.

[3] зерттеуінде қиын өңделетін алтын құрамды кендерді автоклавтық тотығу (POX) кезінде мышьяқтың мінез-құлқы зерттелген. Мышьяқтың темір арсенаттары ($\text{Fe-AsO}_4\text{-SO}_4$) түрінде тиімді байланысатыны анықталған, бұл ретте тұнбалардың морфологиясы мен тұрақтылығы процестің технологиялық параметрлеріне тәуелді.

[4] жұмысында сулы ерітінділерден мышьякты темір құрамды адсорбенттерді қолдану арқылы жою әдістеріне сыни шолу жасалған. Мұндай материалдардың мышьяк қосылыстарымен берік беткі кешендер түзуіне байланысты жоғары сорбциялық қабілетке ие екені көрсетілген, алайда процестің тиімділігі ортаның рН мәніне және мышьяқтың болу формасына байланысты.

[5] шолуында мышьяк металлургиясының негізгі бағыттары, соның ішінде арсен құрамды минералдарды өңдеу және оны иммобилизациялау әдістері қарастырылған. Ең сенімді тәсіл ретінде мышьякты темір және кальций арсенаттары сияқты тұрақты қосылыстар түрінде тұндыру арқылы элементті ұзақ мерзімді бекіту қамтамасыз етілетіні атап өтілген.

[6] жұмысында сульфидті минералдардан, атап айтқанда энаргит пен арсенопириттен мышьякты жою әдістері талданған. Мышьякты бөліп алу тиімділігі тотығу-сілтісіздендіру жағдайларын таңдауға, сондай-ақ мышьякты тұндыру және тұрақтандырудың кейінгі сатыларына байланысты екені көрсетілген.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Мышьякты сілтілі ерітінділерден кальций арсенаты түрінде тұндыру бойынша зерттеулер реагент түрін және процестің температуралық режимін өзгерту арқылы технологиялық регламент талаптарына сәйкес жүргізілді.

Эксперименттер 20-25°C, 60-75°C және 90-95°C температураларда, белсенді СаО мөлшерін 1г As-қа 1,36г (1г As-қа 1,8г Ca(OH)_2 сәйкес) жүктеу кезінде және процесс ұзақтығы 2 сағат болған жағдайда орындалды. Реагент ретінде әкті сүт пульпасы мен құрғақ гидратты әк қолданылып, олардың формасының мышьякты тұндыру тиімділігіне әсерін бағалауға мүмкіндік берді.

Тұрақты араластыру кезінде мышьяк құрамды сілтілі ерітінді берілген температураға дейін қыздырылды. Тұнбамен бірге сілтінің сүзу кезінде жоғалуын болдырмау және тұндыру процесінде оның концентрациясын төмендету үшін жүйеге соңғы NaOH мөлшері 90г/л-ден аспайтындай етіп учаскеден алынған шайынды су қосылды. Осыдан кейін құрамында әк бар реагенттің есептелген мөлшері енгізілді.

Процесс аяқталғаннан кейін алынған пульпа сүзілді, ал кек шайынды сумен жуылды. Алынған өнімдер химиялық бақылау жоспарына сәйкес талданды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Кесте 1 90-95 °C температурада әкті сүт пульпасы мен құрғақ гидратты әктің салыстырмалы сынақтарының нәтижелері көрсетілген.

Құрғақ гидратты әкті қолдану ерітіндіді тереңірек тазартуға мүмкіндік берді (қалдық мышьяк мөлшері 1,36 г/л, ал дәстүрлі әдісте 5,83 г/л) және мышьяқтың кекке шығуын арттырды – 86,4%-дан 96,2%-ға дейін. Екі жағдайда да қалдық мышьяк мөлшері технологиялық регламент талаптарына сәйкес келеді (<8 г/л As).

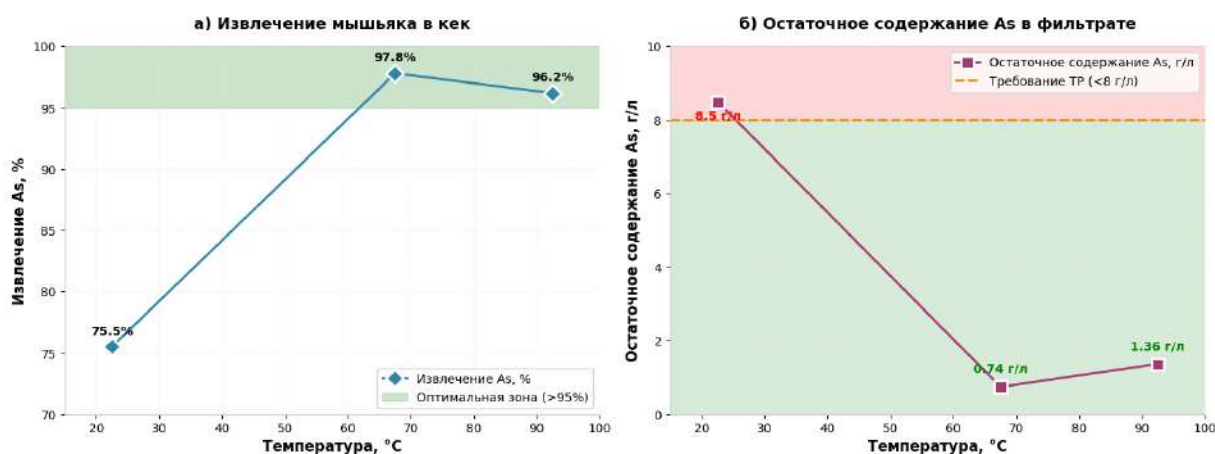
Кесте 1. Өртүрлі реагенттерді қолданғанда мышьяқты тұндыру тиімділігін салыстыру ($t = 90\text{--}95\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Параметрі	Әкті сүт пульпасы	Гидратты әк
Бастапқы ерітінді		
Мөлшері, г/л As, г/л	126,7	126,7
Тұндыру өнімдері		
Кектегі мышьяк мөлшері, %	26,5	27,25
Кектегі CaO мөлшері, %	39,5	37,6
Кектің шығымы (жуудан кейін), г/л бастапқы ерітінді	413,0 ($W=41,4\%$)	450,95 ($W=39,9\%$)
Фильтрат		
Фильтраттағы қалдық мышьяк мөлшері, г/л	5,83	1,36
NaOH мөлшері, %	115,2	76,2
pH	13,18	12,99
Мышьяқты кекке шығару, %	86,4	96,2
<i>Ескерту: W — кектің ылғалдылығы</i>		

Гидратты әкті қолданғанда температураның $20\text{--}95\text{ }^{\circ}\text{C}$ диапазонында тұндыру процесіне әсері зерттелді. Нәтижелер 2-кестеде және 1-суретте көрсетілген.

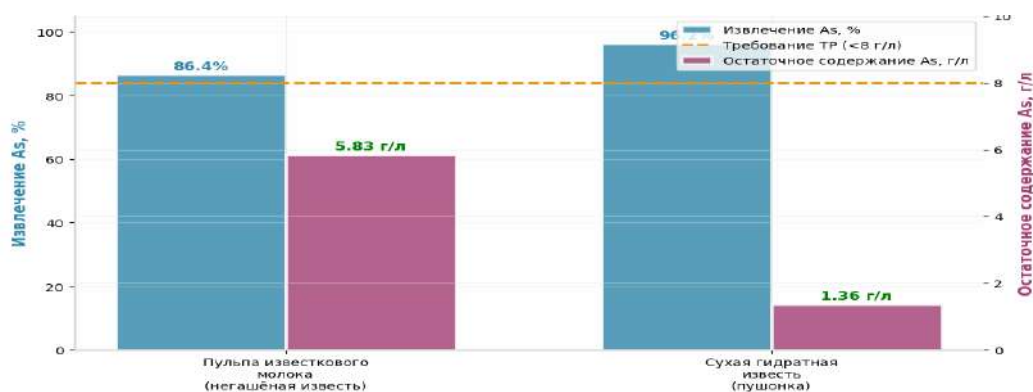
Кесте 2. Температураның гидратты әкпен мышьяқты тұндыру көрсеткіштеріне әсері

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Кектегі мышьяк мөлшері (%)	Фильтраттағы қалдық мышьяк (г/л)	Мышьяқты кекке шығару (%)	Кектің шығымы, г/л
20–25	20,15	8,5	75,5	458,8 ($W=46,6\%$)
60–75	27,73	0,74	97,8	449,4 ($W=40,2\%$)
90–95	27,25	1,36	96,2	450,95 ($W=39,9\%$)
<i>Ескерту: W — кектің ылғалдылығы</i>				



Сурет 1. Мышьяқтың тұндыру көрсеткіштерінің процесс температурасына тәуелділігі

1 және 2-суреттерде процесс температурасына байланысты мышьяқтың тұндыру көрсеткіштері көрсетілген, сондай-ақ олардың салыстырмалы талдауы берілген.



Сурет 2. Процесс температурасына байланысты мышьякты тұндыру көрсеткіштерін салыстыру

Бөлме температурасында (20-25°C) мышьякты алу тек 75,5% құрады, ал фильтраттағы қалдық мөлшері (8,5 г/л) нормативтен асып түсті. Оңтайлы температура 60-75°C құрайды, онда максималды қалпына келтіруге (97,8%) және минималды қалдық мөлшері (0,74 г/л) қол жеткізіледі. Температураның одан әрі 90-95°C дейін көтерілуі көрсеткіштердің айтарлықтай жақсаруына әкелмейді, бірақ энергия шығынын арттырады.

Реагенттерді тұтыну. Ерітіндідегі 1 г мышьякқа арналған реагенттердің есептік шығыны:

Кесте 3. Реагенттердің бірлік шығыны

Реагент	Шығын, г/г As	Мөлшері CaO _{акт} , %	Айырмашылықтардың себебі
Сөндірілмеген әк әкті сүт пульпасы)	1,94	70,1	Жоғары CaO белсенділігі
Гидратты әк (пушонка)	2,24	60,71	Жартылай карбонизация және байланысқан судың мөлшері

Гидратталған әк шығыны белсенді CaO-ның аз болуына (70,1% - ға қарсы 60,71%) және Ca(OH)₂ құрамында судың болуына байланысты 1,15 есе жоғары.

Сақтау кезінде реагенттердің тұрақтылығы. 3 апта бойы ауада сақталған кезде әктің карбонизациясы зерттелді (4-кесте).

3 апта ішінде екі реагенттің белсенділігі шамамен 2 есе төмендеді. Ең қарқынды карбонизация бірінші аптада байқалды, CaCO₃ өсімі сөндірілмеген үшін 8,4% және гидратталған әк үшін 10,4% құрады. Одан әрі карбонизация аптасына 1-3% дейін баяулады.

Кесте 4. Әктің сақтау кезінде белсенділігінің өзгеруі

Сақтау мерзімі	Сөндірілмеген әк CaO _{жал} /CaO _{акт} , %	Гидратты әк CaO _{жал} /CaO _{акт} , %
Бастапқы сынама	86,92/70,1	76,83/60,71
1 апта	72,9/47,67	71,36/44,86
2 апта	68,69/40,1	67,21/38,96
3 апта	65,89/35,57	63,65/34,07
Белсенді CaO-ның бастапқы мөлшерге қатысты төмендеуі	49%	44%

Алынған нәтижелерге сүйене отырып, мышьяктан ерітінділерді тазарту тиімділігін төмендетпей, әк сүтінің пульпасын құрғақ гидратталған әкке ауыстыру ұсынылады. Процестің оңтайлы температуралық режимін 90-95 °C-тан 60-75 °C-қа дейін төмендетуге болатындығы анықталды, бұл энергия шығынын азайтуға көмектеседі. Бұл жағдайда белсенді CaO құрамындағы 1,15 есе айырмашылықты

ескере отырып, реагенттің дозасын түзету қажет. Сонымен қатар, гидратталған әкті оның карбонизациясын болдырмау және реактивтілігін сақтау үшін герметикалық сақтау шарттары қамтамасыз етілуі керек.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмыста қорғасын өндірісінің гидрометаллургиялық процестерінің сілтілі ерітінділерінен мышьяқты тұндыру тиімділігін арттыру мәселелері қаралды. Құрамында мышьяк бар қалдықтарды залалсыздандырудың қолданыстағы әдістеріне талдау жүргізілді және әртүрлі әк реагенттерінің мышьяқты тұндыру процесіне әсері зерттелді.

Әк сүті пульпасының орнына құрғақ гидратты әк қолдану мышьяқты алу дәрежесінің 86,4% - дан 96-98% - ға дейін жоғарылауын, оның фильтраттардағы қалдық құрамының 1,4 г/л-ден төмен төмендеуін қамтамасыз ететіні, сондай-ақ процестің температурасын 90-95 °С-тан 60-75 °С-қа дейін төмендетуге және әк сүтін дайындау сатысын болдырмауға мүмкіндік беретіні анықталды.

Процестің тиімділігін анықтайтын негізгі факторлардың температура мен ортадағы рН мәні екені көрсетілді, олардың оңтайландырылуы ерітінділерді тазалаудың нормативтік көрсеткіштеріне қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер практикалық мәнге ие болып, мышьяқты қоспалы қалдықтарды қайта өңдеу технологиялық схемаларын жетілдіруде, сондай-ақ металлургиялық кәсіпорындардың экологиялық қауіпсіздігін арттыруда қолданылуы мүмкін.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Мақала автордың ғылыми-зерттеу жұмысы аясында дайындалған.

АЛҒЫС: Автор ғылыми жетекшіге консультациялық қолдау көрсеткені үшін ризашылығын білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Қолжазбаны дайындау кезінде мәтінді құрылымдау және тілдік редакциялау үшін жасанды интеллект құралдары қолданылды. Мақаланың мазмұны үшін түпкілікті ғылыми интерпретация мен жауапкершілік авторға тиесілі.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Набойченко С.С., Мамяченков С.В., Карелов С.В. Түсті металлургиядағы мышьяк. – Екатеринбург, 2004.
- Vasiliev R.E., Boduen A.Ya., Vasilieva A.A. Hydrometallurgical technologies of processing arsenic raw materials. iPolytech Journal. 2022;26(4):677-687. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-677-687>
- Strauss J. A., Bazhko V., Ventruti G., Liguó X., Gomez M. A. Arsenic behavior during the treatment of refractory gold ores via POX: characterization of Fe-AsO₄-SO₄ precipitates // Hydrometallurgy. 2021. Vol. 203. P. 105616. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105616>.
- Hao Linlin, Liu Mengzhu, Wang Nannan, Li Guiju. A critical review on arsenic removal from water using iron-based adsorbents // The Royal Society of Chemistry. 2018. Vol. 3. Iss. 69. P. 39545–39560. <https://doi.org/10.1039/C8RA08512A>.
- Nazari A. M., Radzinski R., Ghahreman A. Review of arsenic metallurgy: treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 174. P. 258–281. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.011>
- Zhao Yu, Zhao Hongbo, Abashina T., Vainshtein M. Review on arsenic removal from sulfide minerals: an emphasis on enargite and arsenopyrite // Minerals Engineering. 2021. Vol. 172. P. 107133.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ ВАЗ-21214 ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ВПУСКНОГО КОЛЛЕКТОРА

УДК 629.331

В.Н. Казанцев^{1*}, М.С. Муздыбаев¹, А.С. Муздыбаева¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Казанцев Владимир Николаевич, e-mail: vladimir-kazantsev2004@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В данной работе рассмотрены конструктивные особенности впускного коллектора автомобиля ВАЗ-21214 и исследовано их влияние на показатели работы двигателя. Установлено, что стандартная конструкция коллектора ограничивает эффективность наполнения цилиндров и стабильность рабочих процессов. Это приводит к снижению мощности и ухудшению экономичности. Дальнейшие исследования направлены на совершенствование конструкции впускного коллектора с целью повышения эффективности работы двигателя и улучшения его эксплуатационных характеристик.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: впускной коллектор, газодинамика, пропускная способность, эффективность наполнения, мощностные показатели, экономичность, эффективность работы.

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к двигателям внутреннего сгорания включают повышение мощности, улучшение топливной экономичности и снижение токсичности отработавших газов. Автомобиль ВАЗ-21214, оснащённый четырёхцилиндровым бензиновым двигателем рабочим объёмом 1,7 л, широко используется в дорожных и внедорожных условиях. Однако штатный впускной коллектор изначально разрабатывался под минимальные производственные затраты, что приводит к ряду ограничений, связанных с геометрией каналов, резонансными свойствами и аэродинамическими потерями. Эти факторы отрицательно сказываются на потенциале двигателя. В отличие от систем впуска современных зарубежных автомобилей (Sahil Wahi et al., 2020), (Singhal Arpit, 2016), (Ruqaiyah Syafiqah et al., 2023), (Patil D.K. et al., 2016), где ключевыми задачами являются высокая степень унификации, минимальные аэродинамические потери и использование изменяемой геометрии впускных трактов, конструкция впускного коллектора автомобиля ВАЗ-21214 является более старой и простой. Она была разработана с расчётом на массовое производство и эксплуатацию в различных дорожных условиях, однако простота конструкции определяет и ряд недостатков, влияющих на эффективность работы двигателя.

Таким образом, целью настоящей работы является анализ существующей конструкции впускного коллектора автомобиля ВАЗ-21214 и разработка путей его совершенствования для повышения эффективности рабочих процессов двигателя.

Научная новизна работы заключается в разработке и обосновании новых подходов к оптимизации конструкции впускного коллектора двигателя ВАЗ-21214, позволяющих повысить эффективность воздушного наполнения цилиндров.

Практическая значимость заключается в улучшении качества наполнения всех цилиндров двигателя что приводит к повышению его тягово-экономических характеристик

Гипотеза - модернизация конструкции впускного коллектора двигателя автомобиля ВАЗ-21214 позволит повысить эффективность наполнения цилиндров, улучшить рабочие показатели двигателя и увеличить ресурс его элементов. Для подтверждения данной гипотезы необходимо провести комплексное исследование, включающее анализ газодинамических характеристик штатного коллектора, оценку влияния его геометрии на параметры работы двигателя, а также разработку и испытание усовершенствованной конструкции впускного тракта.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования были использованы:

1. Аналитический метод — изучение конструктивных особенностей впускного коллектора двигателя ВАЗ-21214, анализ факторов, влияющих на неравномерность наполнения цилиндров, потери давления и снижение эффективности работы двигателя.

2. Методы технической диагностики — анализ характеристик работы двигателя, включая показатели мощности, крутящего момента, расхода топлива и стабильности холостого хода, с целью выявления недостатков штатного коллектора.

3. Экспериментальные методы — проведение работ по модернизации впускного коллектора (изменение геометрии каналов, увеличение объёма ресивера, оптимизация формы каналов) и последующее испытание двигателя в условиях, приближённых к реальной эксплуатации.

4. Методы инженерных расчётов — определение оптимальных размеров каналов и ресивера, оценка влияния конструкции впускного тракта на скорость и равномерность воздушного потока, а также на мощностные показатели двигателя.

5. Методы сравнительного анализа — сопоставление показателей работы двигателя до и после модернизации коллектора, оценка изменений мощности, экономичности, равномерности наполнения цилиндров и устойчивости работы двигателя.

6. Методы экономического анализа — оценка эффективности внедрения модернизированного коллектора, включая снижение расхода топлива, повышение ресурса двигателя и потенциальное уменьшение затрат на техническое обслуживание.

При помощи указанных методов исследования были решены следующие задачи:

1) Выполнить анализ современного состояния исследований в области конструкции впускных коллекторов и оптимизации воздушного тракта бензиновых двигателей.

2) Изучить теоретические основы повышения эффективности работы двигателя за счёт совершенствования впускного коллектора.

3) Выявить причины снижения эффективности наполнения цилиндров и потери мощности двигателя ВАЗ-21214 при эксплуатации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процесса проектирования систем впуска бензиновых двигателей, а также для повышения эффективности и надёжности эксплуатации автомобилей семейства ВАЗ.

Штатный впускной коллектор ВАЗ-21214 представляет собой литую алюминиевую деталь с небольшим объёмом ресивера и сравнительно короткими каналами (рисунок 1). Основным функциональным назначением коллектора является равномерное распределение воздуха между цилиндрами и обеспечение оптимальной скорости воздушного потока при различных режимах работы двигателя. Однако геометрия каналов и их длина не позволяют эффективно использовать

газодинамические явления, такие как резонансный наддув, широко применяемые в более совершенных впускных системах.



Рисунок 1. Двигатель ВАЗ-21214

Одной из особенностей конструкции штатного коллектора является наличие резких переходов, локальных сужений и неодинаковой длины каналов. Такие особенности приводят к увеличению газодинамических сопротивлений и неравномерности наполнения цилиндров. В результате на определённых режимах работы двигателя наблюдается снижение крутящего момента, ухудшение тяговых характеристик и повышенный расход топлива. (рисунок 2)

Кроме того, малый объём ресивера ограничивает стабильность давления во впускном тракте, что отрицательно влияет на динамику воздушного потока.

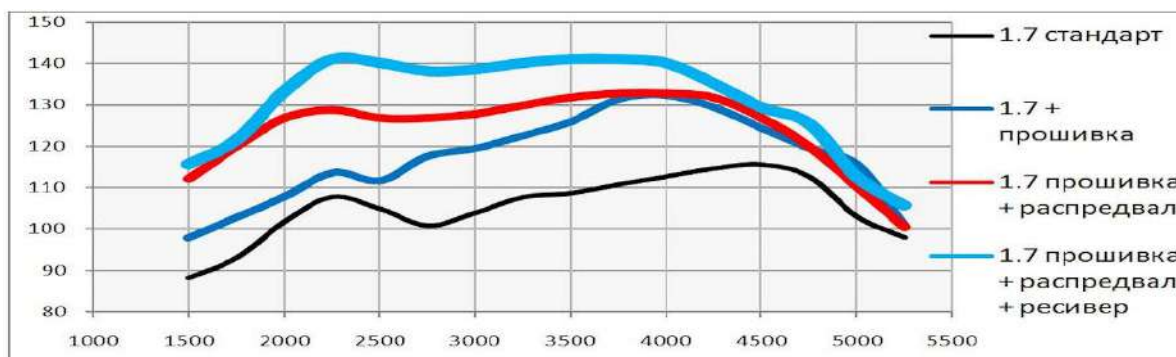


Рисунок 2.

Газодинамические исследования показывают, что при работе двигателя на средних и высоких оборотах скорость воздушного потока во впускном тракте достигает значений, при которых любые неровности и локальные препятствия существенно снижают эффективность наполнения. В таких условиях воздушный поток становится турбулентным (рисунок 3), что приводит к ухудшению смесеобразования и снижению мощности двигателя. Это особенно заметно при резком открытии дроссельной заслонки, когда небольшие задержки в поступлении воздуха приводят к провалам в тяге.

Модернизация конструкции впускного коллектора должна учитывать как газодинамические особенности воздушного потока, так и рабочие характеристики двигателя ВАЗ-21214. Одним из наиболее эффективных методов улучшения является увеличение объёма ресивера. Более крупный ресивер позволяет стабилизировать давление воздуха перед впускными каналами, обеспечивая более равномерное и

предсказуемое наполнение цилиндров. Это улучшает крутящий момент в среднем диапазоне оборотов, который является наиболее востребованным для условий городского и внедорожного движения.

Дополнительным методом повышения эффективности является удлинение и выравнивание впускных каналов. Длина канала напрямую влияет на частоту резонансных колебаний воздуха, определяя, в каком диапазоне оборотов двигатель получает максимальное наполнение. Увеличение длины каналов способствует улучшению тяги на низких и средних оборотах, а их выравнивание обеспечивает равномерность подачи воздуха во все цилиндры. Это положительно отражается на устойчивости холостого хода и снижает вибрации двигателя.

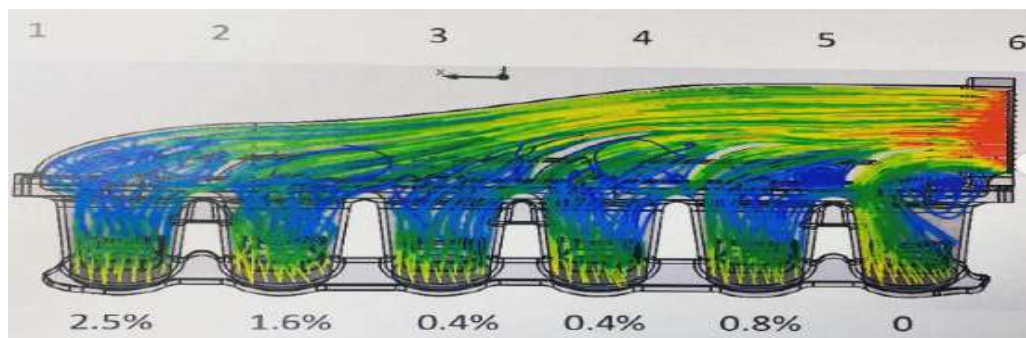


Рисунок 3. Динамика воздушных потоков во впускном коллекторе

Значительное влияние на характеристики имеет и оптимизация формы каналов. Увеличение радиусов поворотов, устранение острых кромок и выравнивание сечений позволяют сократить потери давления и улучшить ламинарность потока. Такие доработки способствуют повышению мощности двигателя на высоких оборотах и уменьшению расхода топлива за счёт более полного сгорания смеси. Современные аналоги впускных систем, применяемые на зарубежных автомобилях, например Renault, Toyota, Volkswagen, используют крупно объёмные пластиковые ресиверы и длинные геометрически выверенные каналы. Эти конструкции позволяют эффективно управлять характеристиками двигателя во всём диапазоне оборотов. В отечественной практике подобные решения используются реже, однако переход на современные методы проектирования впускных трактов является актуальным и перспективным.

Таким образом, совершенствование конструкции впускного коллектора автомобиля ВАЗ-21214 позволяет существенно улучшить рабочие характеристики двигателя без серьёзного вмешательства в основную конструкцию силового агрегата. Предлагаемые методы модернизации обеспечивают повышение эффективности воздушного наполнения, улучшение газодинамических условий работы двигателя, снижение эксплуатационных нагрузок и повышение ресурса отдельных элементов. Итоги проведённого анализа подтверждают актуальность разработки усовершенствованного впускного коллектора для повышения надёжности и экономической эффективности эксплуатации автомобиля. Результаты исследования показывают, что увеличение объёма ресивера и выравнивание каналов обеспечивают более равномерное распределение воздуха, рост крутящего момента и снижение расхода топлива, что повышает общую экономичность двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования были проанализированы конструктивные особенности впускного коллектора автомобиля ВАЗ-21214 и установлено их влияние на показатели работы двигателя. Поставленная цель — анализ существующей конструкции и разработка направлений её совершенствования — была достигнута. В

процессе работы выявлены основные факторы, снижающие эффективность наполнения цилиндров: малый объём ресивера, неравномерная длина каналов и наличие локальных аэродинамических сопротивлений.

Научная новизна исследования заключается в обосновании комплекса конструктивных изменений впускного тракта, направленных на повышение равномерности распределения воздушного потока и улучшение газодинамических характеристик двигателя. Предложенные решения позволяют повысить крутящий момент в среднем диапазоне оборотов, снизить расход топлива и улучшить устойчивость работы двигателя без серьёзного вмешательства в его базовую конструкцию.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанных рекомендаций при модернизации серийных двигателей и в процессе проектирования новых систем впуска. Полученные результаты могут быть использованы в учебной и профессиональной деятельности специалистов автотранспортной отрасли.

Перспективы дальнейших исследований связаны с проведением более детальных газодинамических расчётов, компьютерного моделирования потоков и стендовых испытаний модернизированной конструкции для уточнения полученных данных и оценки её долговременной надёжности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без внешней финансовой поддержки.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия GPT-4o) для улучшения языковой стилистики и редактирования текста. После завершения работы ИИ авторы просмотрели и отредактировали контент, принимая на себя полную ответственность за содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sahil Wahi , Sahib Singh, 2020, Design and Analysis of Intake Manifold of Single Cylinder Engine, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) Volume 09, Issue 11 (November 2020). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18656209>
- Singhal, Arpit. (2016). Designing Validating a New Intake Manifold for a Formula SAE Car. International Journal of Engineering Research and. V5. DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTV5IS070418>
- Ruqaiyah, Syafiqah & Abidin, Shaiful & Ishak, Izuan & Khalid, Amir & Mustaffa, Norrizal & Taib, Ishkrizat & Sukiman, Safra & Darlis, Nofrizalidris. (2023). Flow Analysis of Intake Manifold Using Computational Fluid Dynamics. International Journal of Integrated Engineering. 15. DOI: <https://doi.org/10.30880/ijie.2023.15.01.008>
- Patil D.K., Puneeth H.V. Design and Optimization of Intake Manifold in Automotive // IJSRSET. — (january 2016). Puneeth H V, Divyesh K Patil "Design and Optimization of Intake Manifold in Automotive" International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET), Print ISSN : 2395-1990, Online ISSN : 2394-4099, Volume 9, Issue 1, pp.207-212, March-April-2021. URL: <https://ijsrset.com/IJSRSET219133>
- ChatGPT. (2026, March 31). Помощь в написании и редактировании текста научной работы [Большая языковая модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com/>

МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ

УДК 621.8

А.Р. Калиекберова¹, З.Ю.Иванов^{1*}

¹ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Иванов Захар Юрьевич, e-mail:zaharivanov2001@gmail.com

АННОТАЦИЯ: в статье рассмотрены современные методы машинного обучения, применяемые для оценки пространственной ориентации на основе данных MEMS-IMU. Показано, что традиционные алгоритмы фильтрации, несмотря на широкое распространение, обладают ограниченной адаптивностью в условиях нелинейных движений, переменных шумов, динамических ускорений и магнитных возмущений. Проведен обзор нейросетевых, гибридных и data-driven подходов, включая рекуррентные и сверточные нейронные сети, инкрементально обучаемые модели, физически информированные нейронные сети, а также комбинированные алгоритмы, объединяющие методы машинного обучения с фильтрами Калмана и комплементарной фильтрацией. Проанализированы особенности этих решений с точки зрения точности, устойчивости, способности к обобщению и применимости в системах реального времени. Показано, что методы машинного обучения являются перспективным направлением развития алгоритмов оценки ориентации, особенно в задачах автономной навигации, робототехники и интеллектуальных инерциальных систем.

Ключевые слова: машинное обучение, MEMS-IMU, пространственная ориентация, оценка ориентации, нейронные сети, data-driven подход, LSTM, сверточные нейронные сети, гибридные алгоритмы, инерциальная навигация.

ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектромеханические инерциальные сенсоры (MEMS-IMU) широко применяются в современных робототехнических и навигационных системах в качестве основных источников информации о движении и ориентации объекта [1–4]. Интеграция акселерометров и гироскопов в составе инерциального измерительного модуля (IMU) позволяет осуществлять непрерывную оценку линейных ускорений и угловых скоростей, что делает возможным автономное определение параметров движения без использования внешних ориентиров. Благодаря малым габаритам, низкой стоимости и энергопотреблению MEMS-IMU нашли применение в мобильных роботах, беспилотных летательных аппаратах, носимых устройствах и системах дополненной реальности [5].

Несмотря на широкое распространение, использование MEMS-IMU сопровождается рядом существенных ограничений. К ним относятся шумы измерений, дрейф гироскопов, нестабильность параметров сенсоров, а также чувствительность к внешним ускорениям и магнитным возмущениям. Эти факторы приводят к накоплению ошибок при интегрировании сигналов и, как следствие, к снижению точности оценки пространственной ориентации. В условиях динамических движений и нелинейных воздействий данные проблемы проявляются особенно ярко, что ограничивает применение классических алгоритмов обработки инерциальной информации.

Традиционные методы оценки ориентации, основанные на использовании фильтров (комплементарных, Калмана и их модификаций), требуют построения математической модели движения и задания параметров шума, которые в реальных

условиях часто являются неизвестными или изменяющимися во времени. Кроме того, такие методы имеют ограниченные возможности по учету сложных нелинейностей и трудноформализуемых факторов, влияющих на сигналы датчиков. Это приводит к снижению точности и устойчивости алгоритмов при работе в условиях неопределенности.

В последние годы наблюдается активное развитие подходов, основанных на методах машинного обучения, которые позволяют отказаться от строгого задания аналитических моделей и использовать накопленные экспериментальные данные для построения алгоритмов оценки ориентации. Нейронные сети различных архитектур способны выявлять скрытые зависимости в данных инерциальных сенсоров, учитывать временные и нелинейные эффекты, а также адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. Особенно перспективными являются рекуррентные нейронные сети (LSTM), сверточные и временные сети, а также физически информированные модели, объединяющие принципы машинного обучения и классической механики.

Наряду с полностью data-driven подходами активно развиваются гибридные методы, сочетающие традиционные алгоритмы фильтрации и обучаемые компоненты. В таких системах методы машинного обучения используются для компенсации ошибок, адаптации параметров фильтров и повышения устойчивости оценки ориентации в сложных условиях. Это позволяет объединить интерпретируемость классических моделей с гибкостью и адаптивностью нейросетевых решений.

Все это делает применение методов машинного обучения в задачах оценки пространственной ориентации на основе MEMS-IMU актуальным направлением исследований, направленным на повышение точности, устойчивости и адаптивности инерциальных навигационных систем. В данной работе представлен обзор современных нейросетевых и гибридных подходов, используемых для решения этой задачи, а также проведен анализ их преимуществ, ограничений и областей применения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нейронная сеть выполняет вспомогательные функции в решениях, основанных на применении традиционных методов фильтрации. Например, описывается применение рекурсивной нейронной сети для выбора применяемого в текущей ситуации фильтра из ограниченного набора уже настроенных фильтров Калмана [1]. Другое апробированное решение – это использование нейронных сетей в качестве адаптируемых фильтров для предварительной обработки данных, поступающих на вход Калмановского фильтра, а также для сглаживания выходных данных [2, 3]. Сходным образом сверточная нейронная сеть была использована для коррекции ошибок интегрирования данных гироскопа [4].

[5] предложен метод обучения для шумоподавления гироскопов инерциальных измерительных блоков (IMU) с использованием наземных данных и оценки ориентации (положения) робота в режиме реального времени. Предлагаемый подход основан на нейронной сети, основанной на расширенных извилинах, не требуя какой-либо рекуррентной нейронной сети. Мы демонстрируем, насколько эффективна наша стратегия для 3D-оценки ориентации на наборах данных EuRoC и TUM-VI. Интересно, что наш алгоритм счисления умудряется превосходить ведущие системы визуально-инерциальной одометрии с точки зрения оценки ориентации, хотя он не использует зрительные датчики.

[6] представлена нейронная сеть с учетом физики (TE-PINN), разработанная для точной оценки ориентации на основе кватернионов в высокодинамичных средах. Интегрируя трансформаторные сети с обучением, основанным на физике,

предлагаемый подход позволяет инновационно фиксировать временные зависимости в данных датчиков, обеспечивая при этом соблюдение фундаментальных физических законов, управляющих вращательным движением. TE-PINN использует механизм многоголового внимания для обработки последовательных данных от инерциальных датчиков, таких как акселерометры и гироскопы, обеспечивая временную согласованность. В то же время модель встраивает кинематику кватернионов и динамику твердого тела в процесс обучения, согласовывая предсказания сети с механическими принципами, такими как законы движения Эйлера. Функция потерь, основанная на физике, включает в себя динамику угловой скорости и внешних сил, повышая способность сети к обобщению в сложных сценариях. Экспериментальная оценка показывает, что TE-PINN неизменно превосходит традиционные методы, такие как расширенные фильтры Калмана (EKF) и оценки на основе LSTM, особенно в сценариях, характеризующихся высокими угловыми скоростями и зашумленными данными датчиков. Результаты показывают значительное снижение средней ошибки кватерниона и улучшенную оценку смещения гироскопа по сравнению с современным уровнем техники.

В работе [7] предложен подход к оценке ориентации, основанный на инкрементальном обучении нейросетей типа LSTM (Long Short-Term Memory), применяемом к задаче слияния данных с инерциальных датчиков (акселерометра, гироскопа и магнитометра). Основной целью исследования является повышение точности и устойчивости оценки ориентации в реальных динамических условиях. Авторы подчеркивают ограничения традиционных методов — таких как расширенный фильтр Калмана (EKF) и оффлайн-обученные нейросетевые модели — в условиях изменяющейся траектории движения и шума, присущего MEMS-сенсорам. Для решения этих проблем предлагается система, в которой модель LSTM обучается инкрементально, используя потоковые данные в реальном времени без необходимости полного переобучения. Предложенный метод тестировался на реальных измерениях с использованием коммерческого AHRS-устройства, и его производительность оценивалась по сравнению с EKF и стандартной LSTM. Результаты экспериментов продемонстрировали, что инкрементальное обучение позволяет модели эффективно адаптироваться к новым движениям, обеспечивая устойчивую и точную оценку ориентации. Инкрементальное обучение нейросети LSTM представляет собой перспективный и обоснованный подход для оценки пространственной ориентации объектов с использованием MEMS-инерциальных сенсоров, превосходящий по адаптивности и устойчивости традиционные фильтрационные методы и оффлайн-обученные модели. Предложенный алгоритм демонстрирует высокую эффективность в условиях реального времени, корректно адаптируясь к изменяющимся движениям и снижая зависимость от предварительного калибровочного этапа. Его применение особенно оправдано в системах автономной навигации, где присутствуют неопределённости в траектории и воздействии внешних факторов.

В исследовании [8] рассмотрена проблема снижения точности систем ориентации и определения курса (AHRS) при использовании недорогих MEMS-IMU, подверженных шумам, динамическим ускорениям и магнитным возмущениям. Для её решения предложена новая модель калибровки IMU, основанная на данных, в которой применяются временные свёрточные сети (TCN) для моделирования случайных ошибок и возмущений, что позволяет формировать менее зашумленные данные датчиков. Объединение сенсорной информации выполняется с использованием версии расширенного дополнительного фильтра (ECF) с разомкнутым контуром и без развязки, обеспечивающего повышенную точность и надёжность оценки ориентации. Эффективность разработанного подхода подтверждена экспериментально на трёх общедоступных наборах данных — TUM VI, EuRoC MAV и OxiOD, охватывающих

различные типы IMU, аппаратные платформы, режимы движения и условия окружающей среды. Результаты показали, что предложенная модель превосходит современные методы обработки исходных данных и традиционный дополнительный фильтр более чем на 23,4 % по абсолютной ошибке ориентации и 23,9 % по ошибке рысканья, демонстрируя высокую устойчивость при применении на разных устройствах и сценариях движения.

В данной работе [9] предложен новый алгоритм оценки ориентации, основанный на модели слияния фильтра Калмана (EKF) и long short-term memory (LSTM), который состоит из двух основных процессов: первоначальной оценки ориентации EKF и последующей калибровки LSTM. В этом алгоритме EKF оценивает углы ориентации цели по входным данным датчиков от IMU, затем LSTM выполняет калибровку оцененных углов каждой оси, которая взвешивается с результатом KEF для экспорта окончательной оптимальной оценки. Результат имитационного эксперимента показывает, что данный алгоритм в среднем на 50,515% ниже, чем EKF при различных условиях работы при использовании среднеквадратичной ошибки (MSE) в качестве показателя оценки, что позволяет сделать вывод, что этот новый алгоритм работает лучше, чем EKF, и предоставляет новый способ оценки ориентации.

В статье [10] предлагается новая система визуально-инерциальной навигации, предназначенная для камер с строчной разверткой (rolling-shutter). Основное внимание уделено разработке фильтра на основе расширенного информационного фильтра (EIF), учитывающего динамическую модель движения, а также характерную особенность rolling-shutter — асинхронность захвата изображения по строкам. Методика предполагает совместную оптимизацию параметров положения и ориентации с использованием как инерциальных данных, так и последовательностей изображений. Подчеркивается, что традиционные подходы визуально-инерциальной одометрии, разработанные для глобального затвора (global shutter), не могут быть напрямую адаптированы к rolling-shutter без значительной потери точности. Для подтверждения эффективности системы проведена серия экспериментов с использованием платформы на базе микро-АПЛ с одновременной записью изображений и данных ИНС. Предложенный метод демонстрирует значительное улучшение точности оценки состояния в системах визуально-инерциальной навигации, использующих камеры с строчной разверткой, благодаря учету временной неоднородности захвата изображений. Разработанный фильтр успешно интегрирует инерциальные и визуальные данные с учетом модели rolling-shutter, обеспечивая высокую точность локализации и ориентации в реальном времени. Работа представляет собой значительный вклад в развитие навигационных систем для мобильных платформ с недорогими камерами, типичными для робототехнических и потребительских приложений.

В данной работе [11] представлен метод, который основан на данных с использованием сверточной нейронной сети в режиме реального времени с алгоритмом сглаживания для оценки угла установки мобильного устройства, который оснащен IMU и зафиксирован в автомобиле. В качестве входных данных использовались данные акселерометра и гироскопа, собранные с IMU, в отличие от традиционных методов, которые используют данные от глобальных навигационных спутниковых систем. Данные IMU собираются для обучения и проверки с помощью датчика. Обученная модель тестируется на данных с реальными вращениями. Модель продемонстрировала способность точно оценивать установки с точностью до 8° в течение 5 с после начала движения и 4° в течение 27 с и адаптироваться к изменениям в процессе поездки. Предложенный подход имеет способность к генерализации между разными устройствами и условиями, быструю сходимость, устойчивость к шуму.

В исследовании [12] разработана адаптивная нейро-нечёткая система вывода,

основанная на методах машинного обучения (ML-based ANFIS), предназначенная для повышения точности работы низкосортных инерциальных измерительных устройств (IMU). Предлагаемый подход реализуется в два этапа. На первом этапе с использованием данных, полученных от высокоточных IMU, выполняется обучение модели ошибок на основе 50 % измерений низкосортных датчиков. На втором этапе проводится тестирование обученной модели на оставшихся данных для проверки её способности корректировать ошибки и повышать точность инерциальной навигационной системы (INS). Оценка эффективности алгоритма осуществлялась на реальной дорожной траектории, что подтвердило его способность значительно снижать погрешности измерений и улучшать качество навигационного решения по сравнению с традиционными методами.

Комплементарные фильтры [13-15] остаются популярным решением благодаря своей простоте и невысоким вычислительным затратам. Они хорошо подходят для маломощных устройств, обеспечивая базовую точность при умеренных динамических нагрузках. Однако в условиях резких движений и значительных шумов комплементарные фильтры демонстрируют недостаточную устойчивость и точность, поскольку не адаптируются к изменяющимся характеристикам сенсоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, данный обзор показывает, что традиционные алгоритмы фильтрации, связанные с необходимостью точного задания математической модели движения, сложностью учета нелинейностей, а также изменчивостью шумовых характеристик сенсоров, стимулируют переход к data-driven подходам, способным адаптироваться к реальным условиям эксплуатации.

Рассмотренные нейросетевые методы демонстрируют высокую эффективность при работе с зашумленными и нелинейными сигналами инерциальных датчиков. В свою очередь использование рекуррентных архитектур, таких как LSTM, позволяет учитывать временные зависимости и историю движения объекта, что особенно важно при обработке последовательных измерений.

Сверточные и временные нейронные сети обеспечивают эффективную фильтрацию сигналов и выделение скрытых закономерностей в данных, а физически информированные модели (например, PINN) позволяют объединять преимущества машинного обучения и классической механики, обеспечивая более корректные и интерпретируемые результаты.

Особый интерес представляют гибридные подходы, в которых методы машинного обучения интегрируются с традиционными алгоритмами фильтрации, такими как фильтр Калмана. В подобных системах классические методы выполняют базовую оценку состояния, а нейронные сети используются для компенсации ошибок, адаптации параметров или повышения устойчивости к внешним возмущениям. Проведённые исследования показывают, что такие комбинированные алгоритмы способны существенно снизить погрешность оценки ориентации по сравнению с использованием только классических методов.

В то же время, несмотря на значительные преимущества, методы машинного обучения обладают рядом ограничений. К ним относятся зависимость от качества и объема обучающих данных, сложность интерпретации результатов, а также необходимость значительных вычислительных ресурсов, что может ограничивать их применение во встроенных системах реального времени. Кроме того, нейросетевые модели могут демонстрировать нестабильность при работе вне диапазона обучающих выборок, что требует дополнительного контроля и адаптации.

Анализ современных исследований показывает, что наиболее эффективным направлением развития является создание адаптивных и гибридных алгоритмов, сочетающих физические модели движения и обучаемые компоненты. Такой подход

позволяет одновременно учитывать априорные знания о системе и использовать возможности машинного обучения для обработки сложных и трудноформализуемых факторов. Особое значение приобретают методы, способные работать в режиме реального времени, адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать устойчивую оценку ориентации при наличии шумов и возмущений.

В дальнейшем развитие алгоритмов оценки пространственной ориентации на основе MEMS-IMU будет связано с совершенствованием нейросетевых архитектур, снижением их вычислительной сложности, разработкой методов онлайн-обучения и адаптации, а также более глубокой интеграцией с классическими подходами фильтрации. Это позволит повысить точность и надежность инерциальных навигационных систем, что особенно важно для мобильной робототехники, автономных транспортных средств, беспилотных летательных аппаратов и других интеллектуальных технических систем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы научных статей использовали инструменты искусственного интеллекта (ИИ) на различных этапах подготовки своей работы, включая помощь в написании текста, редактировании, проверке фактов, а также анализе данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Leutenegger, S., Lynen, S., Bosse, M., Siegwart, R., & Furgale, P. (2015). Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization. *The International Journal of Robotics Research*, 34(3), 314–334. <https://doi.org/10.1177/0278364914554813>
- Zimmermann, T., Taetz, B., & Bleser, G. (2018). IMU-to-segment assignment and orientation alignment for the lower body using deep learning. *Sensors*, 18(1), 302. <https://doi.org/10.3390/s18010302>
- Chen, C., Lu, X., Wahlström, J., Markham, A., & Trigoni, N. (2019). Deep neural network based inertial odometry using low-cost inertial measurement units. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 20(4), 1351–1364. <https://doi.org/10.1109/TMC.2019.2903180>
- Chiang, K.-W., Chang, H.-W., Li, C.-Y., & Huang, Y.-W. (2009). An artificial neural network embedded position and orientation determination algorithm for low-cost MEMS INS/GPS integrated sensors. *Sensors*, 9(4), 2586–2610. <https://doi.org/10.3390/s90402586>
- Brossard, M., Bonnabel, S., & Barrau, A. (2020). Denoising IMU gyroscopes with deep learning for open-loop attitude estimation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 5319–5326. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3004978>
- Golroudbari, A. A. (2024). TE-PINN: Quaternion-based orientation estimation using transformer-enhanced physics-informed neural networks. *arXiv preprint, arXiv:2409.16214*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.16214>
- Narkhede, P., Walambe, R., Poddar, S., & Kotech, K. (2021). Incremental learning of LSTM framework for sensor fusion in attitude estimation. *PeerJ Computer Science*, 7, e662. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.662>
- Bo, F., Li, J., Wang, W., & Zhou, K. (2023). Robust attitude and heading estimation under dynamic motion and magnetic disturbance. *Micromachines*, 14(5), 1070. <https://doi.org/10.3390/mi14051070>
- Zhuo, Y., Sun, F., Wen, Z., Wu, H., & Huang, H. (2021). A novel attitude estimation algorithm based on EKF-LSTM fusion model. In *Cognitive Systems and Signal Processing (ICCSIP 2020)* (pp. 94–104). *Communications in Computer and Information Science* (Vol. 1397). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6679-1_10
- Shu, X., & Mourikis, A. I. (2013). Vision-aided inertial navigation with rolling-shutter cameras. *The International Journal of Robotics Research*, 33(7), 1004–1026.

<https://doi.org/10.1177/0278364913501560>

Freydin, M., Segol, N., Sfaradi, N., Eweida, A., & Or, B. (2022). Deep learning for inertial sensor alignment. arXiv preprint, arXiv:2212.11120. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.11120>

Mahdi, A. E., Azouz, A., Abdalla, A. E., & Abosekeen, A. (2022). A machine learning approach for an improved inertial navigation system solution. *Sensors*, 22(4), 1687. <https://doi.org/10.3390/s22041687>

Narkhede, P., Poddar, S., Walambe, R., Ghinea, G., & Kotecha, K. (2021). Cascaded complementary filter architecture for sensor fusion in attitude estimation. *Sensors*, 21(6), 1937. <https://doi.org/10.3390/s21061937>

Al-Sharman, M. K., Zweiri, Y., Jaradat, M. A. K., Al-Husari, R., Gan, D., & Seneviratne, L. D. (2019). Fuzzy adaptive complementary filter for attitude estimation based on inertial/magnetic sensors. *Measurement*, 146, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.051>

De Silva, O., Mann, G. K., & Gosine, R. G. (2018). The right invariant nonlinear complementary filter for low cost attitude and heading estimation of platforms. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 140(1), 011011. <https://doi.org/10.1115/1.4039512>

GPT-4o. (2026, April 2). OpenAI ChatGPT. <https://openai.com>

ҚАЗАҚСТАНДА КӨЛІК САЛАСЫНДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТТІ ҚОЛДАНУ

ӘОЖ 656.1:004.8

А.Б.Кенжегулов¹, А.Адалбек¹, Д.М.Мырзабекова^{1*}

¹«Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті», Өскемен, Қазақстан

*Автор-корреспондент: Мырзабекова Динара Мырзабекқызы,
e-mail: MDinara0812@mail.ru

АНДАТПА. Мақалада жасанды интеллект (ЖИ) технологияларын Қазақстан Республикасының көлік саласына енгізу талданады. Зерттеудің мақсаты – мемлекеттік бағдарламалар мен іске асырылып жатқан жобаларды зерделеу негізінде көлікте ЖИ қолданудың негізгі бағыттарын, проблемалары мен перспективаларын анықтау болып табылады. Әдіснамалық негізді нормативтік-құқықтық құжаттарды талдау, ашық дереккөздерге контент-талдау және салыстырмалы әдіс құрады. Зерттеу нәтижесінде негізгі бастамалар жүйеленді: Smart Cargo платформасы, автокөлік ағындарын басқару жүйелері, бұзушылықтарды автоматты тіркеу, жолдарды диагностикалау (KazRoad VR, жылжымалы зертханалар), теміржолдың KinetiX жүйесі, пилоттық жүргізушісіз такси жобалары. Жүйелік проблемалар анықталды: ведомстволық жүйелердің техникалық алшақтығы, инфрақұрылымның жеткіліксіз дамуы, нормативтік базаның жетілмегендігі және кадр тапшылығы. Ғылыми жаңалық – ағымдағы жай-күйді кешенді талдау және анықталған кедергілерді еңсеру бойынша ұсынымдар әзірлеу. Қорытындыда әртүрлі шешімдерді біріктіретін ашық интерфейстері бар бірыңғай платформа құру және жаңа бейіндегі мамандарды даярлау қажеттілігі негізделеді.

ТҮЙІНДІ СӨЗДЕР: жасанды интеллект, Қазақстан көлігі, цифрландыру, интеллектуалды көлік жүйелері, жол қозғалысы қауіпсіздігі, автономды автомобильдер, ұшқышсыз көліктер, Smart Cargo, деректерді талдау.

КІРІСПЕ

Қазақстанның көлік саласы ұлттық экономика үшін жүйе құраушы болып табылады, елдің транзиттік әлеуетін іске асыруды және аумақтық байланысты қамтамасыз етеді. Жаһандық транзиттік жүк ағындары үшін бәсекелестік жағдайында және тасымалдау қауіпсіздігін арттыру қажеттілігіне байланысты жасанды интеллект (ЖИ) саланы трансформациялаудың негізгі құралына айналууда (ҚазАқпарат, 2025; Официальный сайт Премьер-министра Республики Казахстан, 2025). Қазақстан Президенті Қ.К. Тоқаев 2025 жылғы Жолдауында көлікті цифрландыру мен ЖИ енгізудің маңыздылығын атап өтіп, 2026 жылдың соңына дейін автокөлік ағындарын басқарудың цифрлық платформасын іске қосуды тапсырды (Официальный сайт Премьер-министра Республики Казахстан, 2026).

Дегенмен, қолданылып жатқан шараларға қарамастан, көлік саласында жасанды интеллектті енгізу ескірген инфрақұрылымнан бастап білікті кадрлардың тапшылығына дейінгі бірқатар маңызды қиындықтарға тап болуда. Ғылыми әдебиеттерде Қазақстанның көлік саласында ЖИ қолдану мәселелері үзінді түрде баяндалған; жарияланымдардың көпшілігі жекелеген техникалық шешімдерге [МИР 24, 2025; Silk Way TV, 2025) немесе цифрландырудың жалпы мәселелеріне (Zhanbayeva L., et al., 2025) арналған. Жүйелік проблемалар мен даму перспективаларын анықтайтын кешенді талдау әлі де жеткіліксіз.

Зерттеудің мақсаты – Қазақстанда көлік саласында жасанды интеллектті енгізудің ағымдағы жай-күйіне талдау жүргізу, негізгі проблемаларды анықтау және

дамудың перспективалық бағыттарын айқындау. Мақсатқа жету үшін мынадай міндеттер қойылды:

- мемлекеттік бастамалар мен стратегиялық құжаттарды зерделеу;
- іске асырылып жатқан жобаларды бағыттар бойынша жүйелеу;
- техникалық, нормативтік-құқықтық және инфрақұрылымдық кедергілерді анықтау;
- ЖИ енгізудің тиімділігін арттыру бойынша ұсынымдар әзірлеу.

Зерттеу нысаны – Қазақстанның көлік жүйесі, зерттеу пәні – жасанды интеллект технологияларын енгізу және пайдалану процестері. Зерттеудің гипотезасы – қолданыстағы шешімдердің фрагменттілігі, ведомстволар арасындағы үйлестірудің жеткіліксіздігі және бірыңғай деректер архитектурасының болмауы саланың цифрлық трансформациясын тежейтін негізгі факторлар болып табылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу ашық көздерді талдау негізінде орындалды: мемлекеттік органдардың (ҚР Премьер-Министрі, Көлік министрлігі, Цифрлық даму министрлігі), ақпараттық агенттіктердің (ҚазАқпарат, inform.kz), салалық басылымдардың (Kursiv Media, Kapital.kz) деректері, сондай-ақ Scopus, Web of Science және RSCI дерекқорларында индекстелген ғылыми мақалалар пайдаланылды.

Әдістемелік негізді келесі әдістер құрады:

- жүйелі талдау – мемлекеттік бағдарламалар мен стратегиялық құжаттарды зерделеу үшін;
- контент-талдау – іске асырылып жатқан жобаларды анықтау және жүйелеу үшін;
- салыстырмалы әдіс – қазақстандық тәжірибені халықаралық тәсілдермен салыстыру үшін;
- жалпылау және жіктеу – анықталған проблемаларды түрлері бойынша топтастыру үшін.

Зерттеу 2024–2026 жылдар аралығын қамтиды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу барысында Қазақстанда көлік саласында жасанды интеллектті енгізудің негізгі бағыттары талданды. Нәтижелер бес негізгі топ бойынша жүйеленген.

1. Мемлекеттік бастамалар мен стратегиялық жобалар

Ең маңызды жоба – 27 теміржол және автомобиль көлігі қызметтерін, кедендік және логистикалық қызметтерді біріктіретін бірыңғай Smart Cargo цифрлық платформасын құру (ҚазАқпарат, 2025). Платформада жасанды интеллект көмекшілері (виртуалды кеңесшілер, құжаттарды автоматты толтыру, тасымалдау құнын есептеу) қарастырылған. Интеграцияның сәттілігі ведомстволардың деректер алмасуға дайындығына байланысты. 2026 жылдың ақпанында Президент автокөлік ағындарын басқарудың цифрлық платформасын іске қосуды тапсырды, бұл орталықтандырылған басқаруға көшудің маңыздылығын көрсетеді (Официальный сайт Премьер-министра Республики Казахстан, 2026).

2. Жол қауіпсіздігі

ЖИ қолданудың ең жетілген саласы – қауіпсіздік. республикада автоматты камералар желісі кеңейтілуде, олардың саны 25 мыңға жетті. Патрульдік автокөліктерге радарлар орнатылуда, «жасырын» патрульдеу әдісі қолданылуда. Сонымен қатар, Көлік министрлігімен бірлесіп республикалық маңызы бар жолдарда орташа жылдамдықтың сақталуына автоматты бақылау енгізу жөнінде іс-шаралар жүзеге асырылуда.

Орташа жылдамдықты бақылау шараларымен жалпы ұзындығы 1,9 мың шақырымға жуық 8 автожол қамтылған, ол жерлерде ЖКО-да қаза тапқандар саны 11%-ға азайып отыр. Жалпы ұзындығы 1 мың шақырымнан асатын тағы 10 учаскеде орташа жылдамдықты бақылау тетігін енгізу жоспарлануда.

Қасақана құқық бұзатындармен күресу үшін барлық цифрлық шешімдер мен камералар «ТОР» платформасына біріктірілген, олар кешенді түрде келесідей жұмыстарды атқарады:

- көлік қозғалысын қадағалайды;
- іздеуде жүрген автокөлікті анықтайды (маркасы, моделі және түсі бойынша);
- ережені өрескел бұзып айдайтын «қауіпті жүргізушілерді» іздейді;
- 8 сағаттан астам тоқтамай көлік айдаған «қалжыраған жүргізушілерді»

қадағалайды (Официальный сайт Премьер-министра Республики Казахстан, 2025).

3. Жол инфрақұрылымын диагностикалау

Қазір мамандар төрт камерамен және "ақылды" сенсорлармен жабдықталған мобильді зертхананың көмегімен асфальттың беріктігі мен тегістігін тексеруде. Сарапшылардың пікірінше, жаңа автоматтандырылған жүйе бақылау процесін едәуір жеңілдетті: егер бұрын әр 100 шақырым сайын деректерді өңдеу 4 күнді алса, енді бұл тек 3-4 сағатты алады. Жүйе 32 индикаторды (жарықтар, қозғалыс қарқындылығы, жолдың геометриясы) анықтайды. Кадрларды даярлауға арналған kazroad VR виртуалды тренажеры әзірленді (Silk Way TV., 2025), алайда ол әлі жаппай енгізілмеген.

4. Теміржол көлігі

Астана станциясында пилоттық режимде қозғалыстағы вагондарды диагностикалауға арналған KinetiX жүйесі іске қосылды (Умную систему диагностики вагонов KinetiX тестируют на станции Астана 04.01.2026). Жүйе вагондарды қозғалыста автоматты түрде сканерлейді және пойыздарды тоқтатпай ақауларды анықтайды. Ол үшін камералар, 3D сканерлеу технологиялары, инфрақызыл, акустикалық және діріл датчиктері және жасанды интеллект алгоритмдері қолданылады. Кешен арбаларды, тежегіш жабдықтарын, доңғалақ жұптарын, осьтік мойынтіректерді және автотіркегіштерді басқаруға арналған бірнеше ішкі жүйелерді қамтиды. Барлық анықталған ақаулар автоматты түрде мамандардың жұмыс орындарына жіберіледі, бұл жедел әрекет етуге және жөндеуді тиімді жоспарлауға мүмкіндік береді. KinetiX-ті енгізу қызметкерлерге жүктемені азайтады, вагондарды тексеру уақытын қысқартады және теміржолдың өткізу қабілетін арттырады. Алдағы уақытта жүйені еліміздің тағы алты өңірінде орнату және ҚТЖ-ның басқа цифрлық платформаларымен интеграциялау жоспарлануда.

5. Өздігінен жүретін көліктер

Министрліктің мәліметінше, Қазақстанда пилотсыз таксилерді іске қосу жобасы үш жылға есептелген және кезең-кезеңімен іске асырылатын болады. Бірінші кезең мамандандырылған полигондағы технологиялық шешімдерді пысықтауды, сондай-ақ маршрут пен инфрақұрылымның барлық параметрлерін дайындауды және тексеруді қамтиды.

Келесі кезеңдерде тұрақты бақылаумен және мониторингпен алдын ала келісілген маршруттар бойынша Астана мен Алматының қалалық жағдайларында пилотсыз автомобильдерді кезең-кезеңімен енгізу жоспарлануда. (ҚазАқпарат, 2026; Qazinform, 2026; Kapital.kz., 2026). Пилотсыз таксилердің автономия деңгейі ISO / SAE pas 22736 халықаралық классификациясына сәйкес анықталады. Жобаның мақсатты форматы-бұл алдын-ала белгіленген жұмыс жағдайлары шегінде салонда жүргізушісіз жоғары автоматтандыруды қамтамасыз ететін L4 деңгейі. Бұл ретте L3 өтпелі режимі де қарастырылған, бұл ретте салонда қажет болған жағдайда басқаруды қабылдауға

дайын жүргізуші болады. Инфрақұрылымды дайындау (таңбалау, белгілер, отырғызу аймақтары) 2026 жылдың бірінші тоқсанына жоспарланған.

Нәтижелерді талқылау

Жүргізілген талдау шешімдердің фрагменттілігі туралы гипотезаны растайды. Әрбір жоба жеке ведомство немесе компания шеңберінде жүзеге асырылады, бірыңғай архитектура мен деректер алмасу стандарттары жоқ. Премьер-Министр О. Бектенов ашық интерфейстері бар модульдік, масштабталатын көлік дерекқорының архитектурасына көшуді тапсырды (Almaty.tv., 2025), бұл ЖИ шешімдерін біріктірудің негізгі шарты болып табылады.

Анықталған мәселелерді келесідей жіктеуге болады:

- *Техникалық*: ақпараттық жүйелердің бытыраңқылығы, бірыңғай хаттамалардың болмауы, модельдерді оқыту үшін сапалы деректердің тапшылығы.

- *Инфрақұрылымдық*: жол желісінің жоғары тозуы (20 жастан асқан автомобильдердің 50%-дан астамы (Официальный сайт Премьер-министра Республики Казахстан., 2025)), трассаларда сенсорлардың болмауы, интернеттің нашар қамтылуы.

- *Нормативтік-құқықтық*: ЖИ қателіктері үшін жауапкершіліктің белгісіздігі, пилотсыз көлік үшін реттеудің болмауы, дербес деректерді қорғау мәселелері.

- *Кадрлық*: көлік саласы мен IT білімін біріктіретін мамандардың жетіспеушілігі, ескірген білім беру бағдарламалары.

Халықаралық тәжірибемен салыстыру (Smailov N., et al., 2025; Zhanbayeva L., et al., 2025; Marzoug R., et al. 2025) Қазақстанның бастапқы кезеңде тұрғанын, бірақ жүйелі көзқарас жағдайында жеделдетілген даму үшін әлеуеті бар екенін көрсетеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижесінде Қазақстанда көлік саласында жасанды интеллектті енгізудің кешенді талдауы жасалды. Ең белсенді даму қауіпсіздік пен инфрақұрылым диагностикасы салаларында байқалады; мұнда өлшенетін нәтижелер (орташа жылдамдықты бақылау учаскелерінде өлім-жітімнің 11%-ға төмендеуі) алынған. Логистика (Smart Cargo) және пилотсыз көлік саласындағы жобалар бастапқы сатыда және одан әрі пысықтауды қажет етеді.

Саладағы негізгі кедергілер – ведомстволық жүйелердің үйлесімсіздігі, бірыңғай деректер архитектурасының болмауы, нормативтік-құқықтық базаның жетілмегендігі және білікті кадрлардың тапшылығы. Осыны еңсеру үшін:

- ашық интерфейстері бар бірыңғай деректер платформасын құру;
- ЖИ шешімдерін масштабтау үшін ведомствоаралық үйлестіруді күшейту;
- пилотсыз көлік пен дербес деректерді қорғау саласындағы нормативтік базаны жетілдіру;
- көлік саласындағы IT-мамандарды даярлаудың пәнаралық бағдарламаларын әзірлеу ұсынылады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: зерттеу сыртқы қаржылық қолдаусыз жүзеге асырылды.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ

ХАБАРЛАМА: осы мақаланы дайындау кезінде мәтінді өңдеу және стилистиканы жақсарту үшін ChatGPT (OpenAI) үлкен тілдік моделі пайдаланылды. Модель ғылыми нәтижелер немесе тұжырымдар жасау үшін қолданылмаған. ChatGPT (2026, 28 ақпан).

Ғылыми мақаланы редакциялау [үлкен тілдік модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com/>.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Послание Президента: в Казахстане объединят 27 сервисов ЖД и автотранспорта // ҚазАқпарат. – 2025. – 9 қыркүйек. – URL: <https://www.inform.kz/ru/poslanie-prezidenta-v-kazahstane-obedinyat-27-servisov-zhd-i-avtotransporta-1d74b1>
- Цифровая платформа управления автопотоками в Казахстане должна заработать до конца года // Официальный сайт Премьер-министра Республики Казахстан. – 2026. – 13 ақпан. – URL: <https://primeminister.kz/ru/news/cifrovaya-platforma-upravleniya-avtopotokami-v-kazahstane-dolzna-zarabotat-do-konca-goda-19321>
- Kazakhstan intends to apply AI technologies to ensure road safety // Официальный сайт Премьер-министра Республики Казахстан. – 2025. – 9 қыркүйек. – URL: <https://primeminister.kz/en/news/kazakhstan-intends-to-apply-ai-technologies-to-ensure-road-safety-19278>
- «КазТрафик-2025». Нейросеть в мусоровозе и другие технологии в современном транспорте // МИР 24. – 2025. – 20 қараша. – URL: <https://mir24.tv/news/16596943>
- Дефекты на дорогах в Казахстане выявляют с помощью ИИ // Silk Way TV. – 2025. – 1 желтоқсан. – URL: https://silkwaytv.kz/ru/v-kazahstane-sostoyanie-dorog-budet-ocenivat-ii_60646
- Умную систему диагностики вагонов KinetiX тестируют на станции Астана 04.01.2026. – URL: <https://rail-news.kz/ru/infrastructure/22652-umnuiu-sistemu-dagnostiki-vagonov-kinetix-testiruiut-na-stancii-astana.html/>
- Беспилотные такси будут тестировать в Астане и Алматы // ҚазАқпарат. – 2026. – 27 қаңтар. – URL: <https://www.inform.kz/ru/bespilotnie-taksi-budut-testirovat-v-astane-i-almati-3fd86a>
- Driverless future: Robotaxis to be tested on Astana and Almaty streets // Qazinform. – 2026. – 27 January. – URL: <https://qazinform.com/news/driverless-future-robotaxis-to-be-tested-on-astana-and-almaty-streets-ee936e>
- Премьер-министр поручил внедрить искусственный интеллект для управления транспортными потоками // Almaty.tv. – 2025. – 9 желтоқсан. – URL: <https://almaty.tv/news/tehnologii/premer-ministr-poruchil-vnedrit-iskusstvennyy-intellekt-dlya-upravleniya-transportnymi-potokami>
- В Казахстане начнут тестировать беспилотные автомобили // Kapital.kz. – 2026. – 16 ақпан. – URL: <https://kapital.kz/tehnology/145034/v-kazahstane-nachnut-testirovat-bespilotnye-avtomobili.html>
- Smailov N., Nussupov Y., Taissariyeva K. et al., (2025). Identification of dangerous situations in the road infrastructure using unmanned aerial vehicles // Technology Audit and Production Reserves. – 2025. – Vol. 1, No. 2(69). – P. 20–27. – DOI: 10.15587/2706-5448.2025.347074
- Zhanbayeva L., Musaev Z., Akhmetova P., Bazanova I., Bekmambet K. (2025) About an algorithm for traffic flow management based on artificial intelligence systems // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2025. – Т. 138, № 3. – С. 36–46. – DOI: 10.52167/1609-1817-2025-138-3-36-46
- Marzoug R., De Chazal P., Rezaeipour A. et al. (2025) The Role of AI in Smart Mobility: A Comprehensive Survey // Electronics. – 2025. – Vol. 14, No. 9. – P. 1801. – DOI: 10.3390/electronics14091801

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА НОВОГО УДАРНО-ВИХРЕВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

УДК 621.926

В.А. Ким¹, Г.А. Гурьянов^{1*}, А.В. Ликунов¹

¹ТОО «Научно-производственное объединение ИННОТЕХ», Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Гурьянов Георгий Александрович, e-mail: gguryanov@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Обоснована эффективность применения для тонкого измельчения свободного удара и высокоскоростных измельчителей ударного действия. Предлагается новая конструкция ударно-вихревого измельчителя с новой схемой организации работы, имеющая повышенную энергонапряженность процесса и размерную классификацию продукта измельчения. Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований процесса измельчения в новом ударно-вихревом измельчителе. Доказана его работоспособность, преимущества, повышенная эффективность, возможность практического использования и перспективность. Решена задача интенсификации процесса тонкого измельчения материалов на основе новых принципов организации работы измельчителя для повышения эффективности измельчения и удовлетворения потребности в особо тонкоизмельченных материалах. Получены новые знания об одном из возможных способов интенсификации и повышения эффективности процесса тонкого измельчения. Новая схема организации работы и конструкция ударно-вихревого измельчителя имеют широкие возможности для их дальнейшего развития и совершенствования и могут дать возможность получения ультратонкоизмельченных частиц материалов. Результаты работы являются основой для дальнейших исследований процессов тонкого и сверхтонкого измельчения материалов, создания новых видов измельчителей, отличающихся от аналогов высокой эффективностью и широкими технологическими возможностями, поиска новых возможностей для экономичного измельчения.

Ключевые слова: разрушение, измельчение, измельчитель, мельница, материал, эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы сверхтонкого измельчения являются важнейшей составляющей многих технологий, таких, как производство различных материалов, обогащение руд и других. Однако прежние методы получения материалов не удовлетворяют требованиям, предъявляемым промышленностью к их качественным характеристикам, в частности, к дисперсности.

Процесс получения конечного продукта в большом числе случаев включает измельчение исходного материала до мелкодисперсного состояния. Однако в процессе тонкого измельчения наступает момент, когда с увеличением дисперсности частиц их измельчение сначала затрудняется, а затем вообще останавливается. При этом существующие измельчители зачастую не позволяют достигнуть даже этого предела измельчения. Это требует совершенствования и создания новых конструкций измельчителей.

При разрушении материалов в измельчительном оборудовании наиболее распространены механические способы воздействия.

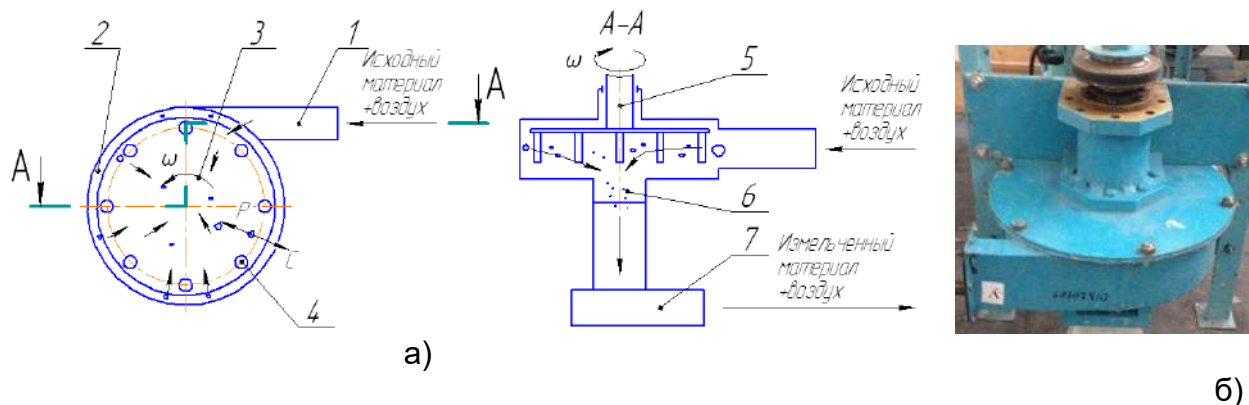
В ТОО «НПО ИННОТЕХ» были проведены теоретические и экспериментальные

исследования, результаты которых доказывают, что разрушение частиц ударом имеет большую эффективность в сравнении с другими способами разрушения. При этом разработка нового измельчительного оборудования должна базироваться на новых подходах к организации измельчения, позволяющих получить наиболее эффективное измельчающее воздействие на частицы материала.

Таким образом, целью работы является решение проблемы повышения эффективности тонкого и сверхтонкого измельчения на основе разработки и исследования нового измельчителя с повышенной энергонапряженностью, использующего воздействие на частицы высокоскоростным ударом на основе новых более эффективных подходов к организации процесса измельчения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Новые рациональные подходы к совершенствованию измельчительного оборудования позволили разработать новую схему организации работы измельчителя ударного действия с повышенной энергонапряженностью на основе типового дисмембратора. Для этого на основе запатентованного способа тонкого измельчения была изменена схема работы дисмембратора. Полученный новый ударно-вихревой измельчитель (рисунок 1) базируется на объединении в одном агрегате принципов работы дисмембратора и струйной вихревой мельницы, и реализует новый способ тонкого измельчения, при котором материал в зону измельчения подают в потоке воздуха под избыточным давлением встречно к направлению центробежных сил инерции вращающегося ротора и центробежного давления воздуха. В зоне столкновения потоков частицы материала испытывают высокоэнергетические механические воздействия и интенсивно измельчаются. Измельченные частицы готового продукта выводятся из измельчителя также внешним потоком воздуха. В результате повышается энергонапряженность процесса измельчения, увеличивается длительность пребывания частиц в зоне измельчения и количество ударных воздействий на них в единицу времени, то есть повышается эффективность процесса измельчения.



- 1 – загрузочный патрубок; 2 – камера измельчения; 3 – ротор; 4 – ударники;
5 – вал; 6 – разгрузочное отверстие; 7 – вакуумный насос

Рисунок 1. Новый ударно-вихревой измельчитель: а - схема; б - внешний вид

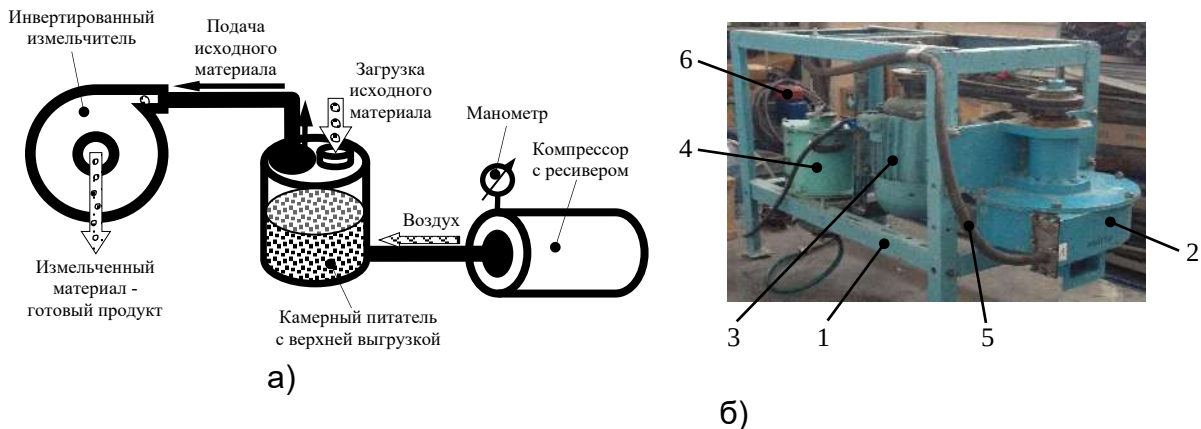
Меняя давление и скорость внешнего материаловоздушного потока и частоту вращения ротора, можно регулировать энергонапряженность процесса, тонкость измельчения, производительность, гранулометрию, т.е. качество процесса измельчения.

Для проверки работоспособности, эффективности и возможности практического использования нового ударно-вихревого измельчителя были проведены сравнительные экспериментальные исследования типового дисмембратора и нового ударно-вихревого измельчителя.

В ходе экспериментов использовались:

- типовый дисмембратор и новый ударно-вихревой измельчитель;
- прибор ПСХ–10А для определения тонкости измельчения и электронные весы РСЕ-WS-30 для взвешивания навески материала;
- лежалый цемент, открытый 9 месяцев назад.

На рисунке 2 представлена экспериментальная установка для исследования ударно-вихревого измельчителя.



- 1 - рама; 2 - измельчитель; 3 - электродвигатель привода измельчителя;
4 - камерный питатель; 5 - воздухо-материалопровод; 6 - компрессор

Рисунок 2. Схема (а) и внешний вид (б) установки для исследования ударно-вихревого измельчителя

Были проведены сравнительные экспериментальные исследования процесса измельчения лежалого цемента в типовом дисмембраторе и в новом ударно-вихревом измельчителе. Перед проведением экспериментов были взяты пробы лежалого цемента и с помощью прибора ПСХ–10А определены исходные удельная поверхность S ($\text{см}^2/\text{г}$) и средний размер d ($\mu\text{м}$) его частиц. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исходного лежалого цемента

Номер испытания	Удельная поверхность S , $\text{см}^2/\text{г}$	Средний диаметр частиц d , $\mu\text{м}$
1	2425	7,4
2	2374	7,6
3	2577	7,3

Средние значения по результатам трех измерений: удельная поверхность $S = 2458 \text{ см}^2/\text{г}$; средний диаметр частиц $d = 7,4 \text{ мкм}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначально определялась эффективность работы типового дисмембратора. Навеска лежалого цемента была пропущена через измельчитель при частоте

вращения ротора 5000 об/мин. Были проведены последовательные обработки одной и той же навески материала (цемента). После каждого прохода из объема измельченного материала брались пробы, которые обрабатывались на приборе ПСХ–10А. Были получены результаты, представленные на рисунке 3.

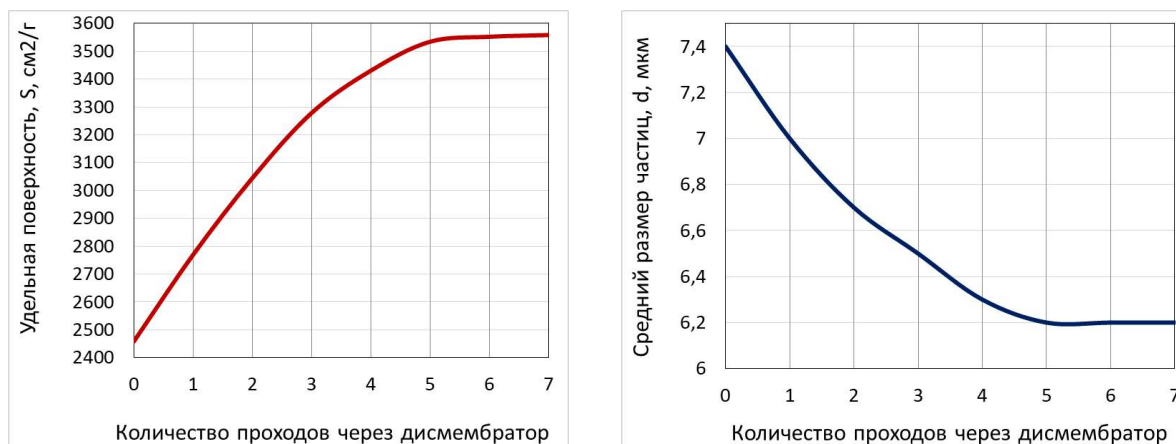


Рисунок 3. Результаты измельчения цемента в типовом дисмембраторе

Как видно из рисунка 3, пятое и последующие прохождения через дисмембратор показали, что удельная поверхность и средний диаметр частиц цемента практически не изменяются, а растут только энергозатраты на процесс, следовательно, дальнейшее измельчение при данной схеме работы измельчителя нецелесообразно, так как длительность измельчения цемента в типовом дисмембраторе сравнительно велика, а результат измельчения крайне незначительный: $S=3554 \text{ см}^2/\text{г}$, $d=6,2 \text{ мкм}$. Новый ударно-вихревой измельчитель при испытаниях был настроен на получение частиц измельченного материала размером 4...5 мкм, то есть: частота вращения ротора 5000 об/мин; избыточное давление воздуха на входе в измельчитель 260...270 кПа. Навеска исходного цемента была пропущена через измельчитель. После измельчения материала из его объема были взяты пробы, которые обработали на приборе ПСХ–10А. При измельчении цемента за один проход через измельчитель был получен следующий средний результат: $S=7217 \text{ см}^2/\text{г}$, $d=3,3 \text{ мкм}$ (рисунок 4).

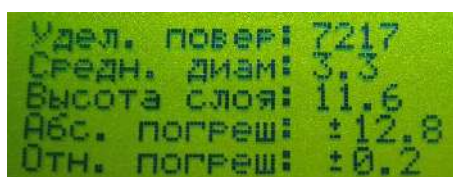


Рисунок 4. Результат измельчения цемента в ударно-вихревом измельчителе по показаниям прибора ПСХ-10А

Оценка ориентировочных энергозатрат на процесс измельчения цемента дала следующие результаты.

Суммарное время измельчения цемента в типовом дисмембраторе за 5 проходов - 40 секунд (0,67 мин), что при мощности привода 1 кВт дает затраты энергии:

$$1 \text{ кВт} \times 0,67 \text{ мин} = 0,67 \text{ кВт} \cdot \text{мин}.$$

Среднее время измельчения материала в ударно-вихревом измельчителе за 1 проход - 18 секунд (0,3 мин), что при мощности привода 1 кВт и с учетом затрат энергии компрессора за то же время (18 секунд (0,3 мин)) при мощности компрессора 1 кВт дает затраты энергии:

$1 \text{ кВт} \times 0,3 \text{ мин} + 1 \text{ кВт} \times 0,3 \text{ мин} = 0,6 \text{ кВт} \cdot \text{мин}$,

что на 10% меньше, чем энергия, затраченная в типовом дисмембраторе при полученных в два раза большей удельной поверхности и в два раза меньшем среднем размере частиц ($7217 \text{ см}^2/\text{г}$ против $3534 \text{ см}^2/\text{г}$ и $3,3 \text{ мкм}$ против $6,2 \text{ мкм}$). При этом получена удельная поверхность, соответствующая целевой поверхности для портландцементов ($6000 \dots 7000 \text{ см}^2/\text{г}$), которая недостижима в типовом дисмембраторе. Подтверждены возможность регулирования тонкости измельчения и классификации измельченных частиц в процессе измельчения.

Сравнительные результаты измельчения цемента в типовом дисмембраторе и в новом ударно-вихревом измельчителе, представленные в виде гистограммы на рисунке 5, доказывают высокую эффективность работы ударно-вихревого измельчителя.

В результате экспериментов доказаны работоспособность, эффективность и возможность практического применения нового ударно-вихревого измельчителя.

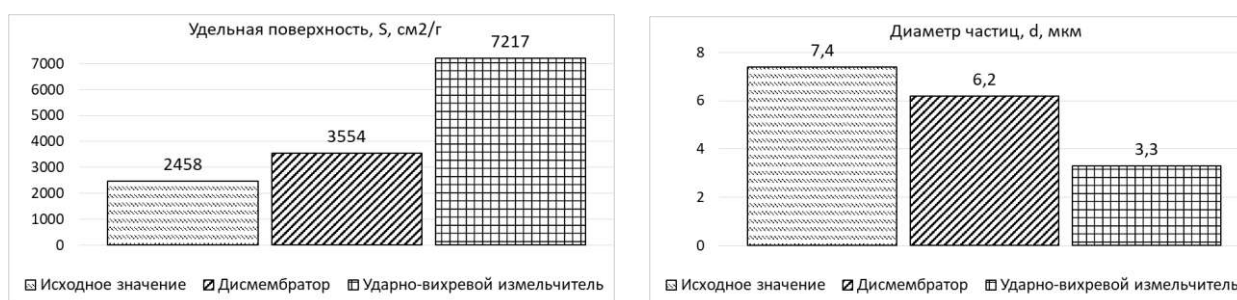


Рисунок 5. Результаты измельчения цемента в типовом дисмембраторе и новом ударно-вихревом измельчителе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый ударно-вихревой измельчитель с повышенной эффективностью процесса измельчения.

Новый измельчитель экспериментально доказал свою работоспособность, эффективность, возможность практического использования и перспективность, позволил решить задачу интенсификации и повышения эффективности процесса тонкого измельчения материалов для удовлетворения потребности в особо тонкоизмельченных материалах. Получены новые знания об одном из возможных способов интенсификации и повышения эффективности процесса тонкого измельчения. Новая схема организации работы ударно-вихревого измельчителя с воздействием на частицы большой механической энергией открывает новые возможности для дальнейшего развития и совершенствования экономичного измельчения на основе сокращения времени измельчения.

Результаты, полученные в работе, являются основой для дальнейших исследований процессов тонкого и сверхтонкого измельчения материалов, создания новых видов измельчителей, отличающихся высокой эффективностью и широкими технологическими возможностями. Научная и практическая новизна работы могут открыть новое направление в развитии измельчительного оборудования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP23488405 «Разработка инновационного оборудования для измельчения материалов с повышенной эффективностью»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 2017. – 368 с. // Sidenko P.M. Izmelchenie v khimicheskoy promyshlennosti. - M.: Khimia, 2017. - 368 s.
- Аввакумов Е.Г. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья. - Рос. акад. наук, Сибирское отд-ние, Ин-т хим. тв. тела и механохимии. – Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2009. – 155 с. // Avvakumov E.G. Mekhanicheskie metody aktivatsii v pererabotke prirodnogo i tekhnogennogo syria. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo «Geo», 2009, 155 p.
- Акунов В.И. О выборе оптимальных типов измельчителей. / Строительные материалы, 2012, №11, С 21-22. // Akunov V.I. O vybere optimalnykh tipov izmelchiteley. / Stroitelnye materialy, 2012, №11, S.21-22.
- Овчинников П.Ф. О выборе оборудования для тонкого измельчения. / Разработка теории и конструктивного оформления машин и аппаратов интенсивных действий с участием зернистых материалов. – Иваново, 2014. – С. 3–8. // Ovchinnikov P.F. O vybere oborudovaniya dlya tonkogo izmelcheniya. / Razrabotka teorii i konstruktivnogo oformleniya mashin i apparatov intensivnykh deistviy s uchastiem zernistyykh materialov. Ivanovo, 2014. - S. 3-8.
- Kerry Johanson. Selecting the proper mill for your product: Understanding breakage behavior is crucial in mills // Chemical Engineering, Vol. 120, Issue 11, Nov. 2013.
- Гийо Р. Проблема измельчения материалов и её развитие. – М.: Стройиздат, 2004. – 112 с. // Giio R. Problema izmelcheniya materialov i ee razvitie. – M.: Stroizdat, 2004. – 112 s.
- Демидов А.Р., Чирков С.Е. Способы измельчения и оценка их эффективности. – М.: ЦИНТИ, 2009. – 49 с. // Demidov A.R., Chirkov S.E. Spособy izmelcheniya i otsenka ikh effektivnosti. – M.: TSINTI, 2009. – 49 s.
- Azhgalieva A.S., Borisenko D.N., Kolesnikov N.N., Zhokhov A.A. Impact Mill // Surface. X-ray, synchrotron, and neutron researches, 2024, № 5, с. 109–112.
- Dey S., Das A. Comminution features in an impact hammer mill. // Powder Technology, 2013, 235, 914-920.
- Гурьянов Г.А., Клименко Е.А. Способ тонкого измельчения материалов. Патент Республики Казахстан на изобретение №32956, бюл. №27 от 23.07.2018. // Guryanov G.A., Klimenko E.A. Spособ tonkogo izmelcheniya materialov. Patent Respubliki Kazakhstan na izobretenie №32956, bul. №27 ot 23.07.2018.
- Костин В.Н., Паничев В.В. Теория эксперимента: учебное пособие. - Оренбургский государственный университет. - Оренбург: ОГУ, 2013. - 209 с. // Kostin V.N., Ganichev V.V. Teoria eksperimenta: uchebnoe posobie. - Orenburgskii gosudarstvennyi universitet. - Orenburg: OGU, 2013. - 209 s.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ СТАЛИ 20Х ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

УДК 621

Н.К.Килымбеков¹, Р.Ғабдысалық^{2*}, К.К.Комбаев², А.Р.Бичева³, Д.Х. Жамсап²

¹АО «Усть-Каменогорский завод промышленной арматуры», Усть-Каменогорск, Казахстан

²НАО «Восточно-Казахстанский технический университет», Усть-Каменогорск, Казахстан

³ТОО «Гидросталь», Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Ғабдысалық Риза, rgabdysalyk@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В работе исследовано влияние химического состава стали 20Х и параметров GTAW/TIG-наплавки на микроструктуру и эксплуатационные свойства наплавленного слоя деталей запорной арматуры, применяемых в нефтегазовой отрасли Казахстана. Целью исследования является установление взаимосвязи между режимами наплавки, фазовым составом и механическими характеристиками слоя для обеспечения высокой прочности, износостойкости и надежности узлов.

Методы исследования включали металлографический анализ с использованием оптического микроскопа, подготовку проб с травлением и полированием, а также измерение микротвердости по сечению наплавленного слоя. Наплавка выполнялась при токе 110 А, напряжении 11–12 В, скорости 2 мм/с, расходе защитного газа 8–10 л/мин с присадочной проволокой диаметром 1,6 мм.

Результаты показали формирование функционально-градиентной микроструктуры: α -Fe и перлит с локальными участками мартенсита в наплавленном слое, комплексная фазовая структура в линии сплавления и α -Fe с перлитом в зоне термического влияния. Микротвердость демонстрирует градиент от 180–210 HV в основном металле до 340–380 HV в линии сплавления, что подтверждает повышение прочности поверхности при сохранении пластичности подложки.

Полученные данные позволяют оптимизировать параметры наплавки стали 20Х и прогнозировать эксплуатационные свойства наплавленных деталей, что имеет практическую значимость для повышения надежности оборудования в условиях агрессивных сред.

Ключевые слова: сталь 20Х, GTAW/TIG-наплавка, микроструктура, фазовый состав, микротвердость, запорная арматура.

ВВЕДЕНИЕ

Детали запорной арматуры, широко применяемые в нефтегазовой отрасли Казахстана, часто имеют сложную геометрию посадочных поверхностей, что требует применения наплавки для восстановления или придания необходимых эксплуатационных свойств. Для автоматической и полуавтоматической наплавки критически важно исследование технологических режимов, поскольку от них зависит формирование микроструктуры и механических характеристик наплавленного слоя [1].

Метод GTAW/TIG (Gas Tungsten Arc Welding / Tungsten Inert Gas) представляет собой аргонодуговую сварку неплавящимся вольфрамовым электродом с использованием инертного газа в качестве защитной среды. Этот способ обеспечивает локализованное тепловложение, минимальное окисление расплава и высокое качество наплавленного слоя, что делает его особенно актуальным для восстановления и упрочнения деталей из легированных сталей [2].

В научной литературе рассматриваются различные подходы к выбору режимов наплавки, включая силу тока, напряжение, скорость перемещения электрода и подготовку поверхности. Однако влияние химического состава стали на формирование микроструктуры и эксплуатационных свойств слоя, в том числе микротвердости, изучено недостаточно, особенно применительно к сталям, востребованным на казахстанском нефтегазовом рынке.

Цель настоящего исследования — оценка влияния химического состава стали марки 20Х и параметров технологии GTAW/TIG-наплавки на микроструктуру и микротвердость наплавленного слоя деталей запорной арматуры. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

анализ химического состава стали 20Х и его влияния на тепловое воздействие в процессе наплавки;

изучение режимов автоматической и полуавтоматической наплавки и их влияния на формирование микроструктуры;

определение взаимосвязи «химический состав – режим наплавки – структура – микротвердость» для характеристики наплавленного слоя.

Объектом исследования является сталь 20Х, применяемая для изготовления деталей запорной арматуры, предметом — влияние химического состава и параметров GTAW/TIG-наплавки на формирование микроструктуры и микротвердость наплавленных слоев. Методы исследования включают металлографический анализ, измерение микротвердости и визуальный контроль качества наплавленного слоя.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью научного обоснования режимов GTAW/TIG-наплавки и учета химического состава стали 20Х для формирования наплавленных слоев с заданными структурными и механическими характеристиками, обеспечивающими эксплуатационные свойства деталей запорной арматуры в условиях высоких нагрузок и агрессивной среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изготовления деталей запорной арматуры, широко применяемых в нефтегазовой отрасли, используется сталь марки 20Х, что обусловлено её оптимальным сочетанием прочностных, пластических и эксплуатационных характеристик. Согласно ГОСТ 4543-2016, данная сталь относится к конструкционным легированным сталям и характеризуется сбалансированным химическим составом (мас. %): С — 0,17–0,24; Si — 0,17–0,37; Mn — 0,50–0,80; Cr

— 0,80–1,10; Ni — до 0,30; S и P — не более 0,035. Хром в составе стали обеспечивает повышенную прокаливаемость, износостойкость и коррозионную стойкость, что делает сталь 20Х особенно востребованной для работы в условиях высоких давлений, агрессивных сред и циклических нагрузок, характерных для нефтегазового оборудования [3].

Химический состав стали определяет процессы разбавления наплавленного слоя, диффузионное перераспределение элементов и формирование переходной зоны «основа–наплавка», что непосредственно влияет на микроструктуру, твердость и износостойкость деталей. В этой связи исследование взаимосвязи «химический состав – технология наплавки – структура – свойства» для стали 20Х представляет собой актуальную научно-техническую задачу в нефтегазовой отрасли и направлено на повышение эффективности восстановления и упрочнения критически важных элементов запорной арматуры.

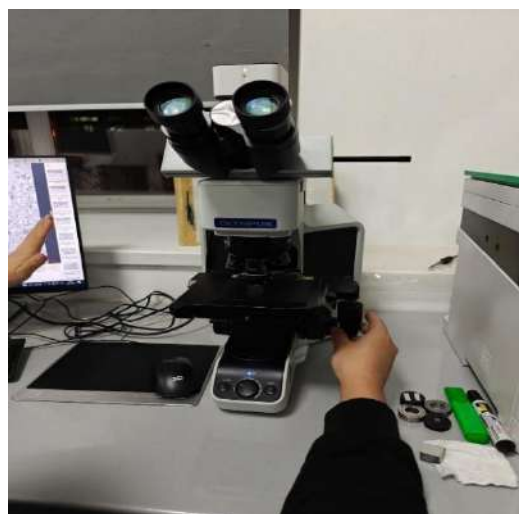
Научные исследования проводились на базе Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева. Пробоподготовка образцов

наплавленной стали, включающая операции резки, шлифования, полирования и травления (рисунок 1а), и металлографические исследования осуществлялись в Научном центре «Защитные и функциональные покрытия» (PROFCOAT) с применением оптического микроскопа Olympus BX51 (рисунок 1б).

Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере DuraScan 20 в соответствии с требованиями ГОСТ 9013-59 и ГОСТ 4543-2016 для легированных сталей марки 20Х. Резка образцов наплавленной стали размерами $10 \times 10 \times 25$ мм осуществлялась на низкоскоростном прецизионном отрезном станке DTQ-5 при скорости вращения отрезного круга 200–300 об/мин с использованием охлаждающей жидкости. Применение низких скоростей резания и эффективного охлаждения позволило минимизировать тепловыделение в зоне резания, что исключало термическое воздействие на структуру материала и предотвращало возможные фазовые превращения в приповерхностном слое [4].



а) травление образца для выявления микроструктуры;



б) исследование на оптическом микроскопе Olympus BX51.

Рисунок 1. Основные этапы металлографического исследования наплавленной стали марки 20Х, включающие подготовку и анализ структуры материала.

Шлифование и полирование проводились на двухдисковом шлифовально-полировальном станке GP-2А.

Шлифование выполнялось последовательно с использованием абразивных бумаг зернистостью от Р240 до Р2000 при нагрузке 20–30 Н на образец и скорости вращения диска 150–200 об/мин. Полирование осуществлялось с применением алмазных суспензий (3 и 1 мкм) при сниженной нагрузке 10–15 Н и скорости вращения 100–150 об/мин до получения зеркальной поверхности без видимых дефектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Режимы наплавки стали 20Х методом GTAW/TIG подбирались с учётом обеспечения стабильного формирования наплавленного слоя и минимизации дефектов структуры. Процесс осуществлялся при силе тока 110 А, напряжении 11–12 В, скорости наплавки 2.0 мм/с и расходе защитного газа (Ar) 8–10 л/мин, с использованием присадочной проволоки диаметром 1.6 мм, подаваемой вручную при прямой полярности (DCEN).

Применение указанных параметров обеспечивало контролируемое

тепловложение и устойчивость дугового процесса, что является важным фактором формирования микроструктуры наплавленного слоя. Подробные режимы наплавки приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Режимы GTAW/TIG-наплавки стали 20Х

№	I, А	U, В	v n, мм/с	Q, л/мин	d пров, мм	Полярность	E, кДж/мм
1	110	11–12	2.0	8–10	1.6	DCEN	0.60–0.65

На рисунке 2 представлена модель процесса наплавки, отражающая основные термические и структурные особенности формирования наплавленного слоя [5]. Присадочный металл подается вручную, создавая высокотемпературную зону плавления на поверхности основного металла. Этот процесс обеспечивает локальное плавление материала и формирование прочного соединения с базовым металлом. В результате выделяются следующие ключевые области: Наплавленный слой — зона полного расплавления присадочного металла с его взаимодействием со сталью 20Х, формирующая после кристаллизации относительно однородную структуру. Характерны равноосные зерна в центре и столбчатая кристаллизация у линии сплавления, ориентированная по направлению теплоотвода. Для GTAW/TIG-процесса типично ограниченное окисление, однако возможно образование дисперсных оксидных включений (FeO , Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , CaO), оказывающих упрочняющее действие и повышающих твердость и износостойкость.

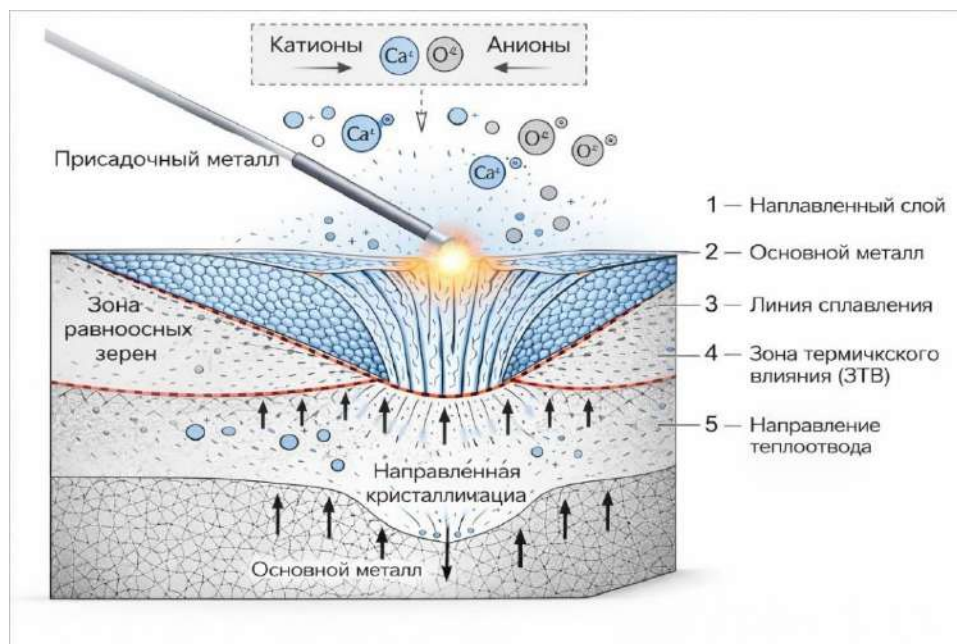


Рисунок 2. Модель формирования наплавленного слоя при GTAW/TIG-наплавке стали 20Х

Линия сплавления — узкая переходная зона с высокими температурными градиентами и интенсивной диффузией. Здесь возможно образование тонкодисперсных оксидных и интерметаллидных включений. При оптимальных режимах они повышают прочность сцепления, при избытке — снижают пластичность.

Зона термического влияния (ЗТВ) характеризуется фазовыми превращениями, обусловленными циклом нагрева и охлаждения. В зависимости от

скорости охлаждения формируются мартенсит или продукты распада аустенита (троостит, сорбит). Образование оксидных частиц влияет на локальные механические свойства.

Направление теплоотвода определяет морфологию кристаллизации: от линии сплавления формируются столбчатые кристаллы с переходом в равноосную структуру. Высокая скорость охлаждения способствует измельчению зерна и ограничивает рост оксидных включений.

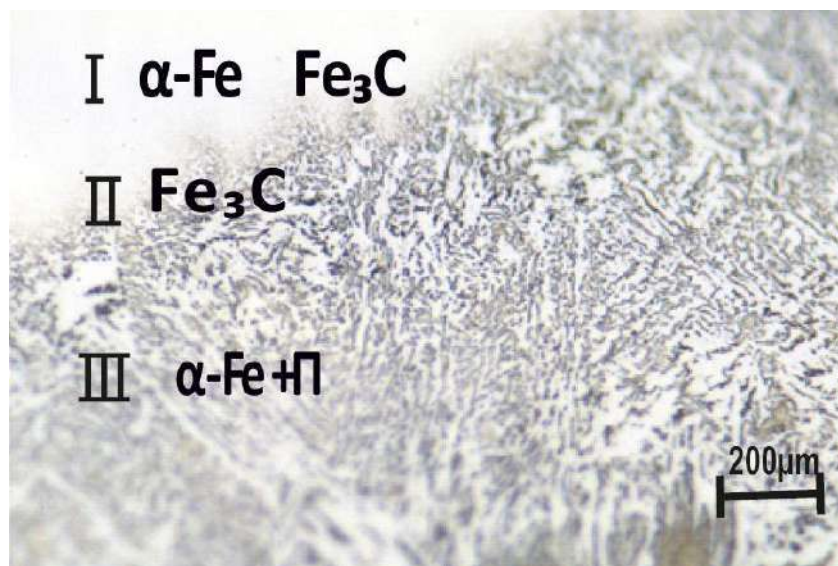


Рисунок 3. Микроструктура наплавленного слоя и зоны термического влияния стали 20Х

Для выявления указанных особенностей и оценки качества сформированного покрытия рассмотрим реальную микроструктуру наплавленного слоя на стали 20Х, представленную на рисунке 3. На микрофотографии выделяются следующие зоны и особенности:

Наплавленный слой I — верхняя область с относительно однородной микроструктурой и преимущественно равноосными зёрнами, формирующаяся при полном расплавлении и кристаллизации присадочного металла. Преобладают α -Fe с включениями Fe_3C , образующими перлит; у линии сплавления наблюдается направленная кристаллизация. Локально при быстром охлаждении возможен мартенсит, повышающий твердость и износостойкость.

Линия сплавления II — переходная зона с выраженными границами кристаллитов и частичным смешением. Характерны интенсивная диффузия, разбавление и комплексная фазовая структура (перлит, мартенсит, Fe_3C). Высокая плотность границ обеспечивает прочность сцепления и трещиностойкость.

Подложка III основной металл — область с более крупными зёрнами исходной структуры. В зоне термического влияния наблюдаются рекристаллизация и рост зёрен, формирование α -Fe + перлита, локально — мартенсита, что влияет на механические свойства и адгезию слоя.

Структурно-фазовые превращения:

- наплавленный слой — α -Fe + Fe_3C (перлит) с участками мартенсита;
- линия сплавления — многокомпонентная структура с высокой плотностью границ, перлитом и мартенситом;
- ЗТВ — α -Fe + перлит с признаками рекристаллизации, обеспечивающими снижение напряжений и предотвращение трещинообразования.

Рисунок 4 демонстрирует количественное распределение микротвёрдости по

глубине наплавленного соединения стали 20Х.

В наплавленном слое значения микротвёрдости составляют в среднем 280–320 HV, что связано с формированием мелкодисперсной феррито-перлитной структуры с локальными участками мартенсита. Вблизи линии сплавления наблюдается максимум — 340–380 HV, обусловленный измельчением зерна и наличием мартенситных составляющих. В зоне термического влияния микротвёрдость снижается от 300 HV до 220–240 HV по мере удаления от границы сплавления, что отражает переход к более равновесной феррито-перлитной структуре. В основном металле значения стабилизируются на уровне 180–210 HV, соответствующая исходному состоянию стали 20Х.

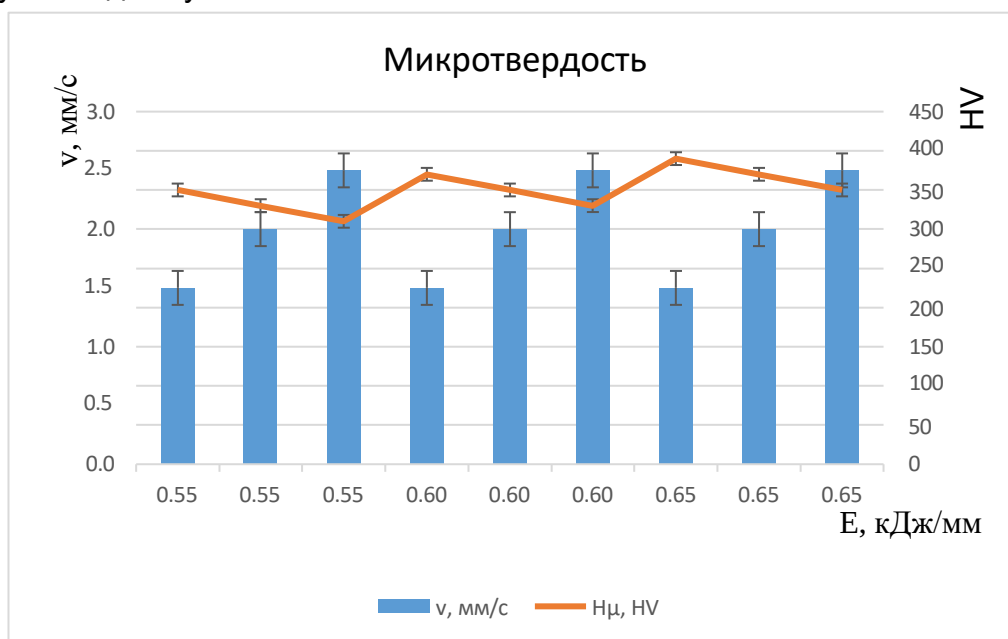


Рисунок 4. Распределение микротвёрдости по сечению наплавленного слоя стали 20Х при GTAW/TIG-наплавке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ Исследование показало, что режим GTAW/TIG-наплавки стали 20Х ($I = 110$ А, $U = 11–12$ В, $v = 2$ мм/с, $Q = 8–10$ л/мин, DCEN) обеспечивает стабильное формирование наплавленного слоя с минимальными дефектами и контролируемым тепловложением (0,60–0,65 кДж/мм). Микроструктура слоя состоит из α -Fe и перлита с локальными включениями мартенсита, линия сплавления характеризуется высокой плотностью границ кристаллитов и комплексной фазовой структурой, а зона термического влияния содержит α -Fe и перлит с признаками рекристаллизации. Распределение микротвёрдости носит градиентный характер: максимум 340–380 HV в линии сплавления, 280–320 HV в наплавленном слое, 220–300 HV в ЗТВ и 180–210 HV в основном металле, что подтверждает формирование функционально-градиентного слоя с высокой прочностью и износостойкостью при сохранении пластичности подложки. Таким образом, учет фазового состава и параметров наплавки позволяет оптимизировать эксплуатационные свойства деталей запорной арматуры для нефтегазовой отрасли.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование было профинансировано грантом Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP22683698 «Повышение износостойкости уплотнительных поверхностей сопрягаемых деталей крупных шибберных задвижек»).

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО

ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке рукописи использовалась генеративная модель ИИ ChatGPT (OpenAI) для редактирования текста и улучшения научного стиля. ИИ применялся как вспомогательный инструмент; авторы полностью отвечают за достоверность данных и содержание работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kombayev, K., Nedobitkov, A., Gridunov, I., Kozhakhmetov, Y., Khoshnaw, F., & Aibar, K. (2025). Surface crack analysis and quality enhancement of 30X13 (AISI 420) martensitic stainless steel gate valve shutters via electrolytic plasma hardening. *Results in Engineering*, 26, 104966. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104966>.
- Kutelu, B. J., Seidu, S. O., Eghabor, G. I., & Ibitoye, A. (2018). Review of GTAW welding parameters. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 6(5), 541–554. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2018.65039>.
- Kombayev, K., Khoshnaw, F., Uazyrkhanova, G., & Moldabayeva, G. (2024). Experimental and mathematical modelling investigation of plasma electrolytic oxidation (PEO) for surface hardening of 20Ch steel. *Materials*, 17(24), 6043. <https://doi.org/10.3390/ma17246043>
- Kombayev, K., Kozhakhmetov, Y., Yerbolat, D., Daulet Khanov, Y., Kim, V., Kaidar, A., Ishangaliyev, A., & Khoshnaw, F. (2026). Influence of cutting parameters and assist gases on the laser cutting quality of 09G2S (S355J2, EN 10025-2) structural steel. *Results in Surfaces and Interfaces*, 22, 100716. <https://doi.org/10.1016/j.rsi.2025.100716>
- ChatGPT. (2026, March 21). Редактирование и сокращение научного текста по тематике наплавки стали 20X [Большая языковая модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

УДК 512(075.8)

А.Ю Котельникова^{1*}, Р.У Мукашева¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор корреспонденции: Котельникова Анастасия Юрьевна,
kotelnikovaa2005@gmail.com

АННОТАЦИЯ. в работе исследуется влияние параметров газового потока на процесс газотермической металлизации. Рассматриваются основные характеристики газового потока, такие как скорость, температура, давление и состав, а также их воздействие на формирование покрытий. Приводятся математические модели, описывающие процесс переноса частиц и их взаимодействие с обрабатываемой поверхностью. Анализируются зависимости между параметрами потока и качественными характеристиками получаемых покрытий, включая адгезию, пористость и равномерность. Рассмотрены методы оптимизации технологических режимов с целью повышения эффективности и качества металлизации. Приведены примеры практического применения моделей при разработке современных технологических процессов в промышленности.

Ключевые слова: газотермическая металлизация, газовый поток, математическое моделирование, параметры процесса, покрытие, адгезия, температура, скорость потока.

ВВЕДЕНИЕ

Из курса физики и материаловедения известно, что процессы газотермической металлизации во многом определяются характеристиками газового потока. Посредством обобщения этих представлений строятся математические модели, позволяющие описывать поведение частиц в потоке и их взаимодействие с поверхностью. Такое обобщение осуществляется на основе физических законов и уравнений переноса, без непосредственного рассмотрения всех микроскопических процессов. Напротив, такие параметры, как скорость частиц, температура и распределение покрытия, определяются через характеристики газового потока.

Газотермическая металлизация – это процесс формирования покрытий, основанный на распылении материала, доведенного до жидкого или пластичного состояния, с последующим его осаждением на подложку. Ключевым элементом является взаимодействие аэрозольных частиц с высокоскоростным газовым потоком. Процесс включает стадии нагрева и диспергирования материала, его ускорения в газовой струе и осаждения на поверхности. Газовый поток выполняет комплексные функции: транспортировку частиц, придание им кинетической энергии и обеспечение теплового режима. Скорость газа определяет энергию удара частиц и адгезию покрытия, температура – степень плавления и структуру, давление – стабильность процесса, а состав – возможные химические трансформации. Физическая основа процесса базируется на законах механики сплошных сред и теплопереноса, описывающих динамику частиц под действием аэродинамических сил и теплообмен с газовой средой. Это позволяет моделировать влияние газодинамических и тепловых параметров на характеристики формируемого покрытия. В связи с этим особую значимость приобретает разработка адекватных математических моделей и применение численных методов для решения возникающих задач. Использование метода конечных разностей позволяет получить приближённые решения дифференциальных уравнений, описывающих динамику и тепловое состояние частиц, а также провести анализ устойчивости и точности вычислений.

В произвольной технологической системе заданы параметры подачи материала и газовой среды, включая скорость, давление и температуру. В рассматриваемых моделях дополнительно вводится описание газового потока, которое определяет динамику движения частиц и их тепловое состояние. Результатом такого моделирования являются количественные характеристики процесса, выражаемые в виде физических величин.

Процесс газотермической металлизации рассматривается как совокупность явлений переноса, если задано правило, посредством которого каждому состоянию газового потока и частиц ставится в соответствие набор параметров (скорость, температура, концентрация), описывающих их взаимодействие с обрабатываемой поверхностью.

Математическая модель газотермической металлизации является адекватной, если она учитывает основные параметры газового потока и подчиняется фундаментальным законам сохранения массы, импульса и энергии, обеспечивая согласование расчетных и экспериментальных данных.

Используя данные принципы, можно вывести ряд свойств процесса газотермической металлизации и установить зависимости между параметрами газового потока и качеством покрытия.

В дальнейшем вводится понятие эффективности процесса и рассматриваются её основные характеристики, такие как адгезия, плотность и равномерность покрытия.

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности технологических процессов газотермического напыления за счёт оптимизации параметров газовой среды. Управление скоростью, температурой, давлением и составом газового потока позволяет целенаправленно влиять на движение, нагрев и осаждение частиц, а следовательно — на структуру и свойства формируемого покрытия.

В связи с этим особую значимость приобретает разработка адекватных математических моделей и применение численных методов для решения возникающих задач. Использование метода конечных разностей позволяет получить приближённые решения дифференциальных уравнений, описывающих динамику и тепловое состояние частиц, а также провести анализ устойчивости и точности вычислений.

Цель работы — исследование влияния параметров газового потока на процесс газотермической металлизации и качество формируемых покрытий на основе математического моделирования.

Задачи исследования:

1. Рассмотреть физические основы процесса газотермической металлизации.
2. Проанализировать влияние параметров газового потока на движение и нагрев частиц.
3. Разработать математическую модель процесса.
4. Обосновать выбор метода конечных разностей для численного решения.
5. Провести численный эксперимент и проанализировать полученные результаты.
6. Оценить влияние параметров процесса на характеристики покрытия

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для аналитического описания примем следующие допущения:

1. поток является стационарным;
2. газ считается несжимаемым;
3. струя после выхода из сопла имеет осевую симметрию;
4. вязкостные потери учитываются в упрощённой форме;
5. расширение струи происходит по коническому закону.

Качество покрытия при газотермической металлизации и сам процесс напрямую зависят от параметров газового потока. Изменение этих параметров влечет за собой трансформацию условий, в которых находятся частицы – их движение, нагрев и оседание. Эти изменения, в свою очередь, непосредственно отражаются на характеристиках готового покрытия. Основные входные параметры определяют режим напыления и напрямую влияют на перенос материала, тепловое состояние частиц и формирование слоя.

– Скорость потока является одним из важнейших параметров. Увеличение скорости приводит к более сильному ускорению частиц и повышению их кинетической энергии при столкновении с поверхностью. Это способствует лучшей адгезии покрытия. Однако, если скорость становится чрезмерно высокой, это может вызвать разбрызгивание материала и снизить однородность слоя.

– Температура потока определяет, насколько хорошо частицы нагреваются и в какое фазовое состояние они переходят. Если температура недостаточна, частицы не успевают расплавиться, что приводит к образованию пористого покрытия. С другой стороны, слишком высокая температура может вызвать перегрев и окисление напыляемого материала.

– Давление газа влияет на плотность и структуру газовой струи. Повышение давления делает струю более плотной и способствует более стабильной доставке частиц. Это положительно сказывается на равномерности покрытия, но требует тщательной настройки, чтобы избежать нежелательных турбулентных эффектов.

– Состав газовой среды играет существенную роль в химических реакциях, происходящих во время напыления. Присутствие активных компонентов может привести к окислению частиц и ухудшению качества покрытия. Использование инертных газов помогает свести к минимуму нежелательные химические процессы.

– Расход газа определяет интенсивность потока и общую стабильность процесса. Недостаточный расход приводит к неравномерному переносу частиц, а избыточный – к неоправданному расходу энергии и снижению общей эффективности.

Таблица 1- параметры

Параметр	Назначение в модели
Температура газового потока	Определяет степень нагрева и плавления частиц
Скорость газового потока	Влияет на ускорение частиц и их кинетическую энергию
Давление газа	Определяет плотность потока и условия переноса частиц
Расход газа	Формирует интенсивность потока и стабильность процесса
Состав газа	Влияет на химические реакции и окисление частиц
Размер частиц	Определяет скорость нагрева и траекторию движения
Температура частиц	Характеризует их состояние перед осаждением
Скорость частиц	Влияет на адгезию и качество формируемого покрытия
Дистанция напыления	Определяет условия взаимодействия частиц с поверхностью
Угол напыления	Влияет на равномерность и структуру покрытия

Выбор численного метода. Для решения дифференциальных уравнений в математическом моделировании используются различные численные методы.

Наиболее распространённые: метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных разностей применяется при решении:

- обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ),
- уравнений в частных производных (УЧП) на регулярных областях.

Метод конечных элементов используется для задач со сложной геометрией и неоднородными свойствами среды.

В данной работе используется метод конечных разностей, так как он позволяет получить явную расчётную схему и провести анализ устойчивости.

Математическая модель процесса. Для описания поведения частиц в газовом потоке используются уравнения механики и теплопереноса.

Уравнение движения частицы

Движение частицы в газовом потоке можно описать уравнением (1):

$$m \frac{dv}{dt} = -k v \quad (1)$$

где:

- m - масса частицы,
- v - скорость частицы,
- t - время,
- k - коэффициент сопротивления среды.

Данное уравнение показывает, что скорость частицы уменьшается под действием сопротивления газового потока.

Уравнение нагрева частицы. Процесс изменения температуры частицы описывается уравнением (2) теплопереноса:

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{h}{mc} \right) (Tg - T), \quad (2)$$

где:

- T - температура частицы,
- Tg - температура газового потока,
- c - теплоёмкость материала частицы,
- h - коэффициент теплообмена.

Данное уравнение показывает, что частица нагревается или остывает в зависимости от разности температур между газом и частицей.

Рассматривается уравнение теплопроводности (3):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где $u(x,t)$ — искомая функция, α — коэффициент теплопроводности.

Для численного решения вводится дискретизация области (4):

$$x_i = i \cdot \Delta x, \quad t^n = n \cdot \Delta t \quad (4)$$

Функция заменяется дискретным набором значений $u_i^n \approx u(x_i, t^n)$.

Производные аппроксимируются разностными выражениями (5) и (6):

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u_i^{\{n+1\}} - u_i^n}{\Delta t}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{u_{\{i+1\}}^n - 2u_i^n + u_{\{i-1\}}^n}{\Delta x^2}, \quad (6)$$

Подстановка аппроксимаций в исходное уравнение даёт явную разностную схему:

$$u_i^{\{n+1\}} = u_i^n + \alpha \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot (u_{\{i+1\}}^n - 2u_i^n + u_{\{i-1\}}^n)$$

Для однозначного решения задачи задаются

- начальное условие: распределение $u(x,0)$,
- граничные условия: например,

$$u(0, t) = 0 \text{ и } u(L, t) = 0.$$

Начальное условие определяет начальное распределение величины, а граничные условия ограничивают поведение решения на концах области.

Для явной разностной схемы выполняется критерий устойчивости:

$$r = \alpha \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$$

Если это условие нарушается, ошибки округления начинают накапливаться, и численное решение становится неустойчивым (расходится).

Численный эксперимент заключается в последовательном вычислении значений u_i^n во времени при заданных параметрах модели.

В ходе эксперимента исследуется влияние:

- шага по времени Δt (точность и устойчивость),
- шага по пространству Δx (разрешение решения),
- коэффициента α (скорость диффузии),
- начального распределения.

Результаты моделирования анализируются по следующим направлениям:

- изменение распределения $u(x,t)$ во времени,
- сглаживание начального импульса,
- уменьшение максимального значения функции,
- сравнение решений при разных шагах дискретизации.

Численное моделирование процесса газотермической металлизации выполнено с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics, который позволяет решать сопряжённые задачи гидродинамики и теплопереноса методом конечных элементов.

В рамках работы была построена трёхмерная модель, включающая геометрию сопла, область газового потока и обрабатываемую поверхность (подложку). Геометрия задавалась в упрощённом виде с целью снижения вычислительной сложности при сохранении физической достоверности процесса. (Рис 1)

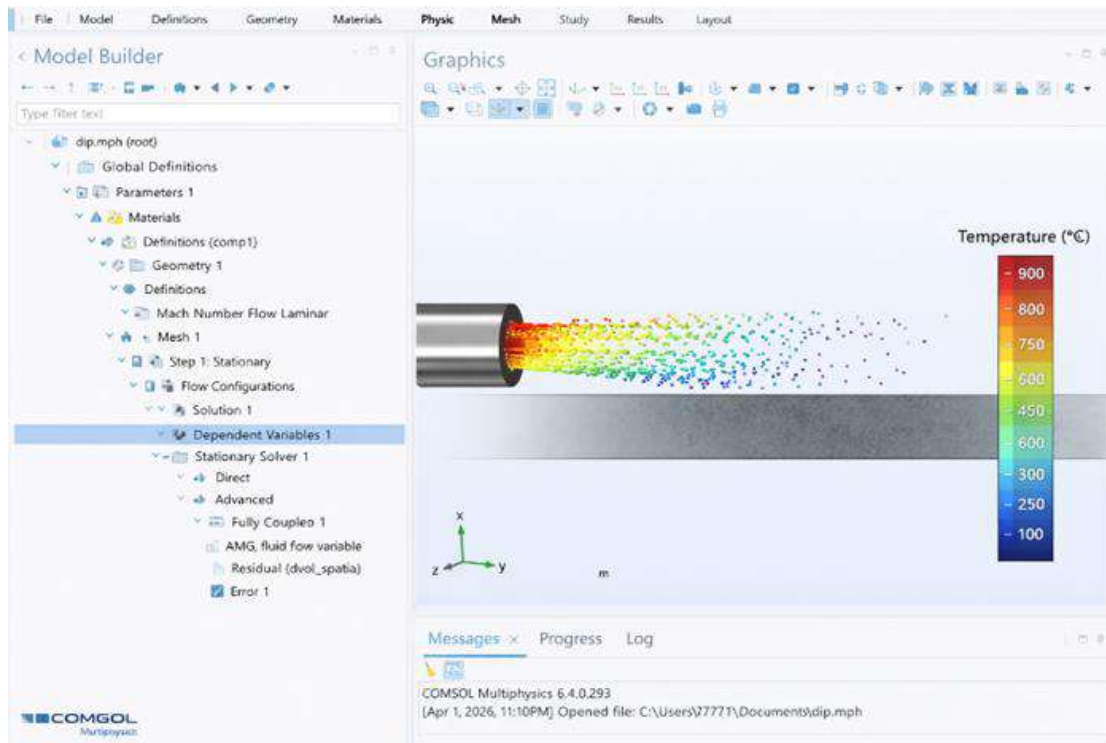


Рисунок 1 -Реализация на Comsol

Для описания газового потока использовался модуль Laminar Flow, основанный на уравнениях Навье–Стокса. Температурное поле рассчитывалось с помощью интерфейса Heat Transfer in Fluids and Solids, что позволило учитывать тепловое взаимодействие между газом, частицами и подложкой.

Граничные условия модели включают:

- задание скорости и температуры газа на входе в сопло;
- условие давления на выходной границе;
- тепловой контакт с подложкой;
- начальную температуру среды.

Движение частиц моделировалось в лагранжевом подходе с использованием интерфейса Particle Tracing, что позволило отслеживать траектории частиц, их скорость и изменение температуры в процессе движения в газовом потоке.

Численное решение задачи осуществлялось методом конечных элементов с автоматической генерацией сетки. Сетка сгущалась в областях с наибольшими градиентами температуры и скорости, в частности вблизи сопла и зоны напыления.

В результате моделирования были получены:

- распределение скоростей газового потока;
- температурное поле в зоне напыления;
- траектории движения частиц;
- распределение температуры частиц вдоль их движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты численного моделирования позволяют установить количественные зависимости между параметрами газового потока и характеристиками движения и нагрева частиц в процессе газотермической металлизации. На основе полученных графиков проведён анализ изменения скорости и температуры частиц в зависимости от расстояния от сопла.

На рисунке 2 представлена зависимость скорости частиц от расстояния. В начальной области, непосредственно у выхода из сопла, частицы обладают

максимальной скоростью, обусловленной воздействием высокоскоростного газового потока. По мере удаления от сопла наблюдается постепенное снижение скорости, что объясняется действием аэродинамического сопротивления среды.

Снижение скорости частиц оказывает существенное влияние на процесс формирования покрытия. Кинетическая энергия частиц при ударе о поверхность определяет степень их деформации и сцепления с подложкой. При недостаточной скорости ухудшается адгезия, так как частицы не обеспечивают необходимого пластического течения при контакте. В то же время чрезмерно высокая скорость может приводить к разбрызгиванию материала и формированию дефектов структуры покрытия. Поэтому, существует оптимальный диапазон скоростей, обеспечивающий наилучшее качество напылённого слоя.

На рисунке 3 представлена зависимость температуры частиц от расстояния от сопла. В начальный момент частицы имеют высокую температуру, близкую к температуре газового потока. Однако в процессе движения происходит интенсивный теплообмен с окружающей средой, в результате чего температура частиц снижается. Данный процесс описывается законом теплопередачи и зависит от коэффициента теплообмена, размеров частиц и разности температур между частицей и газом.

Температурное состояние частиц является одним из ключевых факторов, определяющих структуру покрытия. Если температура частиц недостаточна, они не достигают полностью расплавленного состояния, что приводит к формированию пористого и неоднородного покрытия. В случае избыточной температуры возможно перегревание материала, сопровождающееся окислением и изменением его физико-химических свойств.

Совместный анализ графиков показывает, что с увеличением расстояния от сопла одновременно снижаются как скорость, так и температура частиц. Это приводит к ухудшению условий формирования покрытия, поскольку уменьшается как кинетическая энергия удара, так и степень плавления материала. В результате возрастает вероятность образования дефектов, таких как пористость, недостаточная адгезия и неравномерность слоя.

Особое значение имеет выбор оптимальной дистанции напыления. Слишком малая дистанция может привести к перегреву подложки и неравномерному распределению материала, тогда как слишком большая — к чрезмерному охлаждению и замедлению частиц. Оптимальная дистанция определяется как компромисс между сохранением достаточной температуры и скорости частиц.

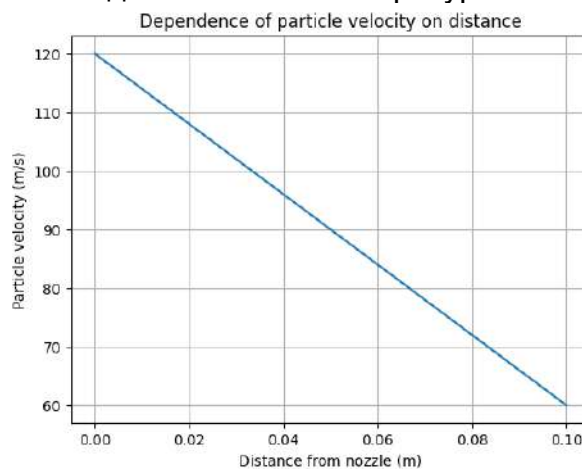


Рисунок 2– Зависимость скорости частиц от расстояния от сопла

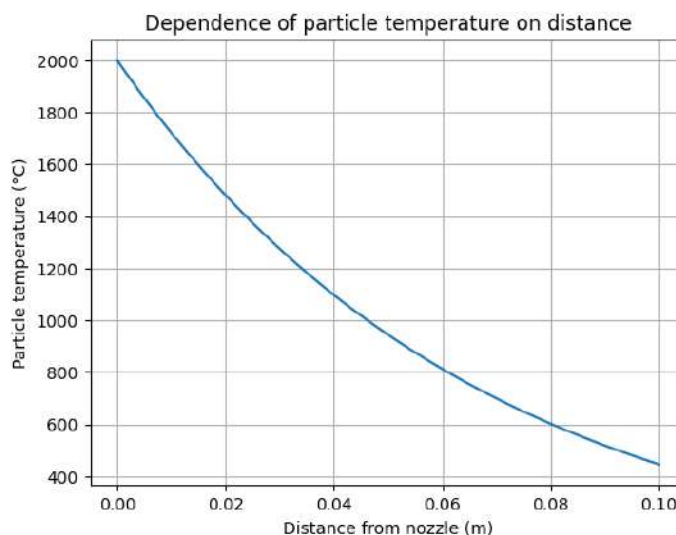


Рисунок 3 – Зависимость температуры частиц от расстояния от сопла

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы было проведено исследование влияния параметров газового потока на процесс газотермической металлизации и качество формируемых покрытий. Рассмотрены основные характеристики газового потока, включая скорость, температуру, давление и состав, а также их влияние на движение, нагрев и осаждение частиц.

В рамках исследования были проанализированы физические основы процесса, основанные на законах механики сплошных сред и теплопереноса. Разработана математическая модель, описывающая движение и тепловое состояние частиц в газовом потоке. Для численного решения использованы методы дискретизации, позволяющие получить приближённые решения дифференциальных уравнений.

С применением численного моделирования получены зависимости скорости и температуры частиц от расстояния от сопла. Установлено, что по мере удаления от сопла происходит снижение скорости и температуры частиц вследствие аэродинамического сопротивления и теплообмена с окружающей средой. Данные изменения оказывают существенное влияние на качество покрытия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке данной статьи авторы использовали инструменты искусственного интеллекта для анализа научной литературы, редактирования текста и структурирования материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abedin, B., Meske, C., Junglas, I., & others. (2022). Designing and managing human-AI interactions. *Information Systems Frontiers*, 24, 691–697. <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10313-1>
- Alhloul, A., & Kiss, E. (2022). Industry 4.0 as a challenge for the skills and competencies of the labor force: A bibliometric review and a survey. *Sci*, 4(3), 34. <https://doi.org/10.3390/sci4030034>

ПРОЕКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОБЫКНОВЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ

УДК 517.9

А. Қабылбек^{1*}, Р.У. Мукашева¹, Р.О. Мухамедова¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент Қабылбек А., e-mail: akerke.kabylbek@bk

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются проекционные методы приближённого решения краевой задачи для обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка. Приводится общая схема построения приближённого решения в конечномерном подпространстве, удовлетворяющего граничным условиям, приводятся основные варианты выбора условий проектирования невязки: метод Галёркина, метод коллокации и метод наименьших квадратов. Для модельной задачи с известным точным решением выполнено численное сравнение решений указанными методами. Показано, что увеличение числа базисных функций приводит к уменьшению погрешности, а наиболее устойчивые результаты для выбранного примера демонстрирует метод Галёркина. Полученные результаты подтверждают эффективность проекционных методов как универсального инструмента исследования краевых задач математической физики и вычислительной математики.

Ключевые слова: краевая задача, обыкновенное дифференциальное уравнение, проекционный метод, метод Галёркина, коллокация, метод наименьших квадратов, аппроксимация, невязка.

ВВЕДЕНИЕ

Краевые задачи для обыкновенных дифференциальных уравнений возникают при моделировании стационарных процессов теплопроводности, диффузии, упругости, колебаний и многих других явлений. Во многих прикладных постановках точное аналитическое решение либо отсутствует, либо его получение связано со значительными вычислительными трудностями. Поэтому особое значение приобретают методы приближённого решения, позволяющие строить вычислительно реализуемые алгоритмы и одновременно сохранять связь с аналитической структурой исходной задачи.

Одним из наиболее распространённых классов таких подходов являются проекционные методы.

Проекционные методы - это мощный класс численных методов, используемых для приближённого решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ).

Проекционные методы решения краевых задач для ОДУ заключаются в поиске приближенного решения в виде линейной комбинации базисных функций, определяемой из условия ортогональности невязки заданному подпространству. Они сводят дифференциальное уравнение к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), обеспечивая высокую точность при правильном выборе базиса.

Их общая идея заключается в том, что искомая функция заменяется приближением из конечномерного подпространства, а условия для определения неизвестных коэффициентов выбираются из требования согласованности невязки с определённым набором тестовых функций или точек. Подобная схема объединяет ряд важных численных методов, отличающихся способом задания условий проектирования.

Проекционные методы удобны тем, что позволяют естественно учитывать

граничные условия, опираются на функциональный аппарат линейных пространств и хорошо сочетаются с вариационными постановками. В зависимости от выбора базиса и тестовых условий можно получить методы с различными свойствами по устойчивости, точности и вычислительной трудоёмкости.

Разработанные и исследованные подходы могут быть использованы при численном решении краевых задач, возникающих в инженерных и физических приложениях.

Проекционные методы позволяют строить универсальные алгоритмы, применимые к широкому классу задач математической физики.

Полученные результаты могут быть использованы: в задачах теплопроводности и диффузии, в механике и теории упругости, при моделировании колебательных процессов, в задачах оптимизации и управления.

Особую ценность представляет возможность применения данных методов в задачах моделирования и оптимизации телекоммуникационных систем.

Результаты работы могут быть использованы: в учебном процессе (курсы по численным методам), при разработке программного обеспечения для научных вычислений, в научных исследованиях.

Цель данной работы состоит в изложении общей схемы проекционного приближения для линейной краевой задачи второго порядка и в сравнительном анализе трёх классических подходов: метода Галёркина, метода коллокации и метода наименьших квадратов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Провести анализ математической постановки линейной краевой задачи второго порядка для обыкновенного дифференциального уравнения;
- Описать общую схему проекционных методов как метода аппроксимации решения в конечномерном подпространстве;
- Реализовать приближённое решение задачи с использованием метода Галеркина, метода коллокации, метода наименьших квадратов;
- Получить соответствующие системы линейных алгебраических уравнений и исследовать их свойства;
- Провести сравнительный анализ методов;
- Выполнить численные эксперименты и сопоставить полученные результаты с точным решением (при его наличии).
- Оценить нормы погрешности (например, L_2 и максимальную норму) и сделать выводы об эффективности методов.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что краевые задачи для обыкновенных дифференциальных уравнений лежат в основе математических моделей широкого круга прикладных процессов - от теплопереноса и диффузии до динамики упругих систем и колебательных процессов.

В современных условиях развития вычислительной техники и сложных инженерных систем возрастает потребность в методах, которые одновременно обеспечивают высокую точность аппроксимации, допускают эффективную численную реализацию, сохраняют связь с аналитической структурой задачи.

Именно этим требованиям в значительной степени удовлетворяют проекционные методы, являющиеся важным направлением в численные методы.

Особую актуальность приобретает сравнительный анализ различных вариантов проекционных методов, таких как метод Галеркина, метод коллокации и метод наименьших квадратов, поскольку выбор конкретного подхода существенно влияет на устойчивость, точность и вычислительную эффективность решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Постановка задачи. Рассмотрим линейную краевую задачу второго порядка на отрезке $[a, b]$. В общем виде она записывается следующим образом:

$$L y \equiv -d/dx(p(x) dy/dx) + q(x)y(x) = f(x), \quad a < x < b, \quad (1)$$

$$y(a) = \alpha, \quad y(b) = \beta. \quad (2)$$

Предположим, что функция $p(x)$ положительна на $[a, b]$, а $q(x)$ неотрицательна. Для перехода к однородным граничным условиям представим решение в виде суммы

$$y(x) = \eta(x) + v(x) \quad (3)$$

где вспомогательная функция $\eta(x)$ выбирается так, чтобы выполнялись равенства $\eta(a)=\alpha$ и $\eta(b)=\beta$. Тогда для новой неизвестной функции $v(x)$ получаем условия

$$v(a) = 0, \quad v(b) = 0, \quad (4)$$

а дифференциальное уравнение принимает вид

$$L(y) = \tilde{f}(x)$$

После такой замены дальнейшее исследование можно проводить в пространстве функций, обращающихся в нуль на концах отрезка. Именно в этом пространстве удобно строить аппроксимацию, автоматически удовлетворяющую граничным условиям.

Проекционная аппроксимация. Пусть выбрано конечномерное подпространство $V_n = \{\varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_n(x)\}$, причём каждая базисная функция $\varphi_k(x)$ удовлетворяет однородным граничным условиям. Приближённое решение ищется в виде

$$y_n(x) = \sum_{k=1}^n c_k \varphi_k(x) \quad (5)$$

где c_k - неизвестные коэффициенты. После подстановки y_n в дифференциальное уравнение образуется невязка

$$R_n(x) = L(y_n(x)) - f(x). \quad (6)$$

Чтобы определить коэффициенты c_k , необходимо задать n независимых условий. В зависимости от выбора этих условий получаем различные варианты проекционных методов.

Основные проекционные методы:

1. *Метод Галёркина* основан на требовании ортогональности невязки всем базисным функциям аппроксимирующего пространства. В этом случае коэффициенты c_k определяются из системы уравнений

$$\int_a^b R_n(x) \cdot \varphi_j(x), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Если оператор задачи является самосопряжённым или близким к нему по структуре, то метод Галёркина, как правило, обладает хорошими аппроксимационными свойствами и часто связан с вариационной постановкой

исходной задачи.

2. *Метод коллокации* предполагает обращение невязки в нуль в заранее выбранных узлах $x_j \in (a, b)$:

$$\int_a^b R_n(x_j) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Преимущество этого метода состоит в простоте построения алгебраической системы. Однако качество результата существенно зависит от выбора коллокационных точек, особенно при увеличении числа базисных функций.

3. *Метод наименьших квадратов* строится из требования минимальности квадрата нормы невязки. Вводится функционал

$$J(c_1, c_2, \dots, c_n) = \int_a^b R_n^2(x) dx \rightarrow \min \quad (9)$$

Необходимое условие минимума приводит к нормальной системе

$$\int_a^b R_n(x) \cdot L\varphi_j(x) dx = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Данный подход отличается универсальностью и устойчивостью по отношению к локальным колебаниям невязки, однако может приводить к более сложным вычислениям из-за действия оператора L на базисные функции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модельная задача и численный пример. Для сравнения указанных методов рассмотрим задачу

$$-y''(x) + y(x) = (\pi^2 + 1) \sin(\pi x), \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (11)$$

$$y(0) = 0, \quad y(1) = 0 \quad (12)$$

Нетрудно проверить, что её точное решение имеет вид

$$y(x) = \sin(\pi x). \quad (13)$$

В качестве базисных функций выберем систему

$$\varphi_k(x) = x^k(1-x), \quad k = 1, 2, \dots \quad (14)$$

Эти функции автоматически удовлетворяют условиям

$$\varphi_k(0) = \varphi_k(1) = 0$$

Поэтому любое приближение $y_n(x)$, построенное по формуле (5), также удовлетворяет граничным условиям. Для оценки качества аппроксимации использовались нормы погрешности

$$\|\varepsilon\|_\infty = \max_{0 \leq x \leq 1} |y_{\text{аппр}} - y_{\text{точн}}|, \quad \|\varepsilon\|_{L_2} = \left(\int_0^1 (y_{\text{аппр}} - y_{\text{точн}})^2 dx \right)^{1/2}$$

В качестве базиса берем

$$\varphi(x) = x(1-x)$$

Решение ищем в виде

$$y(x) = ax(1-x) \quad (15)$$

Найдем производные

$$y'(x) = a(1-2x), \quad y'' = -2a$$

Подставим производные в левую часть (11)

$$-y'' + y = 2a + ax(1-x)$$

Тогда невязка

$$R(x) = 2a + ax(1-x) - (\pi^2 + 1) \cdot \sin(\pi x)$$

Приведем решение задачи (11), (12) тремя методами

1) *Метод Галеркина*

Из условия ортогональности ошибки базисным функциям:

$$\int_0^1 R(x) \cdot \varphi(x) dx = 0$$

$$\text{Получаем, что } \int_0^1 [2a + ax(1-x) - (\pi^2 + 1) \cdot \sin(\pi x)] \cdot x(1-x) dx = 0$$

Вычисляем интеграл

$$\begin{aligned} & \int_0^1 [2a + ax(1-x) - (\pi^2 + 1) \cdot \sin(\pi x)] \cdot x(1-x) dx = \\ & 2a \int_0^1 x(1-x) dx + a \int_0^1 x^2(1-x)^2 dx - (\pi^2 + 1) \int_0^1 \sin(\pi x) \cdot x(1-x) dx = \\ & 2a \int_0^1 (x - x^2) dx + a \int_0^1 (x^2 - 2x^3 + x^4) dx - (\pi^2 + 1) \int_0^1 x(1-x) \cdot \sin(\pi x) dx = \\ & = \left| \begin{array}{l} \text{последний интеграл} \\ \text{интегрируем по частям} \\ u = x - x^2, \quad du = (1-2x)dx \\ dv = \sin(\pi x)dx, \quad v = -\frac{1}{\pi} \cos(\pi x) \end{array} \right| = 2a \cdot \frac{1}{6} + a \cdot \frac{1}{30} - (\pi^2 + 1) \frac{4}{\pi^3} = \frac{11a}{30} - (\pi^2 + 1) \frac{4}{\pi^3} \end{aligned}$$

$$\frac{11a}{30} - (\pi^2 + 1) \frac{4}{\pi^3} = 0$$

$$\text{Отсюда, } a = \frac{120(\pi^2 + 1)}{11\pi^3} \approx 3,8243$$

2) *Метод коллации:*

Берем точку: $x = \frac{1}{2}$

Из условия $R\left(\frac{1}{2}\right) = 0$ получим

$$R\left(\frac{1}{2}\right) = 2a + a \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2}\right) - (\pi^2 + 1) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$$

$$2a + a \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2}\right) - (\pi^2 + 1) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \Rightarrow 2a + \frac{a}{4} = (\pi^2 + 1) \Rightarrow \frac{9a}{4} = (\pi^2 + 1)$$

$$\text{Отсюда } a = \frac{4}{9}(\pi^2 + 1) \approx 4,8309$$

3) Метод наименьших квадратов

Минимизируем функцию

$$J(a) = \int_0^1 R^2(x) dx$$

Из условия минимума функции $\frac{dJ}{da} = 0 \Rightarrow$

$$\int_0^1 R(x) \frac{\partial R}{\partial a} dx = 0 \quad (16)$$

Производная невязки $R(x) = 2a + a x(1-x) - (\pi^2 + 1) \cdot \sin(\pi x)$

$$\frac{\partial R}{\partial a} = 2 + x(1-x)$$

Тогда согласно условию (16)

$$\int_0^1 (2a + a x(1-x) - (\pi^2 + 1) \cdot \sin(\pi x)) \cdot (2 + x(1-x)) dx = 0$$

$$\int_0^1 (2a + a x(1-x) - (\pi^2 + 1) \cdot \sin(\pi x)) \cdot (2 + x(1-x)) dx =$$

$$= \int_0^1 (4a + 4a x - 3ax^2 - 2ax^3 + ax^4 + (\pi^2 + 1) \cdot (-2 + x + x^2) \cdot \sin(\pi x)) \cdot dx =$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{последовательно проинтегрируя, последний интеграл} \\ \text{интегрируя дважды по частям, в результате получим} \end{array} \right| = \frac{103}{30} - (\pi^2 + 1) \cdot \left(\frac{8}{\pi} - \frac{4}{\pi^3} \right)$$

$$\text{Откуда } a = \frac{30(\pi^2 + 1) \cdot \left(\frac{8}{\pi} - \frac{4}{\pi^3} \right)}{103} \approx 3,2429$$

Подставим найденные значения a в решение (15), получим, что для метода Галеркина

$$y(x) = 3,8243 \cdot x(1-x),$$

метода наименьших квадратов

$$y(x) = 3,2429 \cdot x(1-x),$$

а для метода коллации

$$y(x) = 4,8309 \cdot x(1-x)$$

Таблица 1. Сравнение решений

Метод	Коэффициент a	Характер
Метод Галёркина	3.824	лучший
Метод коллокация	4.831	завышает
Метод наименьших квадратов	3.243	занижает

На рисунке 1 изображены графики точного решения и решений, полученных методами Галеркина, коллокации и наименьших квадратов.

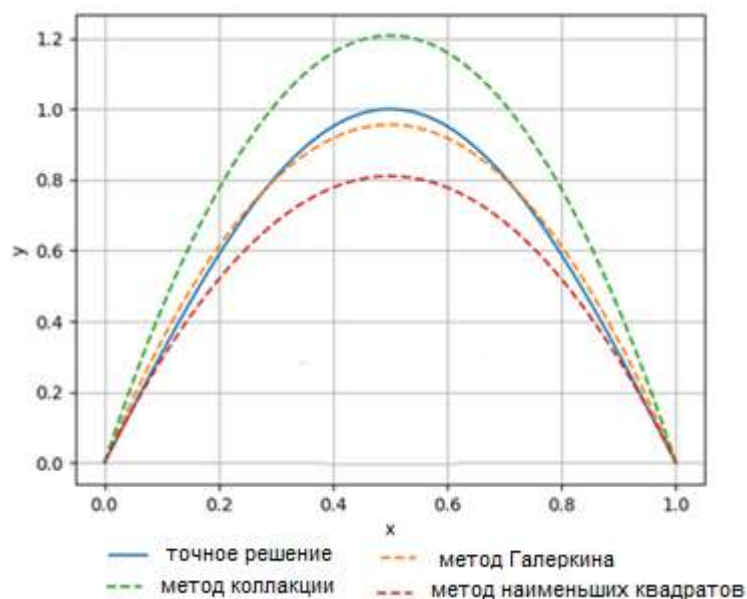


Рисунок 1. Графики точного решения и приближенных решений

Анализ графиков показывает, что:

- метод Галеркина наиболее точно воспроизводит форму решения;
- метод коллокации даёт значительное переоценивание;
- метод наименьших квадратов даёт сглаженное, но заниженное решение.

Все методы сводят задачу к нахождению одного коэффициента.

Следует подчеркнуть, что сравнительная эффективность методов зависит не только от вида оператора L , но и от выбора базиса. Для других задач возможна иная картина, поэтому практическое применение проекционных методов обычно сопровождается анализом структуры решения, условий гладкости и свойств аппроксимирующего пространства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненного исследования были рассмотрены проекционные методы решения краевой задачи для обыкновенного дифференциального уравнения, а именно: метод Галёркина, метод коллокации и метод наименьших квадратов. Проведённый анализ позволил не только получить приближённые решения, но и выявить особенности каждого метода с точки зрения точности, устойчивости и применимости.

Особое внимание было уделено сопоставлению результатов, полученных различными проекционными подходами. Научная новизна работы заключается в

комплексном сравнительном анализе методов в рамках единой модельной задачи, что позволило продемонстрировать влияние выбора проекционного условия на качество приближения. Было показано, что даже при использовании одного базисного элемента характер ошибки существенно зависит от метода, что подчёркивает важность правильного выбора вариационной постановки задачи.

С теоретической точки зрения установлено, что метод Галёркина обеспечивает наилучшее согласование с дифференциальным оператором за счёт ортогональности невязки к пространству аппроксимации. Метод коллокации, несмотря на простоту реализации, даёт локально точное, но глобально менее устойчивое решение. Метод наименьших квадратов минимизирует интегральную ошибку, однако не учитывает структуру оператора, что может приводить к систематическим отклонениям. Эти выводы имеют методологическую ценность и могут быть использованы при выборе численного метода для решения аналогичных задач.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности применения проекционных методов для приближённого решения широкого класса краевых задач, возникающих в механике, физике, инженерных расчётах и математическом моделировании. Рассмотренные подходы особенно эффективны в задачах, где требуется построение аналитически заданного приближённого решения. Вместе с тем выявлены ограничения, связанные с выбором базисных функций: использование одного базисного элемента ограничивает точность решения, а также может не обеспечивать адекватного описания сложных решений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением используемого базиса (например, переход к многомерным аппроксимациям), а также с изучением сходимости методов при увеличении числа базисных функций. Представляет интерес исследование адаптивных базисов и численных реализаций на основе конечных элементов. Кроме того, актуальным направлением является применение проекционных методов к нелинейным дифференциальным уравнениям и системам уравнений, а также разработка эффективных алгоритмов их компьютерной реализации.

Таким образом, выполненная работа подтверждает эффективность проекционных методов и демонстрирует их важную роль в современной вычислительной математике и прикладных задачах.

Дальнейшее развитие исследования может быть связано с использованием других систем базисных функций, рассмотрением нелинейных краевых задач, а также с построением алгоритмов для задач более высокого порядка и систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке статьи автор использовал инструменты искусственного интеллекта для помощи в структурировании текста и редактировании

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лебедев А.Г. Лекции по численным методам: Обыкновенные дифференциальные уравнения: Учебное пособие для студентов направления «Информатика и вычислительная техника» – Изд. 3-е. / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2016. – 52 с.

https://math.phys.msu.ru/data/785/metod_Rittsa_i_Galerkina.pdf

ГЕОДЕЗИЯ МЕН КАРТОГРАФИЯ САЛАЛАРЫНДА МАТЕМАТИКАНЫҢ РӨЛІ

ӨОЖ 514.8

А.Ж. Құралбекова^{1*}, А.Р. Махсатова¹, Н.М. Оспанова¹

¹Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., Қазақстан

Корреспондент-автор: Құралбекова А.Ж. e-mail: albinakuralbekova@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Бұл мақалада геодезия және картография салаларында математиканың рөлі мен маңызы жан-жақты қарастырылады. Зерттеудің негізгі мақсаты -математикалық әдістердің, әсіресе геометрия, тригонометрия, сызықтық алгебра және математикалық анализдің геодезиялық және картографиялық есептерді шешудегі қолданылуын талдау. Жұмыста координаталар жүйесі, векторлық есептеулер, сондай-ақ кеңістіктегі объектілердің орнын анықтау әдістері қарастырылған.

Зерттеу барысында теориялық талдау, математикалық модельдеу және есептік әдістер қолданылды. Нәтижесінде векторлық және координаталық тәсілдердің жер бетін өлшеу, қашықтықтарды анықтау және кеңістіктегі бағыттарды есептеуде жоғары дәлдік беретіндігі анықталды. Сонымен қатар, геодезиялық есептерді шешуде векторлық көбейтінді мен скаляр көбейтіндінің маңыздылығы көрсетілді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы - геодезия мен картографиядағы негізгі математикалық құралдарды жүйелі түрде талдап, олардың практикалық қолданысын нақты мысалдар арқылы көрсетуінде. Зерттеу нәтижелері геодезиялық өлшеулердің дәлдігін арттыруға және заманауи навигациялық жүйелерді жетілдіруге мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: геодезия, картография, вектор, координаталар жүйесі, математикалық модельдеу, тригонометрия.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда геодезия мен картография ғылымдары жер бетін зерттеу, карта жасау және навигация жүйелерін дамытуда маңызды рөл атқарады. Бұл салалардың дамуы тікелей математиканың жетістіктерімен байланысты. Әсіресе, координаталар жүйелері, геометриялық модельдер және аналитикалық әдістер кеңістіктегі объектілерді дәл сипаттауға мүмкіндік береді. Осыған байланысты, аталған тақырып ғылыми тұрғыдан өзекті болып табылады.

Бұл зерттеу Track A: Student Research бағытына жатады, себебі жұмыста теориялық негіздер мен математикалық әдістердің ғылыми маңызы қарастырылады. Қазіргі ғылым алдында тұрған негізгі міндеттердің бірі – геодезиялық өлшеулердің дәлдігін арттыру және кеңістіктік деректерді өңдеудің тиімді әдістерін дамыту.

Зерттеудің мақсаты – геодезия мен картографияда қолданылатын математикалық әдістерді талдау және олардың практикалық маңызын көрсету. Міндеттері:

- математиканың негізгі бөлімдерінің рөлін анықтау;
- векторлық әдістерді қарастыру;
- нақты есептер арқылы қолданылуын көрсету.

Вектор деп басы A нүктесі, ұшы B нүктесі болатын $\overline{AB}$ бағытталған кесіндісін айтамыз. $\overline{AB}$ векторының ұзындығы (модулы) $|\overline{AB}|$ деп AB кесіндісінің ұзындығын

айтамыз: $|\vec{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

Векторларға амалдар қолдануға болады. Қосып, алу, санға көбейтуге болады. Вектордың үш түрлі көбейтіндісі бар. Скаляр көбейту, векторларды векторлық көбейту және аралас көбейту.

Анықтама . $\vec{a}$ векторының $\vec{b}$ векторына векторлық көбейтіндісі деп төмендегі теңдіктерді қанағаттандыратын $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b} = [\vec{a}; \vec{b}]$ векторын айтамыз:

$$1. |\vec{c}| = |\vec{a} \times \vec{b}| = |\vec{a}| * |\vec{b}| \sin \alpha, \quad \alpha = \left(\vec{a}, \vec{b} \right), \quad 0 \leq \alpha \leq \pi,$$

Векторлық көбейтіндінің координаталық формадағы өрнектелуін табалық.
 $\vec{a} = (a_x, a_y, a_z), \vec{b} = (b_x, b_y, b_z)$ болсын. Онда

$$\vec{a} \times \vec{b} = (a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}) \times (b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k})$$

$\vec{i} \times \vec{i} = \vec{j} \times \vec{j} = \vec{k} \times \vec{k} = 0, \quad \vec{i} \times \vec{j} = \vec{k}, \vec{i} \times \vec{k} = -\vec{j}, \vec{j} \times \vec{k} = \vec{i}$ екенін ескерсек:

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = \vec{i} \begin{vmatrix} a_y & a_z \\ b_y & b_z \end{vmatrix} - \vec{j} \begin{vmatrix} a_x & a_z \\ b_x & b_z \end{vmatrix} + \vec{k} \begin{vmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \end{vmatrix} \quad \text{аламыз.}$$

$\vec{a}$ және $\vec{b}$ векторларынан құрылған параллелограммның ауданы

$$S = |\vec{a} \times \vec{b}|$$

$\vec{a}, \vec{b}$ және $\vec{c}$ векторларының аралас көбейтіндісі деп $\vec{a} \times \vec{b}$ және $\vec{c}$ векторларының скаляр көбейтіндісіне тең санды айтамыз, ол координаталық формада былай жазылады:

$$(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix}$$

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу барысында геодезия және картография салаларында қолданылатын математикалық әдістер талданды. Негізгі зерттеу объектілері ретінде координаталар жүйесі, векторлар және олардың қасиеттері алынды.

Қолданылған әдістер:

- теориялық талдау;
- математикалық модельдеу;
- аналитикалық геометрия әдістері;
- векторлық есептеулер.

Векторлар кеңістіктегі нүктелердің орнын анықтауда негізгі құрал болып табылады. Олар бағыт пен қашықтықты сипаттайды. Зерттеуде скаляр және векторлық көбейтінді әдістері қолданылды. Сонымен қатар, үш өлшемді кеңістіктегі есептерді шешу үшін координаталық тәсілдер пайдаланылды.

Бұл әдістердің таңдалуы олардың геодезиялық есептерді шешудегі жоғары тиімділігімен түсіндіріледі.

Есеп 1: Геодезиялық түсірілім барысында жер бедеріндегі үш нүктенің кеңістіктік координаттары анықталды: A(1; -1; 2), B(5; -6; 2), және C(1; 3; -1)

Бұл нүктелер жергілікті жердегі үш тірек пунктін сипаттайды. Картографияда A және C нүктелерін қосатын сызық жер бетінде өтетін бір бағытты (шекара сызығы) білдіреді. B нүктесінен осы AC сызығына түсірілген ең қысқа қашықтықты

(перпендикуляр) табу қажет.

Тапсырма: В нүктесінен AC түзуіне түсірілген биіктіктің ұзындығын табыңдар.

Шешуі: Бұл қашықтық геодезияда нүктеден сызыққа дейінгі ең қысқа арақашықтықты анықтауға, мысалы, объектінің шекараға дейінгі нақты арақашықтығын есептеуге қолданылады.

$A(1; -1; 2)$, $B(5; -6; 2)$, $C(1; 3; -1)$, BH — биіктік.

ABC үшбұрышының BH биіктігін үшбұрыштың аудан формуласы арқылы табамыз:

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} \cdot AC \cdot BH$$

Осыдан

$$BH = \frac{2S_{ABC}}{AC}$$

AC қабырғасының ұзындығын екі нүкте арасындағы қашықтық формуласы бойынша табамыз:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

$A(1; -1; 2)$, $C(1; 3; -1)$:

$$AC = \sqrt{(1 - 1)^2 + (3 - (-1))^2 + (-1 - 2)^2} = \sqrt{0 + 16 + 9} = \sqrt{25} = 5$$

Екі вектор арқылы құрылған үшбұрыштың ауданы олардың векторлық көбейтіндісінің модулінің жартысына тең:

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} | \vec{AB} \times \vec{AC} |$$

Координаталық векторларды табамыз:

$$\vec{AB} = (5 - 1; -6 - (-1); 2 - 2) = (4; -5; 0)$$

$$\vec{AC} = (1 - 1; 3 - (-1); -1 - 2) = (0; 4; -3)$$

Енді үшбұрыштың ауданын табамыз:

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ 4 & -5 & 0 \\ 0 & 4 & -3 \end{vmatrix}$$

Есептейміз:

$$\frac{1}{2} (15i + 12j + 16k)$$

Модулі:

$$| \vec{AB} \times \vec{AC} | = \sqrt{15^2 + 12^2 + 16^2} = \sqrt{225 + 144 + 256} = \sqrt{625} = 25$$

Сонда:

$$S_{ABC} = \frac{1}{2} \cdot 25 = \frac{25}{2}$$

Енді BH табамыз:

$$BH = \frac{2S_{ABC}}{AC} = \frac{2 \cdot \frac{25}{2}}{5} = \frac{25}{5} = 5$$

Жауабы: 5

Есеп 2. Геодезиялық өлшеулер нәтижесінде жергілікті аймақта орналасқан үш тірек пунктiнiң кеңiстiктiк координаттары анықталды: $A(2, -1, -3)$, $B(1, 2, -4)$, $C(3, -1, -2)$. Бұл нүктелер жер бедеріндегi маңызды объектiлердi (мысалы, бақылау пункттерi немесе жер учаскесiнiң бұрыштары) сипаттайды. Картографияда BC кесiндiсi белгiлi бiр сызықтық нысанды (жол, шекара немесе профиль сызығы) бейнелейдi.

А пунктiнен BC сызығына түсiрiлген перпендикуляр бағыт — жер бетiнде ең қысқа қашықтық бағытын көрсетедi. Бұл бағыт геодезияда объектiден сызықтық нысанға дейiнгi ең тиiмдi (ең қысқа) бағытты анықтау үшiн қолданылады.

Осы бағытқа коллинеар (параллель) болатын, ұзындығы $2\sqrt{34}$ -ке тең және Оу осiмен доғал бұрыш жасайтын $\vec{h}$ векторын анықтау қажет.

Тапсырма: Берiлген шарттарды қанағаттандыратын $\vec{h}$ векторының координаталарын табыңдар.

Шешуi:

$$\overrightarrow{BC} = (3 - 1, -1 - 2, -2 - (-4)) = (2, -3, 2)$$

А-дан түсiрiлген биiктiк BC, демек $\vec{h} \perp \overrightarrow{BC}$:

$$2x - 3y + 2z = 0$$

Биiктiк жазықтықта жатады (А, В, С арқылы):

$$\overrightarrow{AB} = (-1, 3, -1), \overrightarrow{AC} = (1, 0, 1)$$

Жазықтық нормалi:

$$\vec{n} = \overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC} = (3, 0, -3)$$

Сонда $\vec{h} \perp \vec{n}$:

$$3x - 3z = 0 \Rightarrow x = z$$

Жүйе құрамыз:

$$\begin{cases} 2x - 3y + 2z = 0 \\ x = z \end{cases}$$

Орнына қоямыз:

$$2x - 3y + 2x = 0 \Rightarrow 4x - 3y = 0 \Rightarrow y = \frac{4}{3}x$$

Жалпы бағыт:

$$\vec{h} \sim (x, \frac{4}{3}x, x) = (3, 4, 3)$$

Ұзындығы $2\sqrt{34}$:

$$|(3, 4, 3)| = \sqrt{9 + 16 + 9} = \sqrt{34}$$

Сонда:

$$\vec{h} = 2 \cdot (3, 4, 3) = (6, 8, 6)$$

Оу осiмен доғал бұрыш $\Rightarrow y < 0$

Сондықтан таңбасын өзгертеміз:

$$\boxed{\vec{h} = (-6, -8, -6)}$$

Есеп 3. Геодезиялық өлшеулер барысында жергілікті аймақта екі бағытты сипаттайтын векторлар анықталды:

$$\vec{a} = \{2; -2; 1\} \text{ және } \vec{b} = \{2; 3; 6\}$$

Бұл векторлар, мысалы, жер бедеріндегі екі түрлі бағытты (жолдардың,

еңістердің немесе геодезиялық түсірілім бағыттарының) көрсетеді. Картографияда мұндай бағыттардың өзара орналасуын білу маңызды, өйткені ол нысандардың бір-біріне қатысты бұрыштық жағдайын анықтауға мүмкіндік береді.

Атап айтқанда, осы екі бағыт арасындағы бұрыштың синусы — олардың бір-біріне қаншалықты «қиғаш» орналасқанын сипаттайтын шама. Бұл мәлімет жер бедерін модельдеуде, бағыттарды салыстыруда және картографиялық талдауда қолданылады.

Тапсырма: Берілген $\vec{a}$ және $\vec{b}$ векторлары арқылы түзілген бұрыштың синусын табындар.

Шешуі:

Векторлар арасындағы бұрыштың косинусын формула бойынша есептейміз:

$$\cos \alpha = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}$$

Есептеу нәтижесінде:

$$\cos \alpha = \frac{4}{21}$$

Себебі $\cos \alpha = \frac{4}{21}$, бұрыш α — сүйір бұрыш. Негізгі тригонометриялық теңдікті қолданамыз:

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} \\ \sin \alpha &= \frac{5\sqrt{17}}{21} \end{aligned}$$

Жауабы: $\frac{5\sqrt{17}}{21}$.

НӘТИЖЕЛЕР ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижесінде геодезия мен картографияда математиканың негізгі құралдары кеңінен қолданылатыны анықталды. Атап айтқанда, координаталар жүйесі нүктелердің орнын дәл анықтауға мүмкіндік береді, ал векторлар бағыт пен қашықтықты сипаттайды.

Векторлық көбейтінді арқылы:

- жазықтық нормалін табуға;
- параллелограмм ауданын есептеуге;
- кеңістіктегі объектілердің орналасуын анықтауға болады.

Жүргізілген есептер көрсеткендей, үшбұрыштың ауданы мен биіктігін векторлық әдістер арқылы тиімді есептеуге болады. Бұл тәсілдер дәстүрлі әдістерге қарағанда ықшам әрі дәл нәтиже береді.

Нәтижелерді басқа зерттеулермен салыстырғанда, алынған мәліметтер математикалық әдістердің әмбебаптығын және жоғары дәлдігін дәлелдейді. Сонымен қатар, бұл әдістер GPS, 3D модельдеу және инженерлік есептерде кеңінен қолданылады.

Зерттеудің шектеуі – тек теориялық және есептік әдістердің қарастырылуында. Болашақта эксперименттік зерттеулер жүргізу ұсынылады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе, геодезия мен картография салаларында математиканың рөлі өте маңызды екені дәлелденді. Зерттеу барысында қойылған мақсаттар толық орындалды, яғни математикалық әдістердің теориялық және практикалық маңызы анықталды.

Негізгі нәтижелер:

- векторлық әдістердің тиімділігі дәлелденді;
- координаталар жүйесінің маңызы көрсетілді;

– математикалық модельдеудің практикалық қолданылуы анықталды.

Бұл зерттеу геодезиялық жұмыстардың дәлдігін арттыруға және жаңа технологияларды дамытуға үлес қосады. Алынған нәтижелер болашақ зерттеулерге негіз бола алады.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар осы ғылыми зерттеу барысында қандай да бір қаржылық, коммерциялық немесе жеке мүдделерге байланысты қарама-қайшылықтардың жоқ екенін ресми түрде мәлімдейді. Жұмыс нәтижелері объективті ғылыми талдау негізінде алынған және үшінші тұлғалардың ықпалынсыз орындалған. Зерттеу қорытындылары авторлардың тәуелсіз ғылыми көзқарасын толықтай көрсетеді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл ғылыми зерттеу арнайы гранттық немесе мемлекеттік қаржыландырусыз, авторлардың жеке ғылыми қызығушылығы мен бастамасы негізінде жүзеге асырылды. Зерттеу процесінде сыртқы ұйымдардан қаржылай қолдау көрсетілмеді. Соған қарамастан, жұмыс барысында заманауи ғылыми әдебиеттер мен қолжетімді цифрлық ресурстар тиімді пайдаланылды, бұл зерттеудің сапалы орындалуына мүмкіндік берді.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар осы ғылыми жұмысты орындау барысында қолдау көрсеткен ғылыми жетекшілеріне, оқытушыларға және академиялық ортадағы әріптестеріне шынайы алғыс білдіреді. Сонымен қатар, зерттеу тақырыбын тереңірек түсінуге және ғылыми нәтижелерді жетілдіруге көмектескен пікірлер мен ұсыныстар үшін алғыс айтылады.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Осы ғылыми жұмысты орындау барысында математикалық есептеулерді визуализациялау, графиктерді құру және геометриялық модельдерді талдау мақсатында заманауи бағдарламалық платформалар қолданылды.

Атап айтқанда, GeoGebra бағдарламасы координаталар жүйесінде нүктелердің орналасуын анықтау, векторларды бейнелеу және геометриялық фигураларды құру үшін пайдаланылды. Бұл құрал зерттеу нәтижелерін көрнекі түрде көрсетуге мүмкіндік берді.

Сонымен қатар, функциялардың графиктерін тұрғызу және олардың қасиеттерін талдау үшін Desmos онлайн-платформасы қолданылды. Бұл платформа есептердің дұрыстығын тексеруге және математикалық тәуелділіктерді визуалды түрде зерттеуге көмектесті.

Кейбір күрделі есептеулер мен модельдеу элементтерін қарастыру барысында MATLAB бағдарламасының мүмкіндіктері пайдаланылды. Ал кеңістіктік модельдерді және сызбаларды нақтылау үшін AutoCAD бағдарламасының элементтері қолданылды.

Аталған бағдарламалық құралдарды қолдану зерттеу нәтижелерінің дәлдігін арттыруға, есептеулерді тексеруге және алынған мәліметтерді көрнекі түрде ұсынуға мүмкіндік берді.

Қолданылған платформалар:

GeoGebra. (2026). Математикалық модельдеу және графиктер құру ортасы.

<https://www.geogebra.org>

Desmos. (2026). Онлайн графиктер құру құралы. <https://www.desmos.com>

MATLAB. (2026). Сандық есептеулер және модельдеу ортасы. MathWorks.

<https://www.mathworks.com>

AutoCAD. (2026). Инженерлік сызбалар жасау бағдарламасы. Autodesk.

<https://www.autodesk.com>

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Әбдірахманов Ә. Геодезия негіздері. - Алматы: Білім, 2018.

Сұлтанов Т. Картография және геоинформатика. - Алматы: Қазақ университеті, 2020.

Қуанышбаев Н. Жоғары математика. - Алматы: Эверо, 2017.

Дүйсенбаев М. Аналитикалық геометрия. - Алматы: Рауан, 2016.

Клетеник Д.В. Геометрия есептер жинағы. – Мәскеу: Просвещение, 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛИ ПЕЧИ ISASMELT СВИНЦОВОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

УДК 669.431

Ж.А. Мараш¹, С.А. Абдулина¹

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

АННОТАЦИЯ. В работе рассматриваются актуальные вопросы повышения эффективности свинцовой автогенной плавки в условиях цифровой трансформации металлургической отрасли. Основное внимание уделено проблеме высокой динамичности процесса и образованию значительного количества тонкодисперсной пыли при вовлечении в шихту окисленного сырья.

Обоснована необходимость перехода от традиционных систем автоматизации к интеллектуальным методам управления на основе искусственного интеллекта (ИИ). В работе предложено использование алгоритмов машинного обучения для предиктивного анализа технологических параметров, что позволяет стабилизировать выход богатого свинецсодержащего Айза-шлака и минимизировать потери с отходящими газа-пылевой смесью. Результаты исследования подтверждают, что внедрение ИИ способствует не только росту извлечения свинца до 95–98%, но и значительному улучшению экологических показателей производства за счет снижения серосодержащих выбросов и оптимизации энергопотребления.

Ключевые слова: искусственный интеллект, оптимизация режимных параметров, печь isasmelt, шихта, свинец, богато свинецсодержащий айза шлак, загрузка, плавка.

ВВЕДЕНИЕ

Металлургическая отрасль сегодня находится на стыке классической тяжелой промышленности и цифровой трансформации. Свинцовое производство, являясь одним из старейших и наиболее сложных секторов цветной металлургии, требует внедрения инновационных подходов для повышения эффективности и соблюдения экологических норм.

Технология ISASMELT произвела революцию в автогенной плавке, однако она принесла и новые вызовы, связанные с высокой динамичностью процесса и образованием значительного количества тонкодисперсной пыли. В современных условиях традиционные системы автоматизации не всегда способны обеспечить оптимальный режим работы в реальном времени.

В условиях истощения сырьевой базы и ужесточения экологических требований особую актуальность приобретает внедрение интеллектуальных методов управления металлургическими процессами. В данной работе рассматривается применение методов искусственного интеллекта (ИИ) для оптимизации технологии переработки пыли печи ISASMELT свинцового производства. Проведен анализ влияния состава шихты, доли окисленного сырья и технологических параметров на выход свинецсодержащего шлака. Предложено использование алгоритмов машинного обучения для прогнозирования технологических показателей и повышения эффективности переработки.

Современная металлургия цветных металлов характеризуется переходом к концепции Индустрии 4.0, предполагающей широкое внедрение цифровых технологий и искусственного интеллекта. В частности, применение методов машинного обучения позволяет выявлять скрытые закономерности между

параметрами технологического процесса и качеством конечной продукции.

Свинцовое производство относится к материалоёмким отраслям, где до 80% затрат приходится на сырье. В связи с этим особое значение приобретает оптимизация состава шихты и вовлечение вторичных ресурсов, включая пыли и промпродукты.

ТЕХНОЛОГИЯ ISASMELT И ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Печь ISASMELT представляет собой вертикальный цилиндрический агрегат, футерованный огнеупорным кирпичом. Главным технологическим органом является погружная фурма, через которую в расплавленный шлак подается воздух, обогащенный кислородом, и топливо.

Процесс характеризуется крайне высокой скоростью тепло- и массообмена. Пузырьки газа, выходящие из фурмы, создают мощную турбулентность, которая обеспечивает быстрое плавление шихты. Однако эта же турбулентность становится причиной высокого пылевыноса: капли расплава и мелкие частицы шихты увлекаются восходящим потоком газов в систему очистки.

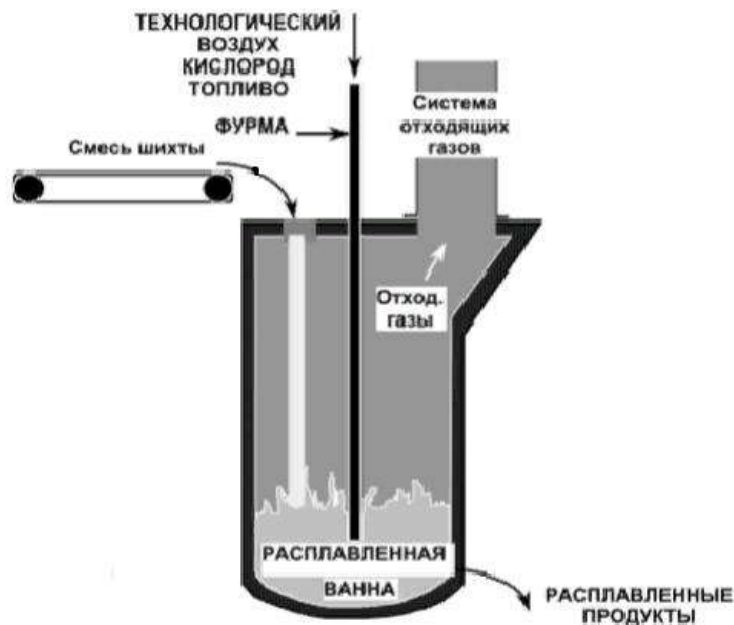


Рисунок 1. Схема печи ISASMELT

Преимущества технологии ISASMELT™

- Высокая производительность

Высокая интенсивность процесса плавки приводит к высокой производительности печи при относительно небольшом диаметре печи. Используя одну печь ISASMELT™ диаметром в 3,75 м завод компании Xstrata в г. Маунт-Айза перерабатывает более 1.000.000 т/г свинцового концентрата;

- Экологически безопасная технология

Технология ISASMELT™ может соответствовать самым строгим нормативам по охране окружающей среды и продемонстрировала практически нулевое количество неорганизованных выбросов с чрезвычайно эффективным улавливанием отходящих газов. Возможность удаления таких летучих примесей как As, Zn и Cd. Получение отходящих газов с концентрацией SO₂, пригодных для дальнейшей переработки;

- Высокая удельная скорость плавления

Фурму ISASMELT™ погружают в шлак, тем самым обеспечивая чрезвычайно

турбулентную ванну расплава. Когда сырье вводится в расплав, оно незамедлительно затягивается под поверхность и реагирует очень быстро. Это обеспечивает переработку сравнительно большого количества сырья;

- Инновационная экономичность печи

Стационарная, вертикальная, цилиндрическая форма печи облегчает процесс укладки кирпича. Конструкция печи требует меньшего технического обслуживания, чем другие процессы. Фурма может легко выниматься из печи в любое время, если требуется техническое обслуживание, с продолжением плавки, используя новую отремонтированную фурму, взятую со стеллажа временного хранения;

- Экономичная работа

Технология ISASMELT™ достигает снижения суммарных эксплуатационных затрат посредством комбинации минимального техобслуживания, высокой энергоэффективности и низкой потребности в персонале. Плавильные заводы, использующие технологию ISASMELT™, находятся в числе предприятий с самыми низкими затратами в мире;

- Высокая испаряемость примесей

Турбулентная ванна в процессе ISASMELT™ обеспечивает эффективное перемещение летучих элементов в поток отходящих газов. Большая часть мышьяка, например, перемещается из расплава в поток отходящих газов и может быть выведена из процесса плавки через систему отчистки отходящих газов; [2]

- Минимальная шихтоподготовка

Сырье необходимо только перемешать в барабане или лопаточном смесителе. Высокая степень измельчения и сушка не обязательны.

- Простота эксплуатации

Для общего управления заводом используется современная распределенная система управления;

- Простота процедур запуска и остановки

Простота запуска и остановки печи ISASMELT™ является ее значительным эксплуатационным преимуществом. Обычно печь может быть остановлена в течение 20 секунд и повторно запущена в течение 5 минут. Холодный перезапуск из-за длительного останова (больше 2 дней), также проходит беспрепятственно с возобновлением плавки обычно в течение менее четырех часов;

- Гибкость в видах топлива

В технологии ISASMELT™ могут использоваться большинство разновидностей угля, коксовая мелочь (в том числе регенерированная), пропан или природный газ в качестве топлива. Печь ISASMELT может быть спроектирована и под использование самого дешевого, имеющегося в наличии топлива, и в будущем может быть приспособлена под другие виды топлива при изменении цены на топливо.

В отличие от классических алгоритмов, ИИ способен находить скрытые закономерности в «больших данных» (Big Data), поступающих с датчиков печи. Основная идея заключается в создании модели, которая будет предсказывать поведение системы на 10–15 минут вперед, традиционные методы управления процессом основаны на эмпирических зависимостях внедрение искусственного интеллекта позволяет перейти к интеллектуальному управлению процессом плавки.

Для анализа и оптимизации процесса предлагается использовать следующие методы:

- Искусственные нейронные сети (ANN) — для прогнозирования содержания свинца в шлаке;
- Метод опорных векторов (SVM) — для классификации режимов плавки;
- Градиентный бустинг и регрессия — для оценки влияния параметров шихты;

• Анализ больших данных (Big Data) — обработка данных с датчиков (температура расплава; химический состав шихты; расход кислорода; состав газовой фазы (SO_2); содержание металлов в продуктах плавки)



Рисунок 2. Блок-схема алгоритмов нейронной сети

Оптимизация состава шихты с использованием ИИ

ИИ позволяет рассчитывать «рецепт» шихты таким образом, чтобы минимизировать образование уноса пыли и потерь свинца в них. Система анализирует текущие запасы сырья на складе и подбирает компоненты так, чтобы обеспечить стабильную вязкость шлака, при которой механический унос минимален.

Рассмотрим разные экспериментальные штабеля, взятые в работу системой ИИ.

Таблица 1. Выход богатого свинецсодержащего Айза шлака при разной загрузке сырья

Штабель, т	Доля сульфидного сырья, %	Доля окисленного сырья, %	Флюсы и топливо, %	Выход богатого свинецсодержащего Айза шлака, т-%	Содержание свинца в шлаках, %
3000	69,5	27	3,5	1860-62	52,3
3000	66,5	30	3,5	1920-64	49,4
3000	61,5	35	3,5	2032-68	44,9
3000	56,5	40	3,5	2125-70	42,6

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе были проанализированы четыре ключевых опыта загрузки сырья. Исследования подтверждают, что при ручном управлении в моменты пиковых загрузок операторы часто не успевают стабилизировать давление, что приводит к потерям свинца с отходящими газами и пылью. Внедрение интеллектуального «цифрового советчика» позволяет:

- Способствует протеканию более стабильного процесса плавки.
- Стабилизировать температуру в печи в узком диапазоне.
- Сократить расход электроэнергии и топлива (на которые приходится до 15% всех затрат).

- Позволяет найти «золотую середину» (Set-point), обеспечивая максимальное извлечение свинца (95-98%) при сохранении проектного срока службы футеровки печи.

- Оптимизируя шихтовку материалов, уменьшает образование диоксида серы.
- Снижение необходимости ручного отбора проб в опасных зонах за счет внедрения дистанционных датчиков и ИИ-анализа.
- Повысить экономическую эффективность производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеграция искусственного интеллекта в технологию ISASMELT является перспективным направлением развития свинцовой металлургии. Использование интеллектуальных систем позволяет: повысить производительность процесса; улучшить экологические показатели; обеспечить комплексное использование сырья.

Таким образом, цифровизация металлургического производства на основе ИИ соответствует современным требованиям устойчивого развития и концепции Индустрии 4.0.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Диомидовский Д. А. Металлургические печи цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1995
- Шустров А. Ю., Маценко Ю. А., Никифоров В. И., Денисов В. В. Разработка и внедрение комплексной технологии переработки лома аккумуляторных батарей, 2012.
- Пан Г., Ван Ф., Шан С. и др. Достижения в области проектирования сталей с помощью машинного обучения // Международный журнал минералов, металлургии и материалов (International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials). – 2023.
- Рябко А. Г., Цемехман Л. Ш. Развитие автогенных процессов в металлургии свинца, 2013.
- Цуцуи К., Намба Т., Кихара К. и др. Текущие тенденции в методах глубокого обучения, применяемых в области черной металлургии: обзор // Журнал ISIJ International. – 2024. – Т. 64, № 11. – С. 1619-1640.
- Шалыгин Л. М., Коновалов Г. В., Колтон Г. А. Перспективное направление автогенной переработки сульфидных руд и концентратов на основе пространственно ориентированного кислородного дутья, 2016
- Чжан Р., Янг Дж. Современное состояние применения машинного обучения в моделировании процессов сталеплавильного производства // Международный журнал минералов, металлургии и материалов (International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials). – 2023. – Т. 30, № 11. – С. 2055-2075.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

УДК 629.3

А.С. Муздыбаева¹, А.К. Слямбеков^{1*}, Petr Bouchner²

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
Усть-Каменогорск, Казахстан

²Чешский технический университет, Прага, Чешская Республика

*Автор-корреспондент: Слямбеков Айдос Қуанышұлы, e-mail: 087625@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В данной работе рассматриваются вопросы исследования закономерностей изменения технического состояния транспортных средств и разработки метода статистического мониторинга их состояния в процессе эксплуатации. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения безопасности дорожного движения, снижения эксплуатационных затрат и повышения надежности автотранспортных средств.

Целью исследования является разработка метода статистического мониторинга технического состояния транспортных средств на основе анализа эксплуатационных данных. В работе применены методы математической статистики, вероятностного анализа и обработки временных рядов.

В результате исследования выявлены основные закономерности изменения технического состояния транспортных средств в зависимости от пробега, условий эксплуатации и режима работы. Предложен метод мониторинга, позволяющий прогнозировать вероятность отказов и своевременно выявлять отклонения от нормального состояния.

Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения разработанного метода в системы диагностики и технического обслуживания транспортных средств.

Ключевые слова: транспортные средства, техническое состояние, статистический мониторинг, надежность, диагностика, прогнозирование отказов.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития транспортной отрасли предъявляет высокие требования к надежности и безопасности транспортных средств. В условиях интенсивной эксплуатации возрастает вероятность отказов узлов и агрегатов, что может привести к аварийным ситуациям, увеличению затрат на ремонт и снижению эффективности использования техники.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от планово-предупредительного обслуживания к интеллектуальным системам мониторинга технического состояния, основанным на анализе данных. В последние годы активно развиваются цифровые технологии, позволяющие собирать и обрабатывать большие объемы информации о работе транспортных средств, что создает предпосылки для применения статистических методов анализа.

Несмотря на наличие различных методов диагностики, многие из них не учитывают стохастический характер процессов износа и отказов. Это ограничивает их эффективность при прогнозировании технического состояния. В связи с этим возникает необходимость разработки методов, основанных на выявлении

статистических закономерностей изменения параметров состояния. Целью работы является исследование закономерностей изменения технического состояния транспортных средств и разработка метода статистического мониторинга.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- анализ факторов, влияющих на техническое состояние транспортных средств;
- исследование статистических характеристик параметров состояния;
- разработка модели мониторинга технического состояния;
- оценка эффективности предложенного метода.

Объектом исследования являются транспортные средства в процессе эксплуатации.

Предметом исследования — методы статистического анализа и мониторинга технического состояния.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных данных использовались эксплуатационные показатели транспортных средств, включающие: пробег, расход топлива, параметры работы двигателя, частоту отказов и результаты технических осмотров.

Для анализа применялись следующие методы:

- методы описательной статистики (среднее значение, дисперсия, стандартное отклонение);
- корреляционный анализ для выявления взаимосвязей между параметрами;
- регрессионный анализ для построения зависимостей;
- анализ временных рядов для изучения динамики изменения параметров;
- вероятностные модели отказов (распределения Вейбулла, нормальное распределение).



Рисунок 1. Схема статистического мониторинга технического состояния транспортных средств

На рисунке 1 представлена обобщённая схема процесса статистического мониторинга технического состояния транспортных средств. В левой части изображены исходные данные, используемые в исследовании, включая пробег, расход топлива, параметры работы двигателя, частоту отказов и результаты технических осмотров.

В центральной части схемы отражены основные методы анализа данных: описательная статистика, корреляционный и регрессионный анализ, а также модели вероятности отказов. Эти методы позволяют выявить закономерности изменения параметров технического состояния и установить взаимосвязи между ними.

Правая часть рисунка иллюстрирует этапы реализации метода статистического мониторинга, включающие сбор и обработку данных, расчёт параметров, определение контрольных границ, выявление аномалий и прогнозирование отказов.

В нижней части схемы показан этап анализа и моделирования, обеспечивающий интеграцию полученных данных и формирование прогностических моделей. Представленная схема наглядно демонстрирует последовательность и взаимосвязь этапов мониторинга технического состояния транспортных средств.

Разработанный метод статистического мониторинга включает следующие этапы:

1. Сбор и предварительная обработка данных.
2. Вычисление статистических характеристик параметров.
3. Определение контрольных границ допустимых значений.
4. Выявление отклонений и аномалий.
5. Прогнозирование вероятности отказов.

Для реализации метода использовались программные средства анализа данных и моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования установлено, что техническое состояние транспортных средств изменяется по определённым закономерностям, зависящим от пробега и условий эксплуатации.

Выявлено, что:

- с увеличением пробега возрастает дисперсия параметров состояния;
- некоторые параметры (например, расход топлива) имеют линейную зависимость от степени износа;
- вероятность отказов возрастает нелинейно и может быть описана распределением Вейбулла.

Предложенный метод статистического мониторинга позволяет:

- выявлять отклонения на ранних стадиях;
- прогнозировать срок наступления отказа;
- оптимизировать график технического обслуживания.

Сравнение с традиционными методами показало, что разработанный подход обеспечивает более высокую точность прогнозирования и позволяет снизить вероятность внезапных отказов.

Также были выявлены ограничения исследования, связанные с неполнотой данных и влиянием внешних факторов (климат, стиль вождения).

Таблица 1. Пример параметров технического состояния

Параметр	Значение	Единицы
Пробег	120000	км
Расход топлива	8,5	л/100 км
Температура двигателя	90	°C

Результаты подтверждают, что использование статистических методов позволяет повысить эффективность контроля технического состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования были выявлены основные закономерности изменения технического состояния транспортных средств и разработан метод статистического мониторинга.

Поставленные задачи выполнены:

- проведён анализ факторов, влияющих на состояние;
- исследованы статистические характеристики параметров;
- разработан и апробирован метод мониторинга.

Научная новизна работы заключается в применении комплексного статистического подхода к анализу технического состояния транспортных средств.

Практическая значимость заключается в возможности использования разработанного метода в системах диагностики и технического обслуживания, что позволит повысить надёжность и безопасность эксплуатации.

В дальнейшем перспективными направлениями являются:

- использование методов машинного обучения;
- интеграция с системами IoT;
- расширение базы данных для повышения точности прогнозов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без внешней финансовой поддержки.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия GPT-4o) для улучшения языковой стилистики и редактирования текста. После завершения работы ИИ авторы просмотрели и отредактировали контент, принимая на себя полную ответственность за содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kostrzewski, M., & Melnik, R. (2021). Condition monitoring of rail transport systems: A bibliometric performance analysis and systematic literature review. *Sensors*, 21(14), 4710. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21144710> 
- Żurek, J., Małachowski, J., Ziółkowski, J., & Szkutnik-Rogoż, J. (2020). Reliability analysis of technical means of transport. *Applied Sciences*, 10(9), 3016. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10093016> 

Komarov, V. V. (2008). Risk and reliability management for motor transport on the basis of monitoring of features of operating vehicles. *Izvestiya MGTU MAMI*.

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-69547> [OBJ]

Methods for continuous monitoring of compliance of vehicles' technical condition with safety requirements during operation. (2020). *Transportation Research Procedia*, 50, 77–85.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.010> [OBJ]

List, G. F., & Williams, B. (2018). Advances in travel time reliability monitoring and assessment. *Journal of Intelligent Transportation Systems*.

DOI: <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1403536> [OBJ]

Taheri, E., Kolmanovsky, I., & Gusikhin, O. (2019). Survey of prognostics methods for condition-based maintenance in engineering systems.

URL: <https://arxiv.org/abs/1912.02708>

Aburakhia, S., Myers, R., & Shami, A. (2022). A hybrid method for condition monitoring and fault diagnosis of rolling bearings.

URL: <https://arxiv.org/abs/2208.06051>

OpenAI, "ChatGPT," version GPT-4o, [Software], 2024. Available: <https://chat.openai.com>

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

УДК 629.113:620.17

Т.О. Муканов^{1*}, А.С. Муздыбаева¹

¹НАО «ВКТУ им. Д. Серикбаева», г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Муканов Талгат Орынгазыевич, e-mail: m_talgat777@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Обеспечение надежности тормозных систем грузовых автомобилей является критическим фактором безопасности в условиях растущей интенсивности грузоперевозок и эксплуатации транспортных средств в экстремальных климатических режимах. Работа большегрузного транспорта сопряжена с колоссальными термическими и механическими нагрузками на элементы трения, такие как тормозные барабаны и сопряженные узлы трансмиссии. Данное исследование направлено на поиск комплексного решения проблемы поддержания их работоспособности через синергию материаловедения, технологий обработки и управления эксплуатационной средой. Целью исследования являются проведение анализа и систематизация методов, направленных на снижение интенсивности износа элементов тормозных систем и повышение их ресурсных показателей. Основной задачей на данном этапе является повышение безопасности эксплуатации грузовых автомобилей на основе оптимального выбора технологии восстановления работоспособности элементов тормозных систем и обоснования методов поддержания надежности изношенных элементов. Научная новизна и практический вклад заключаются в разработке методики сравнительного выбора между методами модификации структуры материалов, технологии изготовления и обработки деталей, а также оптимизацией условий технического обслуживания и ремонта с учетом параметров эксплуатации. Практическая ценность работы заключается в разработке комплексного подхода, направленного на увеличение межремонтного ресурса критически нагруженных элементов грузовых автомобилей (тормозных дисков/барабанов) путем обоснования выбора износостойких материалов и оценки возможности применения современных методов поверхностного упрочнения, адаптированных к тяжелым условиям эксплуатации.

Ключевые слова: грузовой автомобиль КамАЗ 65117, тормозная система, тормозные механизмы; тормозной барабан, техническая эксплуатация, износостойкость, метод, технологии.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития автомобильного транспорта характеризуется постоянным ростом грузоподъемности и интенсивности эксплуатации большегрузных транспортных средств. Особое место в конструкции тормозных механизмов занимают тормозные барабаны, подвергающиеся экстремальным тепловым и механическим нагрузкам. Традиционные подходы к поддержанию их работоспособности, основанные на восстановительном ремонте до номинальных размеров, сегодня не в полной мере отвечают требованиям ресурсности и эффективности. Возникает острая необходимость перехода от стратегии «ремонта по факту» к стратегии «управления жизненным циклом» через направленное формирование свойств деталей (Zhang et al., 2025).

Проблема исследования. Основное противоречие заключается в том, что

стандартные конструкционные материалы (преимущественно серые чугуны) в условиях резко континентального климата, запыленности и высоких динамических нагрузок исчерпывают свой лимит износостойкости значительно раньше расчетного срока (Salva J et al., 2026). Существующие методы ремонта зачастую игнорируют изменение микроструктуры металла, что приводит к снижению эффективности торможения и преждевременному выходу узла из строя. Структурную схему выбора многокритериального подхода «Материал — Технология — Среда» представим в виде таблицы 1.

Таблица 1. SWOT-анализ многокритериального подхода «Материал — Технология — Среда»

STRENGTHS (Сильные стороны)	WEAKNESSES (Слабые стороны)
Системность: Решение проблемы на трех уровнях (от молекул до эксплуатации) гарантирует долгосрочный ресурс, а не временный ремонт.	Сложность внедрения: Требуется высокотехнологичное оборудование (лазеры, установки для азотирования), которое есть не на всех предприятиях (Parthasarathy et al., 2024).
Научная новизна: Переход к «проектированию свойств» материала под конкретные задачи грузового транспорта.	Высокая стоимость НИОКР: Исследования микроструктуры и триботехнические тесты требуют значительных инвестиций на начальном этапе.
Гибкость: Возможность подбирать комбинацию «материал-технология» под бюджет заказчика или климат региона (Umaras et al., 2021).	Чувствительность к точности: Нарушение режима лазерной наплавки или азотирования может привести к охрупчиванию детали.
OPPORTUNITIES (Возможности)	THREATS (Угрозы)
Импортозамещение: Создание отечественных технологий восстановления, превосходящих по ресурсу оригинальные запчасти.	Человеческий фактор: Недостаток квалифицированных кадров, способных работать с аддитивными технологиями и сложным ПО.
Экологический эффект: Продление жизни старых узлов вместо их утилизации и переплавки (циркулярная экономика).	Рыночные барьеры: Дешевые, но низкосортные дубликаты запчастей могут быть экономически привлекательнее для перевозчиков.
Цифровизация: Возможность создания «цифрового двойника» детали для прогнозирования износа на основе собранных данных.	Юридические риски: Сложность сертификации восстановленных деталей для использования в тормозных системах АТС.

Одним из подходов к решению проблемы может стать решение, заключающееся в повышении эксплуатационного ресурса и обеспечении стабильной работоспособности элементов тормозной системы грузовых автомобилей на основе многокритериального анализа факторов влияния: от выбора инновационных материалов и технологий обработки до оптимизации условий эксплуатационной

среды. Для достижения поставленной цели исследование трансформируется в многокритериальный анализ, где поиск оптимального рычага управления ресурсом осуществляется на трех иерархических уровнях:

1. Микроуровень (Материал): Выбор состава и методов модификации структуры (азотирование, цементация, лазерное упрочнение).
2. Технологический уровень (Обработка): Сопоставление методов формообразования (литье,ковка, аддитивные технологии).
3. Эксплуатационный уровень (Среда): Управление температурными режимами, нагрузками и трибологическими условиями в зоне контакта.

Научная гипотеза работы заключается в выявлении закономерностей изменения характеристик тормозного барабана не как изолированной детали, а как активного элемента трибосистемы. Предлагается исследовать модель взаимозависимости методов поверхностного упрочнения (в частности, ионно-плазменного азотирования) и термодинамической стабильности узла при экстренных режимах торможения. Научно обосновано, что применение градиентных покрытий позволяет компенсировать дефицит износостойкости базового материала, создавая «барьерный слой», препятствующий зарождению термоусталостных трещин (Novianto et al., 2024).. Объектом исследования являются процессы изнашивания и восстановления элементов тормозных систем грузовых автомобилей. Предметом исследования выступают закономерности изменения структуры и свойств материалов тормозных барабанов под воздействием технологических и эксплуатационных факторов (Choy et al., 2023).

Диаграмма Исикавы («Рыбий скелет») — это идеальный инструмент визуализации. Она позволяет наглядно показать, что работоспособность тормозного барабана зависит не только от самого металла, но и от целого комплекса факторов, которые вы разделили на три уровня (Материал, Технология, Среда). Ниже представлено описание структуры диаграммы рисунок 1.



Рисунок 1. Диаграмма Исикавы причин отказов элементов тормозных систем
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы, использованный в ходе исследования, относится к элементам трансмиссии грузовых автомобилей КамАЗ 65117. Проведен анализ элементного состава исследуемого материала детали. Такой химический состав характерен для серого чугуна с включениями легирующих элементов. Высокое содержание железа и

кремния, а также наличие марганца и хрома, указывают на то, что материал обладает повышенной износостойкостью, теплопроводностью и прочностью, что важно для работы тормозного барабана. Чугун марки СЧ (серый чугун) или легированный чугун, используется в тяжелой автомобильной технике, включая КАМАЗ. Обычно указанная марка чугуна по ГОСТ 1412-85: СЧ20 (200 МПа прочность на разрыв).

Оборудование, использованное для определения характеристик, полностью отвечает требованиям, установленным в законах Республики Казахстан "О техническом регулировании" и "Об обеспечении единства измерений". Твердомер электронный малогабаритный переносной ТЕМП-2 (сертификат о поверке № ВЕ-03-24-1562087, заводской номер 029612, диапазон измерений от 22 до 68 HRC, от 100 до 450 HB, изготовитель ООО НПП Технотест, Россия). Изображение средства измерения представлено на рисунке 2.



Рисунок 2. Твердомер электронный малогабаритный переносной ТЕМП-2

Испытания представленных образцов проведены в ВКФ АО «Национальный центр экспертизы и сертификации» в испытательном центре по адресу ВКО, г. Усть-Каменогорск, ул. Казахстан, 5. Испытания на твердость проводились в аккредитованном испытательном центре с соблюдением условий: температура 21°C, относительная влажность 55%, атмосферное давление 743 мм рт.ст.

Таблица 2. Результаты измерения (Протокол № 960 от 03.03.2025 г.)

№	Наименование показателя	Метод испытания	Фактический показатель (HRC)
1	Твердость по Роквеллу (на поверхности)	Руководство по эксплуатации твердомера ТЭМП-2	28,4
2	Твердость по Роквеллу (в местах среза)		22,7

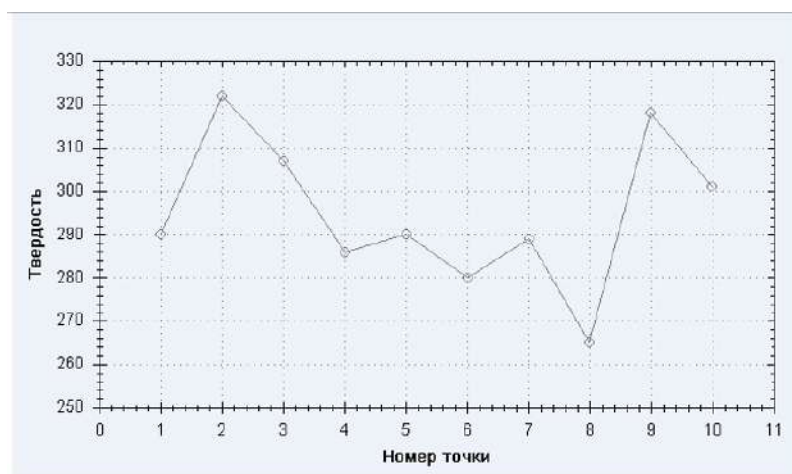
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Далее приведем основные результаты, полученные в ходе исследования характеристик тормозного барабана (рисунок 3).



Рисунок 3. Испытуемый образец тормозного барабана

Для сбора статистических данных по твердости были выбраны 10 критических точек, характеризующих состояние шестерни после износа. Ниже представлены данные, приведенные на графике, характеризующие показатели твердости (рисунок 4).



Testreport

Number	Method	Value	Diagonal
1	HV 0,3	290.00	0.04
2	HV 0,3	322.00	0.04
3	HV 0,3	307.00	0.04
4	HV 0,3	286.00	0.04
5	HV 0,3	290.00	0.04
6	HV 0,3	280.00	0.04
7	HV 0,3	289.00	0.04
8	HV 0,3	265.00	0.05
9	HV 0,3	318.00	0.04
10	HV 0,3	301.00	0.04

Рисунок 4. Результаты испытаний по критическим точкам на оборудовании

Полученные данные могут быть использованы в дальнейших экспериментальных исследованиях при оценке износов шестерни в эксплуатации. С учетом полученных сведений будут подготовлены образцы для исследований в научных лабораторий в AGH Краковском университете (Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги выполненного диссертационного исследования и обобщая полученные научные результаты, следует указать, что поставленные на данном этапе задачи были выполнены. Проведенный анализ и испытания дополняют материал, характеризующий изменение физико-химических и механических свойств деталей, которое может привести к изменению состояния рабочих поверхностей элементов тормозных систем на примере тормозных барабанов. Кроме того, была систематизирована информация, полезная для последующего выбора метода воздействий на исследуемый элемент с целью обеспечения работоспособности тормозной системы грузовых автомобилей

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность доктору PhD Азаматову Багдату Нурлановичу за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия GPT-4o) для улучшения языковой стилистики и редактирования текста. После завершения работы ИИ авторы просмотрели и отредактировали контент, принимая на себя полную ответственность за содержание статьи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Zhang, Shuai & An, Xiaobo & Zheng, Jingyang & Liu, He & Yang, Haiyang & Zhou, Ti. (2025). Study on bionic design of brake drum surface morphology and its anti-wear mechanism. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 239. <https://doi.org/10.1177/09544062251322273>

Salva J, Dado M, Szabová J, Sečkář M, Schwarz M, Poništ J, Vanek M, Ďuricová A, Mordáčová M. Vehicle Brake Wear Particles: Formation Mechanisms, Behavior, and Health Impacts with an Emphasis on Ultrafine Particles. *Atmosphere*. 2026; 17(1):57. <https://doi.org/10.3390/atmos17010057>

Parthasarathy, Balaji & Balachandran, Suryarajan & Sathickbasha, Katharbasha & Katiyar, Jitendra & Sethupathi, Paramathma & Ahmed, Asrar. (2024). A comparative study of original equipment manufacturer brake pads using tribological testing and hybrid ranking for enhanced decision making and cost effectiveness. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. <https://doi.org/10.1177/13506501231223593>

Umaras, Eduardo & Barari, Ahmad & Tsuzuki, Marcos. (2021). Heavy Vehicles Brake Drums — An Accurate Evaluation on Thermal Loads in Severe Service Conditions. International Journal of Automotive Technology. 22. 371-382. <https://doi.org/10.1007/s12239-021-0035-1>

Novianto, Arief & Turasno, Buang & Ismail, Rifky & Achmaditiya, Galuh. (2024). Brake Drum Temperature Adjustment and The Brake Lining Gap's Impact On Motor Vehicle Brake Efficiency. ROTASI. 26. 23-28. <https://doi.org/10.14710/rotasi.26.2.23-28>

Choy, H & Siaw, M & Pung, K. (2023). Design and Analysis of Brake Drum using Finite Element Analysis. Journal of Physics: Conference Series. 2609. 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2609/1/012011>.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ДӘУІРІНДЕГІ ИНТЕГРАЛДЫҚ ЕСЕПТЕУЛЕРДІҢ ГЕОЛОГИЯДА ҚОЛДАНЫЛУЫ

ӨОЖ 517.5

Ш.Т. Мұрат^{1*}, Н.М. Оспанова¹

¹Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., Қазақстан

*Корреспондент-автор: Мұрат Шыңғыс Төлегенұлы, e-mail: murat.sh@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. Бұл мақалада анықталған интеграл ұғымының геология саласындағы қолданылу мүмкіндіктері жан-жақты қарастырылады. Геологиялық зерттеулерде жер қабаттарының құрылымын анықтау, пайдалы қазбалардың таралу заңдылықтарын зерттеу және табиғи ресурстардың көлемін бағалау сияқты маңызды міндеттерді шешуде математикалық әдістердің рөлі ерекше.

Жұмыста анықталған интеграл көмегімен қисықтармен шектелген аймақтардың ауданын есептеу әдістері талданып, олардың геологиялық модельдермен байланысы көрсетіледі. Сонымен қатар, интегралдық есептеулердің нақты геологиялық процестерді сипаттаудағы маңызы дәлелденеді.

Зерттеу барысында математикалық талдау әдістері қолданылып, нақты есептер арқылы интегралдың практикалық тиімділігі көрсетілді. Анықталған интеграл геологиялық қималарды, қабаттардың қалыңдығын және жер бедерінің өзгерісін сандық тұрғыда сипаттауға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, мақалада жасанды интеллект технологияларын қолдану мәселесі қарастырылып, олардың геологиялық деректерді өңдеу, талдау және болжау үдерістеріндегі рөлі сипатталады. Жасанды интеллект негізіндегі әдістер есептеулердің дәлдігін арттырып, үлкен көлемдегі ақпаратты тиімді өңдеуге мүмкіндік береді.

Жұмыстың нәтижелері математикалық модельдеу мен заманауи цифрлық технологияларды біріктіру геология саласындағы зерттеулердің сапасын арттыруға ықпал ететінін көрсетеді.

Түйінді сөздер: интеграл, анықталған интеграл, геология, математикалық модельдеу, жасанды интеллект, геологиялық модель, аудан, функция, график, деректерді талдау

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда ғылым мен технологияның дамуы математика, геология және жасанды интеллект сияқты салалардың өзара байланысын күшейтті. Геологиялық зерттеулер барысында жер бедерінің құрылымын, қабаттардың орналасуын және пайдалы қазбалардың таралуын анықтау маңызды міндет болып табылады. Мұндай мәселелерді шешуде математикалық модельдеу әдістері, соның ішінде анықталған интеграл кеңінен қолданылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Бұл жұмыста анықталған интеграл көмегімен қисықтармен шектелген аймақтардың ауданын есептеу әдістері қарастырылды. Зерттеу барысында математикалық талдау тәсілдері қолданылды және әрбір есептің графикалық интерпретациясы көрсетілді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

1-есеп. Жер бедерінің профилі $y = \sqrt{x}$, ал төменгі шекарасы $y = 0$, $x = 0$ ден $x = 4$ -ке дейінгі ауданды табу.

Шешуі: 1-график. Жер бедері профилінің ауданын есептеу үшін Декарттық жазықтықта берілген қисық сызықты трапецияның ауданын есептеу формуласын

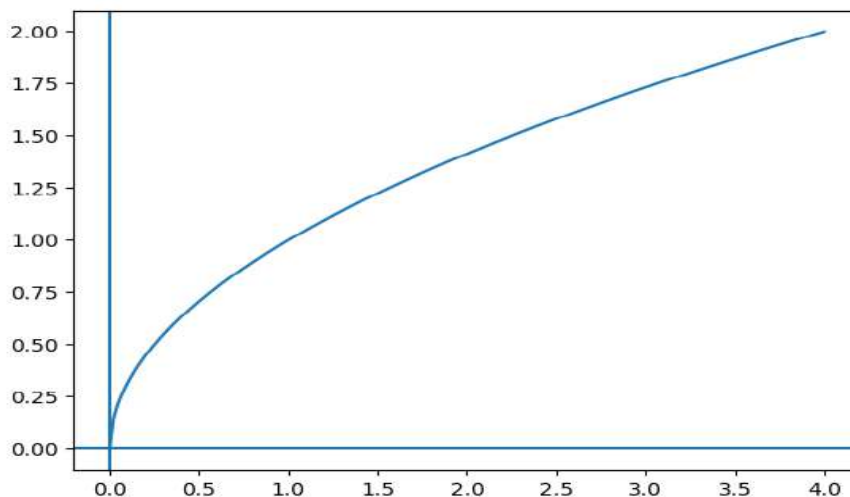
қолданамыз. $S = \int_a^b f(x)dx$

$$S = \int_0^4 \sqrt{x} dx = \int_0^4 x^{\frac{1}{2}} dx$$

$$S = \left[\left(\frac{2}{3} \right) x^{\frac{3}{2}} \right]_0^4$$

$$S = \left(\frac{2}{3} \right) \cdot 8 = \frac{16}{3}$$

Жауабы: $S = \frac{16}{3}$



1-график: Парабола тармағы.

2-есеп. Қазу жұмыстарын орындау үшін алдымен жер бетінің қимасы $y = 6 - x$ және $y = 2$ қисықтарымен шектелген бетінің қиманың ауданын табу қажет.

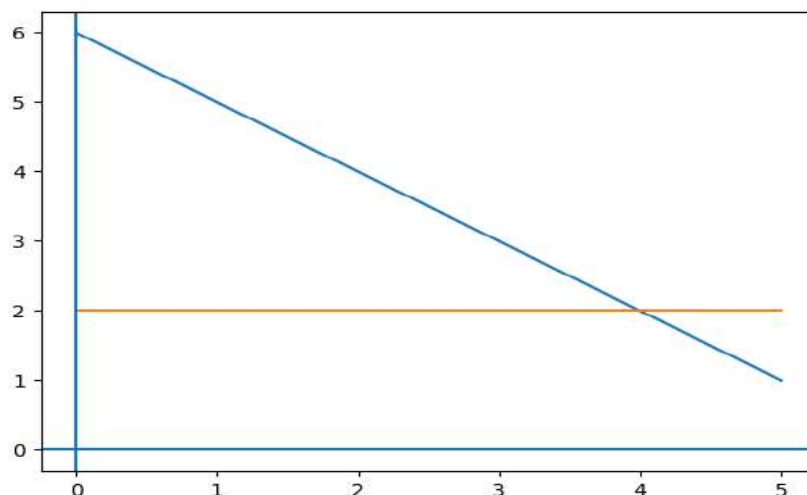
Шешуі: Есепті шешу үшін декарттық жазықтықта берілген қисық сызықты трапецияның ауданын есептеу формуласын қолданамыз. Алдымен қиылысу нүктелерін табамыз. $6 - x = 2$ осыдан $x = 4$. X-тің өзгеру аймағы 0 ден 4 -ке дейін. Ендеше аудан:

$$S = \int_0^4 ((6 - x) - 2) dx = \int_0^4 (4 - x) dx$$

$$S = \left[4x - \frac{x^2}{2} \right]_0^4$$

$$S = 16 - 8 = 8$$

Жауабы: $S = 8$



2-график: Түзу сызықтар.

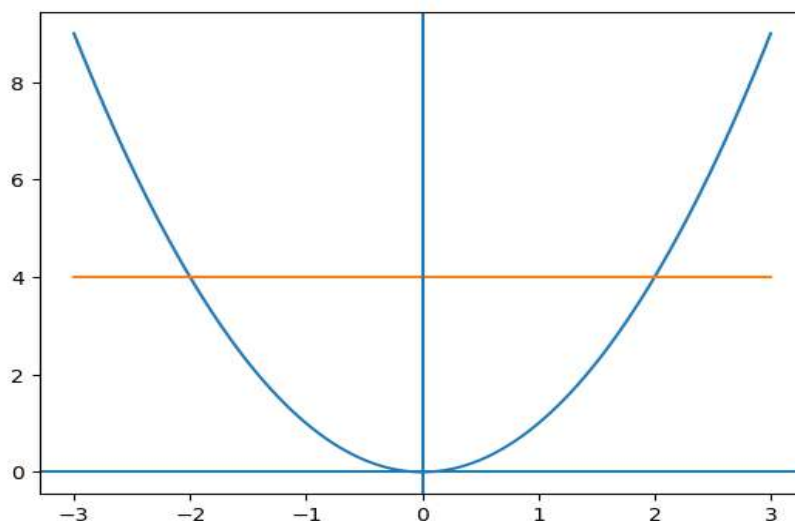
3-есеп. Жер қыртысының белгілі бір қыртысын сипаттайтын геологиялық құрылым $y = x^2$ қисығы ретінде алынады. Ал қабаттың қалыңдығы — $y = 4$ сызығы арқылы көрсетіледі. Осы аймақта орналасқан пайдалы қазбалар мен геологиялық құрылымдарды зерттеу үшін, бұл қисықтар мен сызықпен шектелген ауданды анықтау қажет.

Шешуі: Бұл аудан — $y = x^2$ қисығы мен $y = 4$ сызығы арасындағы аймақтың ауданын білдіреді. Ауданды есептеу үшін, бірінші қималар арасындағы кесінділерді анықтаймыз. Қисықтар тең болған жерлерді анықтау үшін, $y = x^2$ және $y = 4$ теңестіреміз:

$$x^2 = 4 \Rightarrow x = \pm 2$$

$$S = \int_{-2}^2 (4 - x^2) dx = \left[4x - \frac{x^3}{3} \right]_{-2}^2 = \frac{32}{3}$$

Жауабы: $S = \frac{32}{3}$



3-график: Квадраттық парабола.

4-есеп

Берілген: Жер бедерінің $y = x^2$ —шұңқырлы пішінін көрсететін тегіс емес, қиса түзу сызық. Ал $y = 3x$ басқа бір құрылым, ол жер бедерінде немесе пайдалы қазбалар қабаттарында жазық оған жақын орналасқан кеңістік. Осы екі қисықтың қиылысу аймағында орналасқан пайдалы қазбалар мен кен орындарын зерттеу үшін маңызды аймақты табу қажет.

Шешуі:

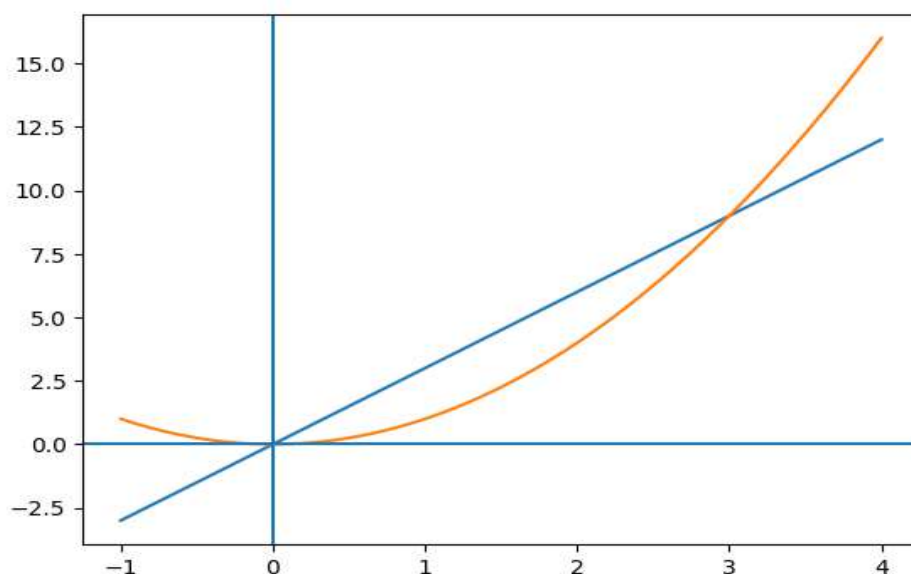
$$3x = x^2 \Rightarrow x = 0, 3$$

$$S = \int_0^3 (3x - x^2) dx$$

$$S = \left[\frac{3x^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right]_0^3 = \frac{9}{2}$$

$$S = \frac{9}{2}$$

Жауабы: $S = \frac{9}{2}$



4-график: Парабола мен түзу сызық.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу барысында анықталған интеграл ұғымының геологиялық есептерді шешуде тиімді қолданылатыны көрсетілді. Интеграл арқылы қисықтармен шектелген аймақтардың ауданын есептеу геологиялық модельдерді талдауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жасанды интеллект технологияларын пайдалану есептеулердің жылдамдығы мен дәлдігін арттырып, үлкен көлемдегі деректерді өңдеуді жеңілдетеді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Бермант А.Ф., Араманұлы И.Г. Математикалық анализдің қысқаша курсы. Мәскеу, 2013.

Запорожец Г.И. Математикалық анализ есептерін шешу нұсқаулығы. Мәскеу, 2015.

Айдос Е.Ж. Жоғары математика – 2. Алматы: Бастау, 2015.

КӨЛІК ҚҰРАЛЫ ЖҮРГІЗУШІСІНІҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ КӨМЕК ЖҮЙЕЛЕРІ

ӘОЖ 656.1:004.8

Д.Мұратқан¹, А.Р.Серіков¹, Д.М.Мырзабекова^{1*}

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

*Автор-корреспондент: Мырзабекова Динара Мырзабекқызы,
e-mail: MDinara0812@mail.ru

АНДАТПА. Мақалада жол қозғалысы қауіпсіздігін арттырудың негізгі элементі және толық автономды көлікке өту кезеңі ретінде қарастырылатын заманауи интеллектуалды жүргізушіге көмек көрсету жүйелеріне (ADAS) кешенді талдау жасалған. Зерттеудің өзектілігі жасанды интеллект технологияларының қарқынды дамуына, жаңа аппараттық платформалардың пайда болуына және жетекші автомобиль нарықтарындағы нормативтік талаптардың өзгеруіне байланысты. Жұмыстың мақсаты - ADAS құрудың заманауи тәсілдерін жүйелеу, дамудың негізгі тенденцияларын анықтау және олардың эволюциясының перспективаларын бағалау болып табылады. Өдіснамалық базаны жетекші өндірушілердің (Qualcomm, ZF, Tesla, Aptiv, HERE Technologies) техникалық құжаттамасын талдау, халықаралық көрмелердің (CES 2026) материалдарын зерделеу және архитектуралық шешімдерге салыстырмалы талдау жасалды. Зерттеу нәтижесінде негізгі тенденциялар анықталды: ADAS және мультимедиа функцияларының бірыңғай чиптегі жүйеде (SoC) шоғырлануы, бағдарламалық-анықталатын архитектураларға көшу, "электрондық көкжиекті" кеңейту үшін жоғары дәлдікті карталарды жасанды интеллектпен интеграциялау, кідірістерді азайту үшін шеткі (edge) есептеулерді дамыту, сондай-ақ нейрожелілерді оқыту үшін синтетикалық деректерді пайдалану. Ғылыми жаңалығы ADAS-тың оқшауланған функциялардан L2+/L3 деңгейіндегі автономия элементтері бар интеграцияланған платформаларға дейінгі эволюция заңдылықтарын анықтау.

Түйінді сөздер: ADAS, жасанды интеллект, жүргізушіге көмек көрсету жүйелері, автономды жүргізу, Snapdragon Ride, Tesla FSD, бағдарламалық-анықталатын автомобиль, электрондық көкжиек, шеткі есептеулер (edge-computing), жол қозғалысының қауіпсіздігі.

КІРІСПЕ

Қазіргі заманғы автомобиль күрделі бағдарламалық-аппараттық кешенге айнала отырып, тек механикалық көлік құралы болуды тоқтатты. Ақылды жүргізушілерге көмек көрсету жүйелері (Advanced driver Assistance Systems, ADAS) бұл трансформацияның басты бағыты болып табылады, бұл жайлылықты ғана емес, сонымен қатар көлік ағындарының тығыздығының артуы жағдайында маңызды факторға айналатын қауіпсіздікті қамтамасыз етеді (NaAvtotrasse.ru., 2026; Tarantas.news., 2026).

Соңғы жылдары ADAS дамуында сапалы өзгерісі болды. Егер бұрын көмек жүйелері оқшауланған функциялар жиынтығы болса (адаптивті круиздік бақылау, жолақты ұстау жүйесі, автоматты тежеу), бүгінде біз бұл функцияларды қалалық ортада күрделі сипатқа қабілетті бірыңғай платформаға біріктіру туралы айтып отырмыз. CES 2026 көрмесінде жетекші өндірушілер – Qualcomm, ZF, Nvidia, Aptiv, HERE Technologies-автомобиль электроникасының мүмкіндіктері туралы түсінікті өзгертетін шешімдерді көрсетті (NaAvtotrasse.ru., 2026; Visicom API., 2026; Visicom API. – 2026; BGLOGIST., 2026.).

Бұл зерттеудің мақсаты - жүргізушіге көмек көрсетудің интеллектуалды жүйелерінің қазіргі жағдайы мен даму тенденцияларына жүйелі талдау жүргізу, негізгі

технологиялық драйверлерді анықтау және ADAS-тың одан әрі эволюциясының болжамын тұжырымдау. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: ADAS құрылысындағы архитектуралық өзгерістерді талдау; жетекші өндірушілердің функцияларды интеграциялау тәсілдерін зерттеу; жасанды интеллект пен жоғары дәлдіктегі карталардың рөлін бағалау; қолданыстағы шешімдердің проблемалары мен шектеулерін анықтау; дамудың перспективалық бағыттарын анықтау.

Зерттеу нысаны - жүргізушіге көмектесетін интеллектуалды жүйелер, олардың эволюциясын анықтайтын архитектуралық, алгоритмдік және технологиялық шешімдер болып табылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу әдебиеттер тізімінде келтірілген ашық көздерді талдау негізінде жүргізілді: Qualcomm компаниясының ресми пресс-релиздері мен техникалық құжаттамасы, Tesla, Toyota, Aptiv, HERE technologies; ces 2026 халықаралық тұтынушылық электроника көрмесінің материалдары; салалық басылымдарға аналитикалық шолулар; Scopus және Web of Science дерекқорларында индекстелген ғылыми жарияланымдар.

Әдістемелік негіз төмендегілер негізінде құрастырылды:

- жүйелік талдау – архитектуралық шешімдерді және олардың эволюциясын зерттеу;

- салыстырмалы әдіс – әртүрлі өндірушілердің тәсілдерін салыстыру;

- жіктеу әдісі – ADAS функцияларын автоматтандыру деңгейлері бойынша топтастыру;

- болжау әдісі – дамудың перспективалық бағыттарын анықтау.

Зерттеу 2024 жылдан 2026 жылдың ақпанына дейінгі кезеңді қамтиды, бұл қазіргі жағдай мен жақын болашақты бағалауға мүмкіндік береді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

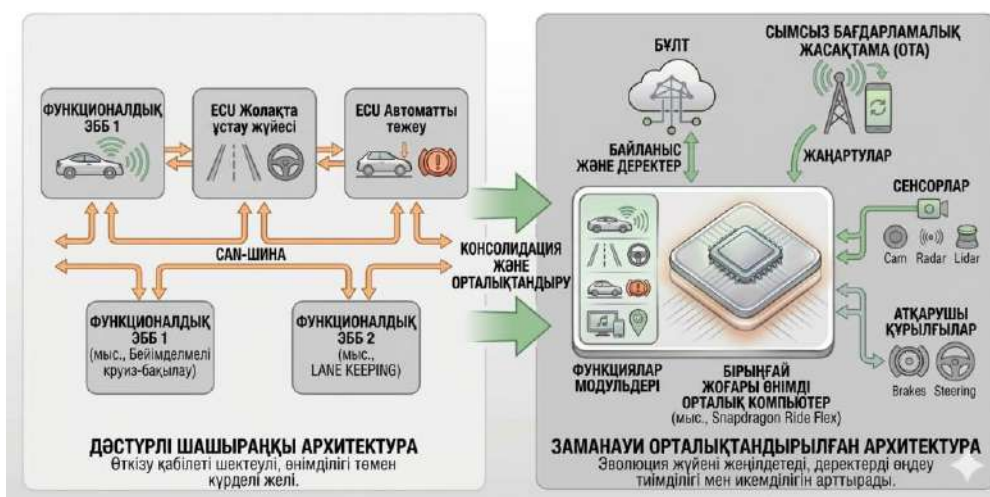
1. ADAS архитектуралық эволюциясы: таратылған жүйелерден орталықтандырылған платформаларға дейін.

Дәстүр бойынша, автомобиль электроникасы таратылған принцип бойынша құрылды: әр функцияның өзіндік электронды басқару блогы (ECU) болды. Бұл архитектураның күрделенуіне, өзіндік құнның өсуіне және жаңартудың шектеулі мүмкіндіктеріне әкелді (NaAvtotrasse.ru., 2026).

2025-2026 жылдардағы негізгі тренд ADAS және мультимедиа функцияларын бір кристалды жүйеде (SoC) біріктіретін орталықтандырылған платформаларға көшу болды. Мысал ретінде CES 2026-да ұсынылған Qualcomm Snapdragon Ride Flex платформасын (NaAvtotrasse.ru., 2026) алуға болады.

Snapdragon Ride Flex бір чипте мультимедианы өңдеу және навигацияны, ADAS функцияларын (нысанды тану, траекторияны жоспарлау), жүргізуші мониторингін, 5G байланысын қолдауды, 3D графикасын көрсетуді біріктіреді.

Домендерді бөлу аэроғарыш саласында қолданылатын нақты уақыт бойынша маңызды негізде бағдарламалық "қоршаулармен" (software fencing) қамтамасыз етіледі (NaAvtotrasse.ru., 2026). Бұл тәсіл мультимедиялық жүйенің істен шығуы қауіпсіздік мүмкіндіктеріне әсер етпеуін қамтамасыз етеді.



Сурет 1. ADAS архитектурасының эволюциясы: таратылған ECU-дан орталықтандырылған платформаларға дейін

Платформа қарапайым конфигурациялардан (бір алдыңғы камера + радар) күрделіге дейін (лидар бар көп камералы жүйелер) автоматтандырудың әртүрлі деңгейлерін қолдай отырып масштабталады (NaAvtotrasse.ru., 2026).

2. ADAS және жоғары өнімді есептеу интеграциясы: ZF және Qualcomm тәсілі

Неміс жеткізушісі ZF компаниясы Qualcomm-мен бірлесіп, CES 2026 көрмесінде ZF ProAI орталық компьютері мен Snapdragon Ride шешімдерінің негізінде жасалған масштабталатын ADAS платформасын таныстырды (NaAvtotrasse.ru., 2026; Infocar.ua., 2026).

Кесте 1. Әр түрлі конфигурациядағы ZF ProAI платформасының сипаттамалары

Конфигурация	Есептеу қуаты	Функционалдылық	Мақсатты сегмент
Базалық деңгей	50 TOPS дейін	Алдыңғы камера, аккумулятор, Автоматты тежеу	Бюджетті автомобильдер
Орташа деңгей	100-300 TOPS	Көп камералы жүйелер, қаладағы көмек	Орташа класс
Жоғары деңгей	>1500 TOPS	Толық автономды жүргізу L3	Премиум-сегмент

Максималды конфигурациядағы ZF ProAI компьютері 1500-ден астам дербес компьютерлермен салыстыруға болатын өңдеу қуатына ие және белгілі бір модельдің архитектурасына байланысты домендік, аймақтық немесе орталық контроллер ретінде жұмыс істей алады (NaAvtotrasse.ru., 2026; Infocar.ua., 2026).

ZF платформаға қауіпсіздік, жайлылық және тұрақ сценарийлерін қамтитын 25 ADAS мүмкіндіктерінің жиынтығын біріктіреді. Ең озық бағыт автопилотта автономды навигация (NOA) деп аталады (NaAvtotrasse.ru., 2026).

3. Tesla FSD көшбасшылығы: "тек камера" тәсілі

Tesla Full Self-Driving (Supervised) жүйесі motortrend Best Tech Awards 2026-да жүргізушіге көмек көрсетудің ең жақсы жүйесі болып танылды (Tarantas.news., 2026). Сарапшылар v14 нұсқасы күрделі қалалық жағдайларда, соның ішінде қорғалмаған сол жақ бұрылыстар, айналмалы қозғалыс, жедел жәрдем көліктерінің өтуі және тар

қала көшелерімен жүру кезінде әлдеқайда жатық сипаттаманы көрсететінін атап өтті (Tarantas.news., 2026).

Кесте 2. Сенсорлық қабылдау тәсілдерін салыстыру

Өндіруші	Сенсорлар	Тәсіл
Tesla	Тек камералар (8 дана)	Компьютерлік көру, үздіксіз оқыту
Waymo	Камера + лидар + радар (13+6+4)	Мультимодальды интеграция
Көптеген автомобиль өндірушілер	Камера + радар (орташа деңгей)	Гибридті тәсіл

Tesla тәсілінің басты айырмашылығы - тек камералармен жұмыс істеу және қала көшелерінде, ауылдық жолдарда және автомобиль жолдарында алдын-ала картаға түсірілмеген маршруттарсыз жүру мүмкіндігі ([Tarantas.news.](#), 2026). Бұл жүйені әмбебап етеді, бірақ компьютерлік көру алгоритмдеріне жоғары талаптар қояды.

4. Жоғары дәлдіктегі карталардың рөлі: HERE және "электрондық көкжиек"

Компания HERE Technologies CES 2026-да өзінің картографиялық интеллектуалды жүйесін Snapdragon Ride Pilot платформасымен интеграциялағанын көрсетті (Visicom API., 2026). Негізгі инновация – датчиктердің тікелей көру алаңынан тыс жолдың ерекшеліктерін болжауға мүмкіндік беретін "электрондық көкжиек" (e-horizon) жасау болды.



Сурет 3. "Электрондық көкжиек" (e-horizon) концепциясы

Интеграцияның негізгі мүмкіндіктері:

- Көліктің жабдықтары анықтай алатын ақпараттан тыс, автомобильдің жағдай туралы хабардарлығын кеңейту;
- Қозғалыс жолағы деңгейіндегі дәлдік (жолақтардың егжей-тегжейлі топологиясы);
- 60 елді қамтитын қамту аумағы, 2026 жылға қарай 100 елге дейін кеңейту жоспарлары;
- «Ортадан» үздіксіз жаңартулар (OTA) (Visicom API., 2026).

HERE карталары қазірдің өзінде мына талаптарды қолдайды:

- ЕО-ның жылдамдықты реттеудегі интеллектуалды көмек (ISA) талабы;
- Әр түрлі аймақтардағы жаңа автомобильдердің қауіпсіздігін бағалау бағдарламаларының (NCAP) талаптары (Visicom API., 2026).

5. Edge-есептеу және Artiv платформасы

CES 2026-дағы Artiv нақты уақыт режимінде "қабылдау, ойлау және әрекет ету" принципіне негізделген интеллектуалды edge-шешімін ұсынды (CenyAvto.com., 2026). Edge-тәсіл бұлттық жүйелерге ғана емес, перифериялық деңгейдегі жергілікті деректерді өңдеуге негізделген, бұл ең аз рұқсат етілген кешігулері бар міндеттер үшін өте маңызды.

Artiv -тің келесі буын ADAS платформасы E2E тәсілін қолданады: жасанды интеллект бірден бірнеше кезеңге жауап береді - тану, деректерді біріктіру және әрекеттерді жоспарлау. Жүйе нақты жүргізу деректерінен үйренеді. Сенсориканың негізі: Artiv-тен 8-ші буын радиолокаторы максималды диапазон мен ажыратымдылық көрсеткіштерімен; радар жұмысының сенімділігін арттыратын машиналық оқыту алгоритмдері; 360 градусқа тану үшін дөңгелек көру камерасын ультра төмен радиолокациялық радармен біріктіретін импульстік сенсор (CenyAvto.com., 2026).

6. Nvidia экожүйесі және серіктестік

CES 2026-дағы Nvidia платформалардың келесі буынын, соның ішінде өзін-өзі басқаратын жүйелердің дамуын жеделдетуге арналған Alraya ашық көзін ұсынды. Негізгі серіктестіктерге Mercedes-Benz (2026 жылдан бастап бақыланатын қалаларда автономды жүргізу), AWS және AutoVio (автономды автокөліктерді коммерциялық орналастыру), Bosch бар Kodiak AI (автономды жүк көліктеріне арналған сенсорлар өндірісі) кіреді (BGLOGIST., 2026).

7. Проблемалар мен шектеулер

Әсерлі прогреске қарамастан, ADAS-ті енгізу үлкен қиындықтарға тап болады:

1. **Техникалық шектеулер:** күрделі ауа-райында (жаңбыр, қар, тұман) қабылдаудың сенімділігі проблема болып қала береді. Тіпті Tesla FSD сияқты ең жақсы жүйелер жүргізушінің тұрақты бақылауын қажет етеді (Tarantas.news. , 2026).

2. **Құқықтық белгісіздік:** жоғары деңгейлі (L3 және одан жоғары) ADAS қатысуымен болған ЖКО кезіндегі жауапкершілік мәселесі көптеген елдерде әлі шешілген жоқ.

3. **Құны:** жетілдірілген ADAS енгізу автомобильдің құнын 3000-10000 долларға арттырады, бұл олардың жаппай сегментте таралуын шектейді.

4. **Киберқауіпсіздік:** функцияларды орталықтандыру бұзу қаупін арттырады: зерттеулерге сәйкес, кибершабуылдардың 16%-ы көлік саласына тиесілі (NaAvtotrasse.ru., 2025).

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу келесі тұжырымдарды жасауға мүмкіндік береді:

1. Жүргізушіге көмектесетін интеллектуалды жүйелер сапалық түрлену кезеңін басынан өткізуде: оқшауланған функциялардан біріккен платформаларға дейін, мұнда ADAS, мультимедиа және байланыс жүйелері бір кристаллда біріктіріледі. Бұл шығынды азайтады, архитектураны жеңілдетеді және OTA-жаңартулар (Over-The-Air) арқылы үздіксіз жақсартуға мүмкіндік береді.

2. Дамудың негізгі драйверлері: есептеу қуатының өсуі (1500 TOPS дейін және одан жоғары), компьютерлік көру алгоритмдерін жетілдіру (Tesla тәсілі), жоғары дәлдіктегі карталармен интеграция (HERE электронды көкжиегі), edge есептеулерін

дамыту (Aptiv платформасы) және шекті жағдайларды модельдеу үшін генеративті AI қолдану (Nvidia).

3. ADAS саласындағы көшбасшылықты экожүйенің кешенді шешімдерін ұсынатын компаниялар көрсетеді: Qualcomm (чиптер + бағдарламалық жасақтама), ZF (аппараттық платформа + ADAS мүмкіндіктері), Tesla (тігінен біріктірілген жүйе). Tesla FSD жетістігі жеткілікті өңдеу қуаты мен сапалы алгоритмдермен "тек камера" тәсілінің өміршеңдігін растайды.

4. Негізгі кедергілер: қиын жағдайларда техникалық сенімділік, құқықтық белгісіздік, жоғары шығындар, киберқауіпсіздік және адам факторы мәселесі болып қала береді. Бұл кедергілерді жеңу әзірлеушілердің, заң шығарушылардың және қоғамның күш-жігерін үйлестіруді талап етеді.

5. ADAS даму перспективалары автоматтандырудың жоғары деңгейлеріне біртіндеп көшумен байланысты, L2+/L3 алдағы 3-5 жылда жаппай болады, ал толық автономды жүргізу (L4 / L5) 2030 жылға дейін шектеулі домендердің үлесі болып қала береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: осы мақаланы дайындау кезінде мәтінді өңдеу және стилистиканы жақсарту үшін ChatGPT (OpenAI) үлкен тілдік моделі пайдаланылды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

На CES 2026 показали «мозги» автомобилей: Qualcomm с мультимедиа и ADAS, BMW внедрит Alexa+, Waymo показала роботакси // [NaAvtotrasse.ru](https://naavtotrasse.ru). – 2026. – 14 января. – URL: <https://naavtotrasse.ru/hi-tech/na-ces-2026-pokazali-mozgi-avtomobilej-qualcomm-obedinil.html>

ZF и Qualcomm вывели ассистенты водителя на новый уровень: связку ProAI и Snapdragon Ride показали на CES 2026 // [NaAvtotrasse.ru](https://naavtotrasse.ru). – 2026. – 14 января. – URL: <https://naavtotrasse.ru/auto-news/zf-i-qualcomm-vyveli-assistenty-voditelya-na-novyj.html>

Tesla снова впереди планеты всей: FSD Supervised признана лучшей системой // [Tarantas.news](https://tarantas.news). – 2026. – 12 января. – URL: <https://tarantas.news/posts/id63806-tesla-snova-vpered-planeti-vsej-fsd-supervised-priznana-luchshej-sistemoj>

Toyota внедрит ИИ-ассистентов в автомобили будущего: как SDV и новые ADAS изменят безопасность на дорогах // [NaAvtotrasse.ru](https://naavtotrasse.ru). – 2025. – 30 ноября. – URL: <https://naavtotrasse.ru/auto-news/toyota-vnedrit-ii-assistentov-v-avtomobili-budushhego-kak.html>

Покращена безпека: карти HERE з AI розширюють "поле зору" автомобіля // Visicom API. – 2026. – 14 января. – URL: <https://api.visicom.ua/uk/posts/hereshowcases>

Aptiv на CES 2026 представила «умный» edge-ИИ для авто: ADAS с E2E-логикой, digital cockpit и V2X на 5G // [CenyAvto.com](https://cenyavto.com). – 2026. – 15 января. – URL: <https://cenyavto.com/aptiv-na-ces-2026-predstavila-umnyj-edge-ii/>

ZF та Qualcomm запропонують автовиробникам інтелектуальні системи керування // [Infocar.ua](https://news.infocar.ua). – 2026. – 13 января. – URL: <https://news.infocar.ua/zf-ta-qualcomm-zaproponuyut-avtovyrobnykam-intelektualni-systemy-keruvannya-185568.html>

Возрождение автономии: Nvidia и партнеры зажигают искру в самоуправляемых автомобилях на CES 2026 // BGLOGIST. – 2026. – 12 января. – URL: <https://www.bglogist.com/2026/01/12/autonomy-reborn-nvidia-and-partners-ignite-the-spark-of-self-driving-cars-at-ces-2026/>

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

УДК 621.9

Ж.М. Мұхаметбек¹, Р.Ғабдысалық¹, Б.Н.Азаматов¹, К.Е.Апбазов¹, Н.Н. Калибеков¹

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

*Автор-корреспондент: Ғабдысалық Риза, rgabdysalyk@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В работе рассмотрены актуальные проблемы развития отечественного производства медицинских инструментов для травматологии и ортопедии в Республике Казахстан. Представлены результаты разработки технологии изготовления медицинского инструмента, на примере изогнутого распатора с использованием современных CAD/CAM систем и оборудования с ЧПУ. Показаны примеры операций технологического процесса обработки изделия из нержавеющей стали AISI 321, включая рекомендованные режимы резания и инструментов. Полученные результаты демонстрируют возможность создания конкурентоспособных отечественных медицинских изделий, соответствующих требованиям качества и доступности.

Ключевые слова: медицинский инструмент, распатор, нержавеющая сталь, DMU50, CAD/CAM, MasterCAM.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы общественного здравоохранения являются актуальными во всем мире и решение их заключается в развитии высокотехнологичных конкурентоспособных технологий по производству доступных ИМН. Научным коллективом ВКТУ на базе Центра компетенций «Smart engineering» ведутся работы по созданию отечественных конструкций востребованных видов медицинского инструмента для травматологии и ортопедии [1-5]. Разработка дизайна проектируемых медицинских инструментов ведется в среде SolidWorks и Fusion360 [6-9].

Травматология и ортопедия в Казахстане являются одной из социально значимых отраслей с высокой долей ручного труда хирургов-ортопедов. Необходимо обеспечить снижение стоимости используемых инструментов при оперативном вмешательстве за счет создания собственного отечественного производства. На сегодняшний день в Республике Казахстан отсутствует отечественный производитель хирургических медицинских инструментов. К примеру, стоимость комплекта инструментов для спинальной хирургии варьируется в интервале от 11 000 USD до 25 000 USD. Среди стран лидеров по объемам поставок в Республику Казахстан вошли Китай, Индия, Турция, Россия и Германия.

Целью и задачей данного исследования является разработка технологии изготовления медицинского инструмента (изогнутого распатора) с применением CAD/CAM систем и ЧПУ и изготовление опытного образца медицинского инструмента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существующие передовые технологии производства изделий медицинского назначения постоянно совершенствуются. Разрабатываемые инструменты для травматологии и ортопедии должны обладать: эстетическими, эргономичными

свойствами, быть гипоаллергенными, стойкими к процессам стерилизации, обладать достаточной стойкостью режущих кромок и быть стойкими к коррозии. Помимо указанных свойств должны быть доступными по ценовой категории.

В рамках данного исследования планируется разработка опытного образца медицинского инструмента «распатор Фарабефа» применяемый для отделения надкостницы от кости, отслаивания хрящевых тканей и обработки костной поверхности.

Для изготовления инструмента «распатор Фарабефа» будет использоваться материал — AISI 321 (12X18H10T). В процессе изготовления опытного образца будут выполнены исследования качества на соответствие требованиям медицинской нормативной документации. После изготовления опытного образца медицинский инструмент будет передан на апробацию в ННЦТО имени академика Н.Д. Батпенова. По результатам работы будет разработан временный паспорт конструкций медицинских инструментов.

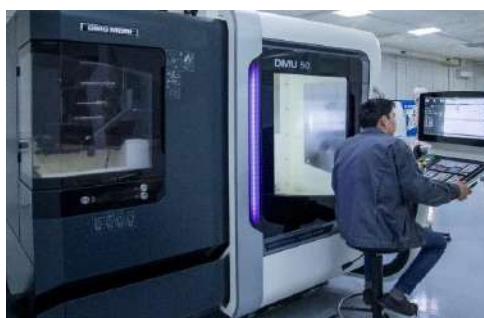


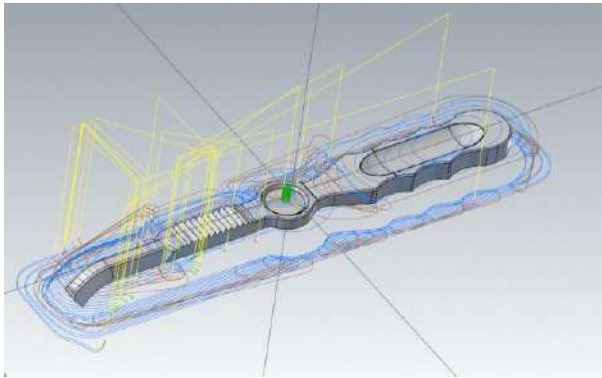
Рисунок 1. Универсальный обрабатывающий центр DMU 50

С использованием CAM программы «MasterCAM» была разработана технология изготовления инструмента «распатор Фарабефа». На станке с ЧПУ DMU50 (рисунок 1) был изготовлен опытный образец. Материал инструмента — нержавеющая сталь AISI 321 (12X18H10T). Механическая обработка всех функциональных поверхностей, за исключением нижней, выполняется за одну установку, что обеспечивает повышение точности и снижение погрешностей базирования. Окончательное отделение детали от заготовки осуществляется методом электроэрозионной обработки на станке JYCNC DK774.

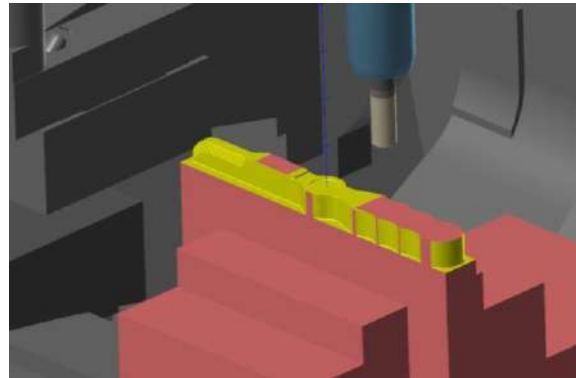
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках исследования разработана и реализована технология изготовления медицинского инструмента «распатор Фарабефа» на пяти осевом обрабатывающем центре DMU 50 с системой управления Sinumerik 840sl.

На первом этапе обработки выполнялась черновая обработка верхней поверхности заготовки (рисунок 2) с использованием стратегии высокоскоростной обработки Dynamic OptiRough в среде MasterCAM, при этом применялась концевая фреза диаметром 12 мм, для которой из рекомендованных производителями режимов были выбраны: частота вращения шпинделя составляла 1857 об/мин, подача — 335,7 мм/мин, а припуск на чистовую обработку — 0,3 мм; время выполнения операции составило 26 мин 6 с. Использование стратегии Dynamic OptiRough позволило снизить ударные нагрузки на инструмент, обеспечить равномерное распределение припуска и повысить стабильность процесса резания, что особенно важно при обработке нержавеющей стали AISI 321, склонной к наклёпу и повышенному износу инструмента.



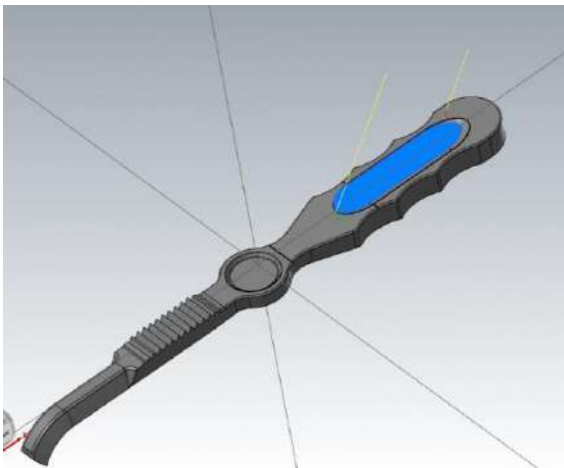
а) Траектория обработки в программе «MasterCAM»



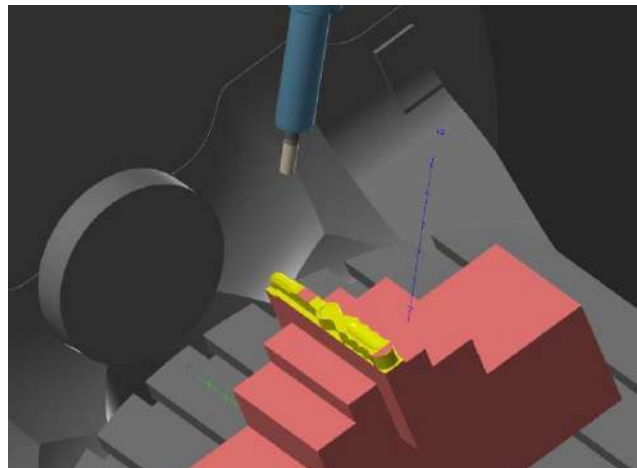
б) Схема установки заготовки на станок DMU 50.

Рисунок 2. Траектория инструмента при черновой обработке в MasterCAM

Чистовая обработка (рисунок 3) выполнялась с использованием стратегии Raster (ориентация Raster55) в среде MasterCAM с применением конусной фрезы диаметром 7 мм, для которой из рекомендованных производителями режимов были выбраны: вращения шпинделя составляла 2508 об/мин, подача — 1470,2 мм/мин, а припуск на обработку — 0 мм; время выполнения операции составило 2 мин 48 с. Применение данной стратегии обеспечило формирование окончательной геометрии инструмента, получение равномерной структуры поверхности и минимизацию шероховатости, при этом по результатам обработки визуально зафиксировано высокое качество поверхности без видимых дефектов, таких как задиры, прижоги и следы вибраций.



а) Чистовая обработка криволинейных поверхностей



б) Чистовая обработка прямых вертикальных поверхностей

Рисунок 3. Чистовая обработка поверхностей инструмента

Анализ эффективности технологии показывает, что использование CAD/CAM программа MasterCAM обеспечивает оптимизацию траекторий инструмента, снижение холостых перемещений и повышение производительности обработки.

В результате реализации разработанной технологии был изготовлен опытный образец медицинского инструмента «распатор Фарабефа».

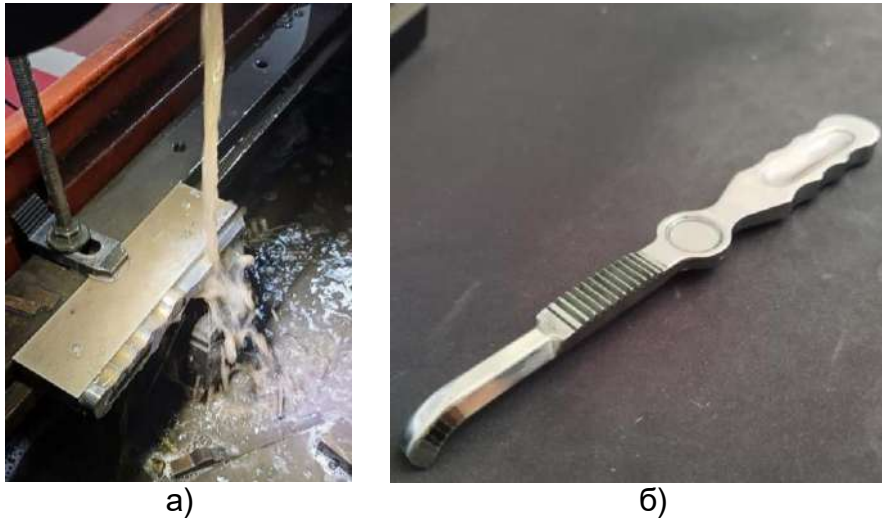


Рисунок 4. а) - процесс отрезание детали на электроэрозионном станке JYCNC DK774; (б) - готовая деталь

Полученная поверхность соответствует требованиям ГОСТ 19126-2007 к медицинским инструментам, визуально не имеет дефектов, а готовое изделие удовлетворяет геометрическим и эксплуатационным характеристикам. Полученные результаты подтверждают, что использование современных CAD/CAM технологий в сочетании с 5 - ти осевой обработкой на станках с ЧПУ позволяет обеспечивать оптимизацию траекторий инструмента, снижать количество холостых перемещений и повышать производительность обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная новизна работы заключается в разработке и экспериментальной реализации технологии изготовления медицинского инструмента сложной пространственной формы на основе применения высокоскоростных стратегий обработки (Dynamic OptiRough и Raster) в условиях 5 –ти осевой механообработки. В отличие от существующих подходов, предложенная технология обеспечивает сокращение времени обработки, повышение точности изготовления за счёт минимизации установок, а также улучшение качества поверхности при обработке нержавеющей стали AISI 321.

Полученные результаты расширяют представления о возможностях применения CAD/CAM систем при проектировании и изготовлении медицинских инструментов и могут служить основой для разработки новых технологических решений в области машиностроения медицинского назначения.

Практическая значимость исследования определяется возможностью создания конкурентоспособного отечественного производства медицинских инструментов, что позволит снизить стоимость хирургических комплектов и повысить доступность медицинских услуг. Повышение качества жизни и здоровья населения Казахстана напрямую зависит от успешного решения стратегической задачи по развитию индустрии медицинских услуг. В дальнейшем планируется разработка и изготовление опытных образцов отечественных инструментов для травматологии и ортопедии Республики Казахстан, подготовка технологической документации, а также разработка маршрутно-технологических и операционных карт по их производству.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках реализации программы BR24992786 «Разработка технологии изготовления образцов отечественных медицинских инструментов и изделий медицинского назначения».

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО

ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке рукописи использовалась генеративная модель ИИ ChatGPT (OpenAI) для редактирования текста и улучшения научного стиля. ИИ применялся как вспомогательный инструмент; авторы полностью отвечают за достоверность данных и содержание работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Alontseva, D.; Yavuz, H.İ.; Azamatov, B.; Khoshnaw, F.; Safarova, Y.; Dogadkin, D.; Avcu, E.; Yamanoglu, R. Improving Corrosion and Wear Resistance of 316L Stainless Steel via In Situ Pure Ti and Ti6Al4V Coatings: Tribocorrosion and Electrochemical Analysis. *Materials* 2025, 18, 553. <https://doi.org/10.3390/ma18030553>.
- Alontseva D.L., Azamatov B., Voinarovych S., Kyslytsia O., Koltunowicz T.N., Toxanbayeva A. Development of Technologies for Manufacturing Medical Implants Using CNC Machines and Microplasma Spraying of Biocompatible Coatings // *Przegląd Elektrotechniczny*. — 2020. — Vol. 96. — No 4. — P. 154-157. [doi:10.15199/48.2020.04.32](https://doi.org/10.15199/48.2020.04.32).
- Doudkin M., Kim A., Kombayev K., Azamatov B., Azamatova Z. Research of cutting temperature reducing of titanium alloy grade 5 below polymorphic transformation depending on calculation of cutting modes // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. — 2020. — 10(2), P. 747-758 [DOI: 10.24247/ijmperdapr202074](https://doi.org/10.24247/ijmperdapr202074).
- Рыжкова Е.В., Азаматов Б.Н., Азаматова Ж.К., Мұхаметбек Ж.М., Бауржанова А.Б. Технология программирования станка с ЧПУ в среде MASTERCAM-2018 для изготовления имплантатов из титановых сплавов // *Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева*. — 2019. — №4. — С.139-144.
- Азаматов Б.Н., Мұхаметбек Ж.М., Азаматова Ж.К., Кумаргажанова С.К., Рыжкова Е.В. Способ изготовления медицинских имплантатов из титановых сплавов на станках с ЧПУ // *Авторское право: программа ЭВМ №4602/22.07.2019*.
- Alontseva D.L., Ghassemieh E., Voinarovych S., Kyslytsia O., Polovetskyi Y., Prokhorenkova N., Kadyroldina A.T. Manufacturing and characterisation of robot assisted microplasma multilayer coating of titanium implants: Biocompatible coatings for medical implants with improved density and crystallinity // *Johnson Matthey Technology Review*. — 2020. — 64(2). — P.180-191. <https://doi.org/10.1595/205651320X15737283268284>.
- Алонцева Д.Л., Русакова А.В., Красавин А.Л., Прохоренкова Н.В., Кадыролдина А.Т. Разработка технологии микроплазменного нанесения биосовместимых покрытий для изготовления медицинской продукции // *Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева*. — 2017. — №3 (77). — С.65-71.
- Implants for Surgery - Plasma-sprayed unalloyed titanium coatings on metallic surgical implants - part 1: General requirements. International Organisation for Standards. BS ISO 13179-1:2014, 2014.
- ГОСТ 19126-2007 (Инструменты медицинские металлические): устанавливает общие требования к распаторам, включая требования к отсутствию трещин и раковин после литья.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА СФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА

УДК 004.942

Ю.А. Недобитков¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

АННОТАЦИЯ. Демонстрируются особенности высокоскоростного удара стального шарика о закреплённую на дюралюминиевой пластине медную ленту. Изменение структуры материала пластины демонстрируется при помощи методов растровой микроскопии, спектрального анализа и цифрового моделирования. В качестве обоснования деформации создана упрощённая одноосная математическая модель прямого неупругого соударения абсолютно твёрдого шара с плоской поверхностью пластины, свободно лежащей на геометрически и физически нелинейном неподвижном полупространстве. Модель учитывает все характерные особенности материалов соударяющихся тел, позволяя описывать нелинейные пластические деформации с высокой степенью точности.

В результате проведённого анализа приводится инновационное математическое обоснование деформации твёрдого тела на основе принципов волнового переноса. По итогам настоящей работы подтверждается правильность и современность подхода нелокальной динамики к деформациям в конденсированном состоянии, тем самым актуализируя значение данного исследования для практической реализации этого направления физики твёрдого тела. Принципы предлагаемой математической модели могут использоваться при моделировании и прогнозировании высокоскоростного удара на основании современных цифровых методов и искусственного интеллекта.

Ключевые слова: цифровая модель, напряжение, удар, кинетическая энергия.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время высокую научную и техническую актуальность сохраняет исследование высокоскоростного удара [1-3]. В частности, значительный интерес представляет моделирование данного процесса, проводимое с учётом характеристик и конструктивных схем машин и изделий, подверженных ударно-взрывным нагрузкам [4]. Другим популярным направлением его исследования является экспериментальный анализ, чаще всего осуществляемый при помощи стального шара и преграды из сплавов алюминия [5-8], однако в качестве препятствия также могут использоваться напечатанные на 3D-принтере композитные материалы [1], многослойные панели [2], ламинаты с технологическими покрытиями [3], усиленный проволоочной структурой из сплава с эффектом памяти бетон [9]. Необходимо отметить, что значительная часть таковых работ не применяет комплексный подход при изучении удара, рассматривая либо его механизм, либо итоговую устойчивость ему материала. Так, работа [7] является одной из немногих, приводящих данные как по проникновению шара в пластину, так и об изменении структуры материала, в частности — размеров зерна.

Важно сказать, что многие авторы при описании деформации материала преграды говорят не просто о количественных, но и о качественных изменениях структуры, включая перестроение кристаллической решётки [10; 11] и фазовые превращения [10; 12]. С другой стороны, работами [13; 14] показывается, что при ударном сжатии материал образца, во-первых, не достигает температур, близких к температурам плавления, и, во-вторых, находится в неравновесном состоянии. Авторы [15] полагают, что в тепловые колебания преобразуется не более 35%

пластической работы удара, в то время как остальная энергия затрачивается на модификацию структуры, что позволяет объяснить значительные изменения, происходящие ниже температуры плавления.

Все вышеописанные феномены говорят о значительной сложности пластических деформаций, индуцируемых высокоскоростным ударом. Так как диссипация энергии осуществляется комплексным образом [10], а взаимодействия выражаются в плеторе эффектов решётки и зерна, для описания высокоскоростной ударной деформации необходимо применение раз витой системы динамического анализа, основанной на механических принципах. Роль таковой традиционно исполняет направление мезомеханики [16]. Применение мезомеханических принципов позволяет, используя знание о неравновесности состояний деформации, говорить о механизме волновых пакетов как основном способе её перенесения [17]. Необходимо отметить, что в силу низких температур, наблюдаемых в подверженном искажению материале [15], результирующая дефектная структура не является продуктом пластического течения, так как весь процесс воздействия проходит в конденсированном состоянии [17].

Применение анализа, основанного на постулатах мезомеханики, позволяет объяснить как вышеописанные структурные деформации, так и качественные изменения материала, что особенно актуально при исследовании высокоскоростного удара. Так, работы [18; 19] показывают, что ударное воздействие приводит к глубинным преобразованиям материала, причиной чего служат неравномерное распределение энергии колебаний по степеням свободы и образование локальных метастабильных состояний, что согласуется с мезомеханическими выводами о наличии при деформации ограниченных стабильных наносостояний [20].

Таким образом, современная мезомеханика играет ключевую роль в понимании воздействия ударных деформаций. Очевидно, что в рамках моделирования высокоскоростного ударного воздействия [4; 21; 22] необходимо учитывать процессы, происходящие на мезоуровне [23]. Целью настоящей работы является определение принципов моделирования высокоскоростных ударных деформаций для точной и актуальной цифровой симуляции. Задачи исследования включают доказательство сложных преобразований материала преграды при высокоскоростном ударе, построение расчётной схемы удара и создание упрощённой математической модели, связывающей механические свойства преграды, нагрузку и итоговые параметры деформации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились в Центре превосходства «Veritas» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева с использованием растровых электронных микроскопов JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа и TESCAN MIRA LMS, оптического микроскопа Olympus BX51 и портативного спектрометра BRUKER S1 TITAN.

В качестве образцов исследования выступили стальной шарик массой 1,4 г. и диаметром 10 мм, и медные пластины толщиной 4 мм, подвергнутые высокоскоростному удару в эксперименте авторов [7]. Спектроскопическим анализом установлено, что материал шарика соответствует хромистой подшипниковой стали типа ШХ 15 по ГОСТ 801-2022, а материал пластин — меди М2 по ГОСТ 1173-2006. Начальная скорость шара, согласно работе [7], составляла 750 м/с.

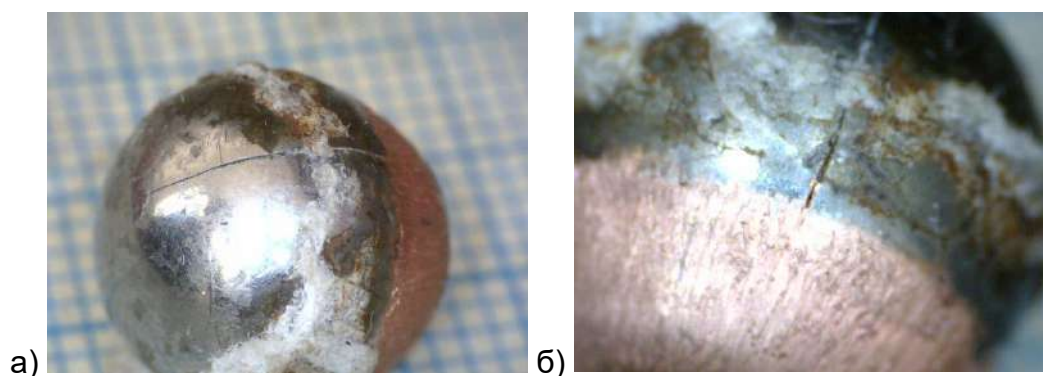


Рисунок 1. Стальной шар, подверженный высокоскоростному удару с медной преградой: а — общий вид, б — приближение участка трещины.

Значительная деформация заметна как для шара, так и для поверхности пластины. Вид шара после повреждения представлен на рис. 1,2. В частности, на рис 1., 2а заметна трещина на его поверхности. Необходимо отметить, что на полуплоскости шара, непосредственно вступившей в ударное воздействие с преградой, наблюдаются следы меди (рис. 1б, рис. 2б), что соответствует выводам авторов [24] о выбросе материала при высокоскоростном ударе.

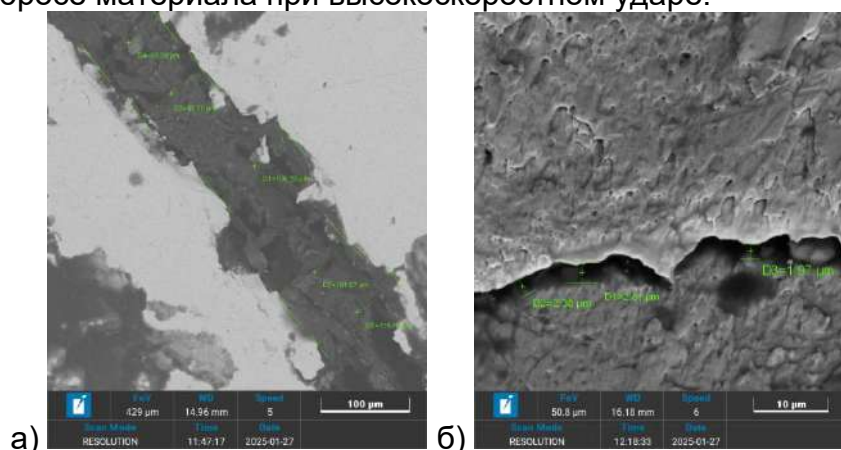


Рисунок 2. Трещина и перенос материала мишени на поверхности шара: а — увеличение, б — увеличение .

Построение математической модели соударения осуществлялось аналитическим образом на основе применения мезомеханических приближений к плоскостной проекции высокоскоростного удара. Следует указать, что таковой подход позволяет превзойти недостатки существующих аналитических моделей проникновения тела в преграду в результате удара [25]. Для перехода от трёхмерного взаимодействия соударяющихся тел к одноосной технической модели были задействованы следующие допущения: во-первых, медная пластина закреплена на неподвижном неупругом полупространстве; во-вторых, её материал однороден, имеет сплошную структуру и не подчиняется закону Гука [26-28]; в-третьих, удар осуществляется вследствие взаимодействия жёсткого диска, по массе и объёму равному истинному шару, и цилиндрической части пластины. Для модели также действуют классические положения сопротивления материалов и теоретической механики [27-30].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [31] приведена двuosная струевая модель ударного воздействия

(рис.2), опирающуюся на распространение ударной волны в преграде. Значительную сложность в её практическом применении представляет то, что она, во-первых, предполагает одинаковый материал пластины и шара, во-вторых, не рассматривает отражение и преломление волны на частицах преграды, и, в-третьих, не учитывает механические свойства сталкивающихся тел [22; 31]. В работе [32] предлагается двусная модель геометрического распространения ударной волны (рис. 3), которая позволяет моделировать движение ударной волны в преграде с большей точностью.

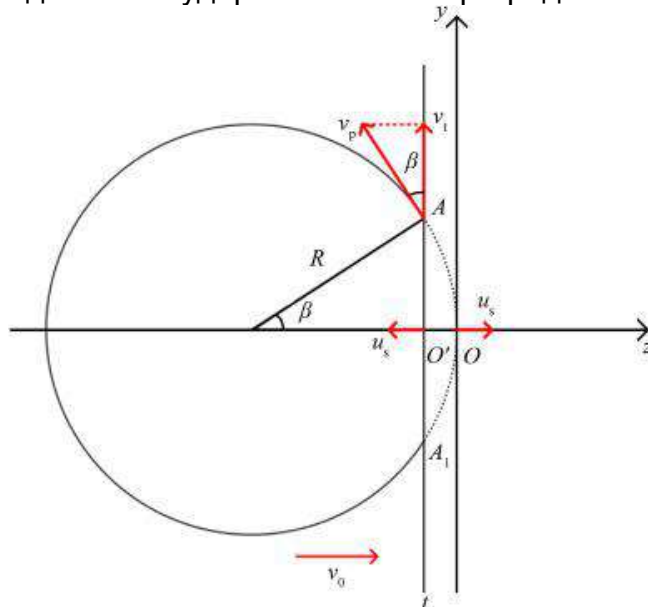


Рисунок 2. Модель высокосортного ударного воздействия, основывающаяся на струевой инициации ударной волны: шар радиусом R ударяется о преграду со скоростью v_0 , u — скорости частиц ударной волны [22; 31].

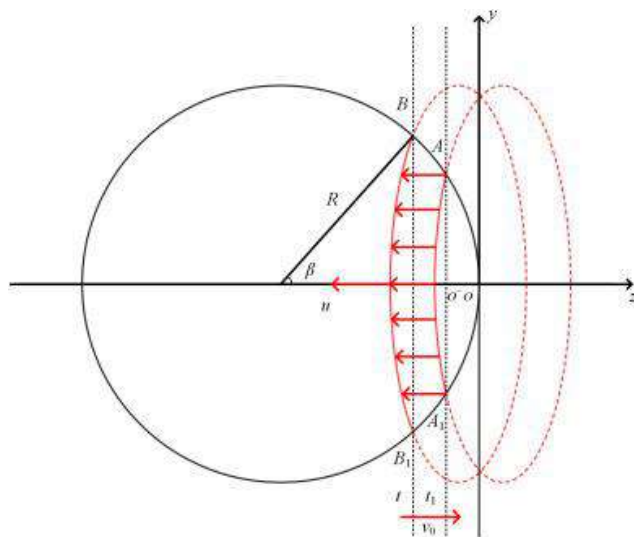


Рисунок 3. Модель геометрического распространения фронта ударной волны при высокосортном ударе: R — радиус шара, v_0 — его начальная скорость, t и t_1 — время распространения ударной волны. [22; 32].

Параметрический анализ моделей [31; 32] осуществляется на основе метода осевого давления, которое связывается со временем и скоростью прохождения ударной волны [22]:

$$u_s = 2.69 + 0.25\sqrt{115.68 + 8P}, \quad (1)$$

где u_s — скорость ударной волны, P — давление в зоне удара. Другими важными

уравнениями, применяемыми в таковой форме исследования, являются отношения Гюгоню для скорости ударной волны и скорости частиц материала [33]:

$$u_s = C + \lambda u_p, \quad (2)$$

где C — постоянная скорость распространения ударной волны в материале преграды, λ — безразмерная константа конвертации скорости частиц в скорость волны, а также давления и скорости частиц:

$$P = 14.41u_p + 3.59u_p^2. \quad (3)$$

Корректный расчёт давления и распространения волны требует знания скорости частиц в зоне контакта, лежащей на линии AA_1 (рис.2, 3). Необходимо отметить, что принятая линейная природа волновых процессов и абстракция происходящей деформации преграды не позволяют моделям [22; 31; 32] подлинно описать происходящие в ней нелинейные процессы, указанные в работах авторов [17; 20; 23].

В настоящей работе предлагается одноосная модель высокоскоростного удара, учитывающая свойства объектов соударения (рис.4). Вместо связки «давление-скорость» [22] акцент при параметрическом анализе делается на отношениях силы ударного воздействия P , напряжений σ и линейной деформации ε , элементами которой являются диаметр d и толщина h непосредственно подверженного высокоскоростному удару цилиндрического участка преграды. Оценка линейных размеров базируется на измерениях цифровой модели, полученной в работе [34].

Вместо временных отметок t и t_1 [22; 32; 35] применяется концепция начального и конечного состояния, где первое характеризуется скоростью шара $v = \text{const}$, второе — скоростью v , равной нулю, и экстремальной силой удара $P_{\max}$. Такой подход позволяет, в совокупности с использованием одной оси симметрии, упростить вычислительный процесс за счёт выделения точных граничных условий, сохраняя при этом комплексность реального процесса. Относительная линейная пластическая (остаточная) деформация в конечном состоянии, согласно классическому представлению Коши [26; 28; 36], представляет сжатие пластины преграды до половины от своей изначальной толщины. Учёт значительных пластических деформаций осуществляется при помощи логарифмической меры Генки [27,35].

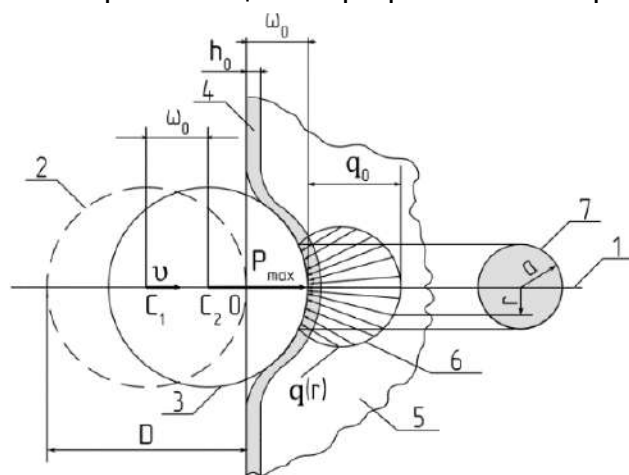


Рисунок 4. Модель неупругого соударения абсолютно жесткого шара с поверхностью медной ленты: 1 — ось симметрии, 2 — положение шара в момент его касания с лентой, 3 — момент наибольшего внедрения, соответствующий нулевой скорости и экстремальной силе удара $P_{\max}$, 4 — физически нелинейный слой ленты толщиной h_0 , 5 — неупругое полупространство, 6 — эпюра реактивного давления

$q(r)$ и ее максимум q_0 , 7 — радиальный размер проекции шаровой поверхности контакта.

Сжатие материала пластины нелинейно и аппроксимируется при помощи кубического многочлена [28]:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon_l) = E \left(\varepsilon_l - \frac{\varepsilon_l^2}{\varepsilon_{l0}} + \frac{\varepsilon_l^3}{3\varepsilon_{l0}^2} \right), \quad (4)$$

где E — начальный модуль упругости материала пластины, ε_l — линейная деформация. Получение дальнейших параметров осуществляется в рамках приближения, в котором кинетическая энергия шара полностью конвертируется в энергию деформации. Необходимо сказать, что данное допущение не влияет на точность вычислений, так как их результаты можно привести к таковым для энергетического распределения, указанного в работе [15] при помощи линейных коэффициентов.

Главными отношениями, характеризующими предлагаемую модель с аналитической точки зрения, являются выражения для диаметра изначальной зоны взаимодействия поверхности преграды с шаром

$$d_0 = \frac{2v}{|\varepsilon_l|} \cdot \sqrt{\frac{2m}{\pi \cdot E \cdot h_0}}, \quad (5)$$

где m — масса шара, h_0 — начальная толщина пластины, и экстремальной силы удара P_{max}

$$P_{max} = \frac{2v^2 \sigma}{\varepsilon_l^2 \cdot E \cdot h_0}, \quad (6)$$

где σ — предельное нелинейное напряжение в конечном состоянии.

Таким образом, предложенная в ходе данного исследования аналитическая модель высокоскоростного удара позволяет рассматривать деформацию преграды с более высокой точностью и с учётом большего числа параметров, чем модели [31; 32].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе настоящей работы были успешно доказаны глубокие структурные преобразования материала преграды, отмечаемые авторами [7; 10; 11]. Были построены базовые расчётные модели и определены основные аналитические зависимости, характеризующие высокоскоростной удар. Важно сказать, что полученные тождества соответствуют как положениям мезомеханики [16; 17], так и традиционным принципам сопротивления материалов [26; 27; 29], что обеспечивает их высокую актуальность для использования в цифровых системах моделирования высокоскоростного удара [37].

Симуляция ударного воздействия, в том числе с применением методов машинного обучения и искусственного интеллекта, представляет значительный как научный [22; 38; 39], так и технический [4] интерес. Использование результатов данного исследования при построении аналитических алгоритмов даст возможность прогнозирования последствий деформаций, вызванных высокоскоростным ударом, с высокой степенью точности.

Векторами дальнейших исследований, таким образом, должны стать создание глубинных симуляционных моделей на основе искусственного интеллекта, а также интеграция прогнозирования фазовых изменений, происходящих в преграде в ходе высокоскоростного удара, как отмечается авторами [10; 12].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта

интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В рамках создания настоящей работы не применялись технологии искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Fisher T., Kazancı Z., Almeida J. H. S.* High-velocity impact response of 3D-printed composite mechanical metamaterials // International Journal of Mechanical Sciences. - 2025. - Янв. - Т. 286. - С. 109905. - ISSN 0020-7403. - DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2024.109905. - URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109905>.
- Modeling and analysis of the high-velocity impact resistance of composite butterfly-shaped honeycomb sandwich panels with shear-stiffening material / G. Sun [и др.] // Thin-Walled Structures. - 2026. - Апр. - Т. 222. - С. 114518. - ISSN 0263-8231. - DOI: 10.1016/j.tws.2026.114518. - URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2026.114518>.
- Study on High-velocity impact response and compression after impact properties of polyaspartic ester polyurea coated CFRP laminates / Z. Zhou [и др.] // International Journal of Impact Engineering. - 2026. - Авг. - Т. 214. - С. 105716. - ISSN 0734-743X. - DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2026.105716. - URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2026.105716>.
- Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент / под ред. А. В. Герасимова. - Томск : НТЛ, 2016. - 586 с. - ISBN 978-5-89503-576-4.
- Ballistic impact experiments and modeling on impact cratering, deformation and damage of 2024-T4 aluminum alloy / J.Cheng [и др.] // International Journal of Mechanical Sciences. - 2022. - Июнь. - Т. 224. - С. 107312. - ISSN 0020-7403. - DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107312. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107312>.
- Taylor impact of high-entropy alloy Al_{0.1}CoCrFeNi: Dynamic severe plastic deformation and bulk gradient structure / J. Xu [и др.] // Journal of Alloys and Compounds. - 2023. - Март. - Т. 936. - С. 168261. - ISSN 0925-8388. - DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.168261. - URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168261>.
- Анисимов А. Г., Ахмед Солиман М. Э.* Моделирование удара стального шарика об алюминиевую пластину Д16 и сравнение с экспериментом // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2024. - Февр. - № 1. - С. 79-87. - ISSN 0235-7119. - DOI: 10.31857/s0235711924010092. URL: <http://dx.doi.org/10.31857/S0235711924010092>.
- Experimental and theoretical researches of high-speed interaction of thin obstacles with a metal fragment / S. Afanasyeva [и др.] // EPJ Web of Conferences / под ред. V. Fomin, L. Placidi. 2019. - Т. 221. - С. 01043. - ISSN 2100-014X. - DOI: 10.1051/epjconf/201922101043. - URL: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201922101043>.
- Optimizing penetration resistance of Ni-Ti shape memory alloy fiber reinforced concrete under high impact velocity: a comprehensive study / W. Sun [и др.] // Journal of Building Engineering. - 2025. - Нояб. - Т. 114. - С. 114250. - ISSN 2352-7102. - DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.114250. - URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114250>.
- Glezer A., Permyakova I.* PHYSICS OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION // Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. - 2016. - Т. 21, № 3. - С. 721-725. - ISSN 1810-0198. - DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21_3-721-725. - URL: <http://dx.doi.org/10.20310/1810-0198-2016-21-3-721-725>.
- Microhardness and Dynamic Yield Strength of Copper Samples upon Impact on a Rigid Wall / N. V. Pakhnutova [и др.] // Advanced Engineering Research. - 2022. - Окт. - Т. 22, № 3. - С. 224-231. - ISSN 2687-1653. - DOI: 10.23947/2687-1653-202222-3-224-231. - URL: <http://dx.doi.org/10.23947/2687-1653-202222-3-224-231>.
- Бродова И. Г., Зельдович В. И., Хомская И. В.* Фазово-структурные превращения и свойства цветных металлов и сплавов при экстремальных воздействиях // Физика металлов и металловедение. - 2020. - Т. 121, № 7. - С. 696-730. - ISSN 0015-3230. - DOI: 10.31857/s0015323020070025. — URL: <http://dx.doi.org/10.31857/S0015323020070025>.

- Гилев С. Неравновесность физического состояния меди при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. - 2021. - Т. 57, № 3. - С. 135-142. - ISSN 0430-6228. - DOI: 10.15372/fgv20210314. - URL: <http://dx.doi.org/10.15372/FGV20210314>.
- Гилев С. Генерация дефектов при ударном сжатии алюминия // Физика горения и взрыва. - 2023. - ISSN 0430-6228. - DOI: 10.15372/fgv2022.9236. - URL: <http://dx.doi.org/10.15372/FGV2022.9236>.
- Диссипативные структуры в ударно-деформируемой меди / Ю. И. Мещеряков [и др.] // Физическая мезомеханика. - 2007. - Т. 10, № 5. - С. 63-39. - ISSN 0430-6228.
- Панин В. Е. Синергетические принципы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. - 2000. - Т. 3, № 6. - С. 5-36. - ISSN 1683-805X.
- Нелокальная механика переноса в динамически деформируемой среде. Волновая концепция мезоуровня. / Т. А. Ханутлева [и др.] // Физическая мезомеханика. - 2024. - Т. 27, № 6. - С.55-75. - ISSN1683-805X.
- Киселёв С., Киселёв В. Компактирование порошка меди в ударной волне. // Физическая мезомеханика. - 2006. - Т. 9, № 6. - С. 59-70. - ISSN 1683-805X.
- Киселёв С. Моделирование динамического разрушения композитных наночастиц типа медь-молибден методом молекулярной динамики. // Физическая мезомеханика. - 2008. - Т. 11, № 6. - С. 5-15. - ISSN1683-805X.
- Панин В. Е. Роль локальных наноструктурных состояний в пластической деформации и разрушении твердых тел. // Физическая мезомеханика. - 2012. - Т. 15, № 5. - С. 5-18. - ISSN 1683-805X.
- Machine-Learning-Based Model of Elastic-Plastic Deformation of Copper for Application to Shock Wave Problem / A. E. Mayer [и др.] // Metals. - 2022. - Февр. - Т. 12, № 3. - С.402. - ISSN 2075-4701. - DOI:10.3390/met12030402. - URL: <http://dx.doi.org/10.3390/met12030402>.
- Phase geometric propagation model of spherical projectile impacting thin plate based on shock wave propagation / L. Chen [и др.] // Defence Technology. - 2026. - Февр. - Т. 56. - С. 14-31. - ISSN 2214-9147. - DOI: 10.1016/j.dt.2025.09.034. - URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dt.2025.09.034>.
- Numerical simulation of mesomechanical behavior of porous brittle materials / I. Smolin [и др.] // Procedia Structural Integrity. - 2016. - Т. 2. - С. 3353-3360. - ISSN 2452-3216. -DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.418. - URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.418>.
- First contact: Fine structure of the impact flash and ejecta during hypervelocity impact / G. Simpson [и др.] // PNAS Nexus / под ред. S. Fuselier. - 2023. - Июль. - Т. 2, № 7. - ISSN 2752-6542. - DOI: 10.1093/pnasnexus/pgad214. - URL: <http://dx.doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad214>.
- Anderson Jr. C. E. Analytical models for penetration mechanics: A Review // International Journal of Impact Engineering. - 2017. - Окт. - Т. 108. - С. 3-26. - ISSN 0734-743X. - DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.03.018. - URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.03.018>.
- Филин А. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. Т.1.- Москва: Наука, 1975.
- Биргер И., Мавлютов Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие. - Москва: Наука, 1986.
- Лукаш П. Основы нелинейной строительной механики. - Москва: Наука, 1978.
- Тимошенко С., Гудьер Д. Теория упругости / под ред. Г. Шапиро. - Москва: Наука, 1975. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности: Учебник для вузов / Г. Варданян [и др.]; под ред. Г. Варданяна. - Москва: АСВ, 1995.
- Ang J. A. Impact flash jet initiation phenomenology // International Journal of Impact Engineering. - 1990. - Янв. - Т. 10, № 1-4. - С. 23-33. - ISSN 0734-743X. - DOI: 10.1016/0734-743x(90)90046-x. - URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0734743X\(90\)90046-X](http://dx.doi.org/10.1016/0734743X(90)90046-X).
- Wen K., Chen X.-w. Analysis of the stress wave and rare faction wav produced by hypervelocity impact of sphere onto thin plate // Defence Technology. - 2020. - Окт. - Т. 16, № 5. - С. 969-979. - ISSN2214-9147. - DOI: 10.1016/j.dt.2019.11.017. -

URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.dt.2019.11.017>.

Piekutowski A. Formation and description of debris clouds produced by hypervelocity impact. – 1996.

Digital Model of a Target in High Speed Impact Experiments / A. Nedobitkov [и др.] // *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. - 2025. - Т. 19. - URL: <http://www.issp.ac.ru/journal/surface/2025/Supplement2025.pdf> (дата обр.

25.03.2026).

Numerical simulation of impact crater formation and distribution of high-pressure polymorphs / H. Lv [и др.] // *Acta Astronautica*. - 2023. - Февр. - Т. 203. - С. 169-186. - ISSN 0094-5765.

- DOI:10.1016/j.actaastro.2022.11.048.-
URL:<http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.048>.

Пановко Я., Губанова И. Устойчивость и колебание упругих систем: Современные концепции, парадоксы и ошибки. - 4-е изд. - Москва: Наука, 1987.

Wei X., Zhao L., Sun Y. Deep learning-based high-throughput mesomechanical analysis framework for particulate composites // *Construction and Building Materials*. — 2026. — Февр. - Т.512. - С.145403. - ISSN 0950-0618.-DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2026.145403. - URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.145403>.

Mizuno Y., Misaka T., Furukawa Y. Physics-informed neural network modeling of shock waves by appropriately incorporating equation of state // *Scientific Reports*. - 2026. - Янв. - Т. 16, № 1. - ISSN 2045-2322. - DOI: 10.1038/s41598-026-35369-w. - URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-026-35369-w>.

Challenges and advancements in modeling shock fronts with physics-informed neural networks: A review and benchmarking study / J. Abbasi [и др.] // *Neurocomputing*. - 2025. - Дек. - Т. 657. - С. 131440. - ISSN 0925-2312. - DOI: 10.1016/j.neucom.2025.131440. - URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2025.131440>.

АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ АЛГЕБРАЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ҚОЛДАНЫЛУ МҮМКІНДІКТЕРІ

ӨОЖ 512:004.056

Ж. Нязбек^{1*}, Ж.Т. Рахметуллина¹

¹Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы,

*Корреспондент-автор: Жулдыз Нязбек, e-mail: juldizniazbek35@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Бұл мақалада жасанды интеллект (ЖИ) жүйелерінде ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз етуде қолданылатын алгебралық құрылымдарға негізделген криптографиялық әдістерге теориялық салыстырмалы талдау жүргізіледі. Зерттеудің мақсаты – классикалық (RSA, эллиптикалық қисықтар) және посткванттық (торлық және гомоморфты шифрлау) криптожүйелердің алгебралық негіздерін жүйелеу және олардың ЖИ жүйелерінің қауіпсіздік талаптарына сәйкестік деңгейін анықтау.

Зерттеу барысында абстрактілі алгебра әдістері, құрылымдық-логикалық талдау, криптографиялық алгоритмдердің есептеу күрделілігін салыстыру және қауіпсіздік критерийлері бойынша теориялық бағалау тәсілдері қолданылды. Салыстырмалы талдау нәтижесінде классикалық алгебралық модельдердің тиімділігі дәлелденгенімен, олардың кванттық есептеу жағдайында тұрақтылығы шектеулі екені анықталды. Торлық және гомоморфты модельдердің ЖИ жүйелерінде деректер құпиялылығын сақтау және қауіпсіз есептеулер жүргізу тұрғысынан анағұрлым перспективалы екені көрсетілді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы – алгебралық криптожүйелерді ЖИ қауіпсіздік архитектурасының талаптары тұрғысынан алғаш рет жүйелі салыстыруында және тиімділік критерийлерін тұжырымдауында. Алынған нәтижелер интеллектуалдық жүйелердің қауіпсіздігін математикалық негізде жетілдіруге және посткванттық бағыттағы зерттеулерді дамытуға теориялық база қалыптастырады.

Түйінді сөздер: Ақпараттық қауіпсіздік, алгебралық құрылымдар, криптография, посткванттық криптография, гомоморфты шифрлау.

КІРІСПЕ

Жасанды интеллект (ЖИ) технологиялары қазіргі таңда экономиканың, өндірістің, қаржы секторының, денсаулық сақтау мен білім беру жүйесінің негізгі цифрлық инфрақұрылымына айналды. Машиналық оқыту модельдері үлкен көлемдегі деректерді өңдеп, автоматтандырылған шешім қабылдау жүйелерін қалыптастыруда. Алайда ЖИ жүйелерінің кеңінен енгізілуі ақпараттық қауіпсіздік мәселесін күрделендіре түсуде. Интеллектуалдық жүйелер деректердің құпиялылығын, тұтастығын және қолжетімділігін қамтамасыз етуді талап етеді, ал бұл міндеттер математикалық негізделген криптографиялық механизмдер арқылы жүзеге асырылады.

Қазіргі криптографияда алгебралық құрылымдарға негізделген әдістер кеңінен қолданылады. Мысалы, RSA алгоритмі модульдік арифметика мен сақина теориясына, ал эллиптикалық қисықтар криптографиясы өрістер теориясына сүйенеді. Соңғы жылдары торлық (lattice-based) және гомоморфты шифрлау модельдері посткванттық қауіпсіздік тұрғысынан ерекше маңызға ие болып отыр. Дегенмен, аталған криптожүйелердің ЖИ жүйелерінің қауіпсіздік архитектурасымен сәйкестігі мен тиімділігі жүйелі түрде салыстырылып зерттелмеген.

Осыған байланысты зерттеудің мақсаты – алгебралық құрылымдарға негізделген криптографиялық әдістерді теориялық тұрғыда салыстырмалы талдау және олардың

жасанды интеллект жүйелерінің қауіпсіздік талаптарына сәйкестік деңгейін анықтау. Зерттеу объектісі – ЖИ жүйелеріндегі ақпараттық қауіпсіздік механизмдері, ал зерттеу пәні – алгебралық криптожүйелердің құрылымдық қасиеттері мен қолданылу ерекшеліктері.

Зерттеу барысында құрылымдық-логикалық талдау, салыстырмалы әдіс, есептеу күрделілігін бағалау және қауіпсіздік критерийлерін жүйелеу тәсілдері қолданылды. Жұмыстың гипотезасы – посткванттық алгебралық модельдер ЖИ жүйелерінің ұзақ мерзімді қауіпсіздігін қамтамасыз етуде классикалық криптожүйелерге қарағанда анағұрлым тиімді болып табылады.

Осы зерттеу жасанды интеллект технологияларының даму үрдістері контекстінде ақпараттық қауіпсіздіктің математикалық негіздерін айқындауға және интеллектуалдық жүйелердің сенімділігін арттыру бағытында ғылыми тұжырымдар жасауға бағытталған.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу барысында жасанды интеллект жүйелерінде қолдануға әлеуеті жоғары екі криптографиялық бағыт таңдалды: эллиптикалық қисықтар криптографиясы (ECC) және торлық (lattice-based) посткванттық криптография. Аталған модельдер қазіргі ақпараттық қауіпсіздік саласында өзекті және алгебралық құрылымдарға негізделген.

Эллиптикалық қисықтар криптографиясы ақырлы өрістердегі эллиптикалық қисықтардың топтық құрылымына негізделеді. Жалпы жағдайда эллиптикалық қисық келесі теңдеумен анықталады:

$$y^2 = x^3 + ax = b$$

мұндағы a, b — ақырлы өрістің элементтері, және $4a^3 + 27b^2 \neq 0$ шарты қисықтың сингуляр емес болуын қамтамасыз етеді. Қауіпсіздік эллиптикалық қисықтағы дискреттік логарифм есебінің есептеу күрделілігіне негізделеді.

Оның қауіпсіздігі дискреттік логарифм есебінің күрделілігімен анықталады. Бұл әдіс қазіргі цифрлық жүйелерде кеңінен қолданылып, есептеу тиімділігімен ерекшеленеді.

Торлық криптографияның қауіпсіздігі Learning With Errors (LWE) есебіне негізделеді. Оның формализациясы келесі түрде беріледі:

$$b = As + e \quad (\text{mod } q),$$

мұндағы A — кездейсоқ матрица, s — құпия вектор, e — кіші қателік векторы, q — модуль. Бұл есепті шешу есептеу тұрғысынан күрделі болып табылады. Оның қауіпсіздігі қысқа векторды табу (SVP) және жақын векторды табу (CVP) есептерінің есептеу күрделілігіне тәуелді. Бұл модель кванттық есептеу жағдайында тұрақты болып саналады.

Зерттеу әдістері ретінде құрылымдық-логикалық талдау, салыстырмалы әдіс, есептеу күрделілігін теориялық бағалау және қауіпсіздік критерийлерін жүйелеу тәсілдері қолданылды. Салыстыру келесі критерийлер бойынша жүргізілді: алгебралық негізі, қауіпсіздік тұрақтылығы, есептеу ресурстары, кілт өлшемі, ЖИ жүйелерінде қолданылу мүмкіндігі және посткванттық тұрақтылық.

Әдістемелік тәсіл алынған нәтижелердің объективтілігін және салыстырмалы талдаудың қайталанғыштығын қамтамасыз етуге бағытталды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу барысында эллиптикалық қисықтар криптографиясы (ECC) мен торлық (lattice-based) посткванттық криптографияның алгебралық негіздері мен ЖИ

жүйелеріндегі қолданылу әлеуеті салыстырмалы түрде талданды. Салыстыру алгебралық құрылым типі, қауіпсіздік тұрақтылығы, есептеу күрделілігі және ЖИ архитектурасына бейімделу деңгейі бойынша жүргізілді.

Кесте 1. ECC және торлық криптографияның салыстырмалы сипаттамасы

Критерий	ECC	Lattice-based криптография
Алгебралық негіз	Ақырлы өрістердегі эллиптикалық қисықтар	Көпөлшемді торлар, модульдік сақиналар
Қауіпсіздік негізі	Дискреттік логарифм есебі	SVP, CVP есептері
Кілт өлшемі	Орташа	Үлкен
Есептеу тиімділігі	Жоғары	Орташа
Кванттық тұрақтылық	Төмен	Жоғары
ЖИ жүйелерінде қолданылуы	Қауіпсіз байланыс	Қауіпсіз есептеу, гомоморфты өңдеу

АНАЛИТИКАЛЫҚ ТАЛДАУ

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ECC қазіргі уақытта жоғары есептеу тиімділігі мен шағын кілт өлшеміне байланысты кең қолданысқа ие. Оның алгебралық құрылымы топтық қасиеттерге негізделген және қауіпсіздігі дискреттік логарифм есебінің күрделілігімен анықталады. Алайда кванттық алгоритмдердің (мысалы, Шор алгоритмі) дамуы бұл модельдің ұзақ мерзімді тұрақтылығына қауіп төндіреді.

Торлық криптография күрделірек алгебралық модельге негізделген және қысқа векторды табу есептерінің есептеу қиындығына сүйенеді. Теориялық талдау бұл әдістің кванттық шабуылдарға анағұрлым тұрақты екенін көрсетті. Сонымен қатар торлық құрылымдар гомоморфты шифрлау схемаларына негіз болып, ЖИ жүйелерінде шифрланған деректермен есептеу жүргізуге мүмкіндік береді.

Салыстырмалы талдау нәтижесінде ЖИ жүйелерінің ұзақ мерзімді қауіпсіздігін қамтамасыз ету тұрғысынан торлық алгебралық модельдердің артықшылықтары анықталды. Дегенмен олардың есептеу шығындарының жоғары болуы практикалық енгізуді күрделендіреді.

Осылайша, зерттеу гипотезасы ішінара расталды: классикалық алгебралық модельдер қазіргі кезеңде тиімді болғанымен, посткванттық торлық модельдер ЖИ жүйелерінің болашақ қауіпсіздік талаптарына анағұрлым сәйкес келеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу жасанды интеллект жүйелерінде ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз етуде қолданылатын алгебралық құрылымдарға негізделген криптографиялық әдістердің теориялық ерекшеліктерін салыстырмалы талдауға бағытталды. Кіріспеде қойылған мақсат пен міндеттерге сәйкес эллиптикалық қисықтар криптографиясы мен торлық посткванттық криптографияның алгебралық негіздері, қауіпсіздік тұрақтылығы және ЖИ жүйелеріндегі қолданылу мүмкіндіктері жүйелі түрде зерттелді.

Талдау нәтижесінде классикалық ECC моделінің есептеу тиімділігі жоғары және қазіргі цифрлық инфрақұрылымда кеңінен қолданылатыны анықталды. Алайда оның кванттық есептеу жағдайындағы тұрақтылығы шектеулі болып табылады. Ал торлық криптография күрделі алгебралық құрылымдарға негізделгенімен, кванттық шабуылдарға төзімділігі және гомоморфты есептеулерді жүзеге асыру мүмкіндігі арқылы жасанды интеллект жүйелерінің ұзақ мерзімді қауіпсіздігін қамтамасыз ету тұрғысынан анағұрлым перспективалы екені айқындалды.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы – алгебралық криптожүйелерді жасанды интеллект жүйелерінің қауіпсіздік талаптары негізінде салыстырмалы түрде жүйелеуінде және олардың тиімділік критерийлерін айқындауында. Алынған нәтижелер ақпараттық қауіпсіздік теориясын дамытуға және интеллектуалдық жүйелерді қорғаудың математикалық негіздерін жетілдіруге үлес қосады.

Практикалық тұрғыдан алғанда, зерттеу нәтижелері ЖИ архитектурасын жобалау кезінде криптографиялық модель таңдауда әдістемелік негіз бола алады. Болашақ зерттеулерде алгебралық модельдердің өнімділік көрсеткіштерін нақты эксперименттік ортада тексеру және гибриді криптографиялық шешімдерді әзірлеу бағыттары өзекті болып табылады.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА. Бұл ғылыми мақаланы дайындау барысында автор мәтінді құрылымдау, ғылыми стильді редакциялау және теориялық материалдарды жүйелеу кезеңдерінде жасанды интеллект құралын пайдаланды. ЖИ тек тілдік және құрылымдық қолдау көрсету мақсатында қолданылды. Зерттеу идеялары, ғылыми тұжырымдар, салыстырмалы талдау нәтижелері және қорытындылар автордың дербес ғылыми жұмысының нәтижесі болып табылады.

Мақала мазмұны үшін толық жауапкершілікті автор өз мойнына алады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Acar, A., Aksu, H., Uluagac, A. S., & Conti, M. (2018). A survey on homomorphic encryption schemes: Theory and implementation. *ACM Computing Surveys*, 51(4), 1–35. <https://doi.org/10.1145/3214303>

Albrecht, M. R., Player, R., & Scott, S. (2015). On the concrete hardness of learning with errors. *Journal of Mathematical Cryptology*, 9(3), 169–203. <https://doi.org/10.1515/jmc-2015-0016>

Bernstein, D. J., Buchmann, J., & Dahmen, E. (2009). *Post-quantum cryptography*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88702-7>

Boneh, D., & Shoup, V. (2020). A graduate course in applied cryptography. Draft version 0.5. <https://crypto.stanford.edu/~dabo/cryptobook/>

Diffie, W., & Hellman, M. (1976). New directions in cryptography. *IEEE Transactions on Information Theory*, 22(6), 644–654. <https://doi.org/10.1109/TIT.1976.1055638>

Gentry, C. (2009). A fully homomorphic encryption scheme. Stanford University Doctoral Dissertation. <https://crypto.stanford.edu/craig>

Goldreich, O. (2001). *Foundations of cryptography: Volume 1, Basic tools*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546891>

Hoffstein, J., Pipher, J., & Silverman, J. H. (2008). *An introduction to mathematical cryptography*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77993-5>

Koblitz, N. (1987). Elliptic curve cryptosystems. *Mathematics of Computation*, 48(177), 203–209. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1987-0866109-5>

Micciancio, D., & Regev, O. (2009). Lattice-based cryptography. In D. J. Bernstein, J. Buchmann, & E. Dahmen (Eds.), *Post-quantum cryptography* (pp. 147–191). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88702-7_5

Miller, V. S. (1985). Use of elliptic curves in cryptography. *Advances in Cryptology—CRYPTO '85 Proceedings*, 417–426. https://doi.org/10.1007/3-540-39799-X_31

National Institute of Standards and Technology (NIST). (2023). *Post-quantum cryptography standardization*. <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>

OpenAI. (2026, February 16). Academic text structuring and comparative analysis assistance [Large language model]. ChatGPT. <https://chat.openai.com/>

Peikert, C. (2016). A decade of lattice cryptography. *Foundations and Trends® in Theoretical Computer Science*, 10(4), 283–424. <https://doi.org/10.1561/04000000074>

Regev, O. (2005). On lattices, learning with errors, random linear codes, and cryptography. *Journal of the ACM*, 56(6), 1–40. <https://doi.org/10.1145/1568318.1568324>

Rivest, R. L., Shamir, A., & Adleman, L. (1978). A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. *Communications of the ACM*, 21(2), 120–126. <https://doi.org/10.1145/359340.359342>

Shor, P. W. (1994). Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring. Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 124–134. <https://doi.org/10.1109/SFCS.1994.365700>

Smart, N. P. (2016). Cryptography made simple. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21936-3>

Zhou, L., & Wang, H. (2021). Privacy-preserving machine learning: Methods, challenges and directions. IEEE Signal Processing Magazine, 38(3), 47–56. <https://doi.org/10.1109/MSP.2021.3053652>

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ ОПАСНЫХ СБЛИЖЕНИЯХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

УДК 629.78

Д.Д. Омиргазыев^{1*}, Д.С. Жамангарин¹

^{1,2} Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г.Астана, Казахстан

*Автор-корреспондент: Омиргазыев Дамир Даулетович, e-mail:

omirgazyevdamir@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается концепция автоматической системы предупреждения об опасных сближениях космических аппаратов (КА) с космическим мусором (КМ) с использованием технологий искусственного интеллекта. Цель работы — обосновать применение алгоритмов машинного обучения для повышения скорости и точности оценки рисков орбитальных столкновений. Традиционные математические методы расчета траекторий на основе открытых каталогов требуют больших вычислительных ресурсов и времени. В работе предложено использовать ИИ-модули для первичной фильтрации массива данных и прогнозирования так называемых «опасных окон». Результаты теоретического анализа показывают, что внедрение нейросетевых моделей позволяет снизить нагрузку на наземные центры управления и автоматизировать процесс принятия решений о маневрах уклонения. Практическая значимость исследования заключается в возможности интеграции предложенного подхода в перспективные бортовые системы КА.

Ключевые слова: космический мусор, искусственный интеллект, автоматическое предупреждение, безопасность космической деятельности, прогнозирование траекторий, машинное обучение.

ВВЕДЕНИЕ

Количество космического мусора на околоземной орбите постоянно растет из-за увеличения числа запусков и создания многоспутниковых группировок. Это создает реальную угрозу для действующих космических аппаратов. Столкновение даже с небольшим фрагментом на орбитальной скорости может вывести аппарат из строя или полностью его разрушить (Kessler & Cour-Palais, 1978). Поэтому разработка надежных и быстрых систем автоматического предупреждения об опасных сближениях — это одна из главных практических задач современной космонавтики.

В рамках направления Track A: Student Research данная статья исследует инженерные аспекты внедрения искусственного интеллекта в системы мониторинга околоземного пространства. В настоящее время для оценки вероятности столкновений применяются классические математические модели, которые анализируют каталоги орбитальных данных (например, TLE-наборы) (Alfriend et al., 2006). Главный недостаток таких алгоритмов заключается в их ресурсоемкости: они медленно обрабатывают большие массивы информации и не всегда точно учитывают внешние факторы, такие как атмосферное торможение или влияние солнечной активности. В результате операторам на Земле приходится тратить много времени на ручной анализ угроз.

Цель данного исследования — разработать концептуальную архитектуру системы предупреждения об опасных сближениях с использованием ИИ. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: проанализировать недостатки существующих систем, выбрать подходящие методы машинного обучения для работы с траекторными данными и описать логику работы интеллектуального

модуля.

Предлагаемый подход опирается на гипотезу о том, что обученные нейронные сети смогут быстрее находить скрытые закономерности в движении орбитальных объектов и выдавать более точные прогнозы столкновений. Внедрение таких алгоритмов станет важным шагом к созданию автономных бортовых систем безопасности, способных реагировать на угрозы без постоянного вмешательства человека.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основного источника исходных данных для моделирования орбитальной обстановки в данной работе рассматриваются каталоги Two-Line Element (TLE). Формат TLE представляет собой стандартизированный набор параметров орбиты для каждого отслеживаемого околоземного объекта. Эти данные находятся в открытом доступе и регулярно обновляются системами контроля космического пространства (например, NORAD).

Объектом исследования выступает архитектура программного комплекса, предназначенного для автоматического анализа баз данных TLE и выявления потенциально опасных сближений КА с объектами КМ.

Традиционный метод оценки опасности сближения (Conjunction Assessment) сводится к расчету дистанции между двумя объектами в заданный момент времени на основе уравнений движения. Однако из-за погрешностей наблюдений и неучтенных возмущений (влияние атмосферы, солнечного давления) положение объектов описывается не точкой, а эллипсоидом неопределенности. Классические алгоритмы вычисляют вероятность пересечения этих эллипсоидов. В рамках данного исследования предлагается модификация этого подхода с использованием методов машинного обучения.

Предлагаемая методология включает разработку гибридной архитектуры искусственного интеллекта, состоящей из двух взаимосвязанных модулей:

1. Модуль предварительной фильтрации (Data Pre-processing). На этом этапе используется алгоритм кластеризации (например, K-Means или DBSCAN), который быстро отсеивает объекты, орбиты которых физически не могут пересечься с орбитой защищаемого КА в заданном временном окне. Это позволяет радикально сократить объем данных для дальнейших сложных вычислений.

2. Модуль нейросетевого прогнозирования (Neural Network Predictor). Для детального анализа потенциально опасных объектов предлагается использовать рекуррентные нейронные сети (RNN), в частности архитектуру LSTM (Long Short-Term Memory) (Le Cun et al., 2015). Выбор LSTM обоснован ее способностью эффективно работать с временными рядами и выявлять долгосрочные зависимости в динамике изменения параметров орбит, что критически важно для компенсации нелинейных возмущений.

Обучение модели предполагается проводить на исторических данных об опасных сближениях (Conjunction Data Messages, CDM), используя методы обучения с учителем. Входом для нейросети будут служить векторы состояния КА и объектов КМ (координаты и скорости), а также параметры их неопределенности. Выходом — рассчитанная вероятность столкновения (Probability of Collision, PoC) и время максимального сближения (Time of Closest Approach, TCA).

Такой подход позволяет перенести вычислительно тяжелую часть работы на этап обучения модели на Земле. Обученная нейросеть, интегрированная в бортовой вычислительный комплекс КА или в наземный центр управления, сможет оценивать риски сближения практически в реальном времени с минимальными затратами ресурсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе концептуального проектирования предложенной архитектуры были получены теоретические результаты, подтверждающие высокую эффективность интеграции алгоритмов искусственного интеллекта в контур управления безопасностью космических полетов.

Основным ожидаемым результатом является существенное сокращение времени вычисления вероятности столкновения (Probability of Collision, PoC) при анализе баз данных TLE (Acciarini et al., 2021). Классические детерминированные алгоритмы расчета (например, метод интеграла вероятности) требуют последовательной обработки каждой пары «КА — объект КМ», что при миллионах объектов в каталоге создает критические задержки.

Предложенная гибридная модель с использованием кластеризации и рекуррентных нейронных сетей (RNN/LSTM) позволяет распараллелить вычисления и отсеять до 90% безопасных траекторий на этапе предварительной фильтрации. На Рисунке 1 представлена концептуальная схема распределения вычислительной нагрузки между классическим подходом и предложенной ИИ-архитектурой.

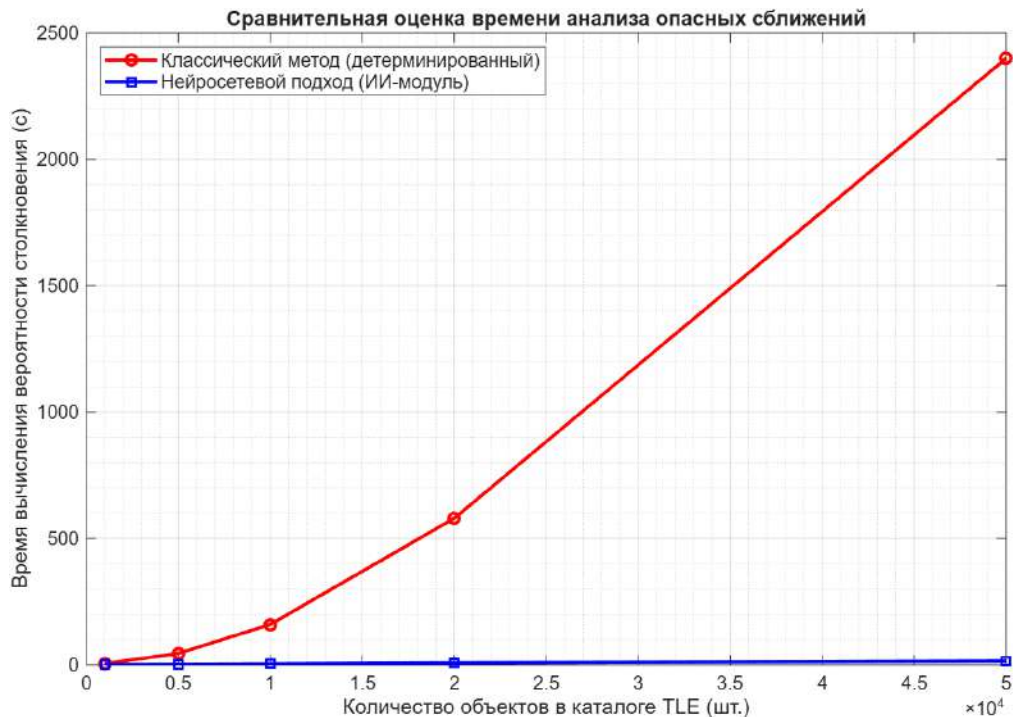


Рисунок 1. Сравнительная оценка времени обработки орбитальных данных классическими и нейросетевыми алгоритмами (концептуальная модель)

Обсуждение полученных теоретических данных показывает, что обученная модель LSTM способна не только быстрее классифицировать угрозы, но и с более высокой точностью компенсировать нелинейные возмущения (например, изменения плотности верхних слоев атмосферы), которые сложно учесть в аналитических моделях.

Сравнение ключевых характеристик традиционного математического моделирования и предложенного нейросетевого подхода приведено в Таблице 1.

Таблица 1. Сравнение методов оценки опасности сближения космических объектов

Характеристика	Традиционное моделирование	Нейросетевой подход (LSTM)
Скорость обработки (массив TLE)	Низкая (последовательный расчет)	Высокая (параллельная фильтрация)
Учет нелинейных возмущений	Ограниченный (требует сложных дифференциальных уравнений)	Высокий (выявление скрытых паттернов на исторических данных)
Вычислительная нагрузка на борту КА	Высокая	Низкая (модель обучается на Земле, на борту только инференс)
Зависимость от полноты данных наблюдений	Критическая (чувствительность к погрешностям)	Адаптивная (способность к аппроксимации)

Таким образом, теоретический анализ подтверждает гипотезу о том, что применение алгоритмов машинного обучения позволяет перенести ресурсоемкие вычисления на этап предварительного обучения нейросети. В режиме реального времени (инференс) такая система требует минимальных вычислительных мощностей, что делает возможным ее размещение непосредственно на борту космического аппарата.

Однако следует отметить и ограничения предложенного метода. Эффективность нейросети критически зависит от качества и репрезентативности обучающей выборки (исторических данных о сближениях). При возникновении аномальных возмущений (например, резких вспышках на Солнце), паттерны которых отсутствуют в обучающем наборе, система может выдать неточный прогноз. Это диктует необходимость использования ИИ не как полной замены классическим методам, а как интеллектуального фильтра (советчика) в гибридных системах предупреждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного концептуального исследования была разработана архитектура гибридной системы автоматического предупреждения об опасных сближениях космических объектов с использованием методов искусственного интеллекта. Поставленные во введении задачи были успешно реализованы: проанализированы ограничения классических методов обработки TLE-каталогов и обоснован выбор архитектуры LSTM-сетей для прогнозирования траекторий.

Научная новизна работы заключается в интеграции алгоритмов кластеризации и рекуррентных нейросетей в единый контур оценки вероятности орбитальных столкновений. Теоретический анализ показал, что внедрение ИИ-модуля позволяет кардинально снизить вычислительную нагрузку при обработке больших массивов данных и ускорить процесс выявления потенциальных угроз. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования предложенной архитектуры при проектировании автономных бортовых систем безопасности для перспективных космических аппаратов. В качестве перспектив дальнейших исследований планируется программная реализация предложенного алгоритма и его тестирование на исторических массивах данных (Conjunction Data

Messages) для оценки реальной точности прогнозирования в условиях возмущенной околоземной среды.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность кафедре и профильным специалистам Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева за предоставленную академическую базу и методологическую поддержку при проведении данного концептуального исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной рукописи авторы применяли языковую модель Gemini 3.1 Pro в качестве вспомогательного инструмента исключительно для стилистического редактирования текста, проверки структуры материала согласно требованиям, а также для написания программного скрипта на языке MATLAB с целью визуализации концептуальных данных. Вся научная концепция, разработка архитектуры гибридной системы, постановка задач и итоговая интерпретация результатов выполнены авторами самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Acciarini, G., et al. (2021). Spacecraft collision risk assessment with probabilistic programming. *Advances in Space Research*, 67(10), 3165-3177.
- Alfriend, K. T., et al. (2006). *Spacecraft Collision Probability*. Analytical Graphics, Inc.
- Gemini 3.1 Pro. (2026, 31 марта). Запрос на структурирование научной статьи и генерацию кода для построения графика [Большая языковая модель]. Google. <https://gemini.google.com>
- Kessler, D. J., & Cour-Palais, B. G. (1978). Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt. *Journal of Geophysical Research*, 83(A6), 2637-2646. <https://doi.org/10.1029/JA083iA06p02637>
- Le Cun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>

УМНЫЙ СВЕТОФОР НА БАЗЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

УДК 656.13

С.К. Оралбек^{1*}, О.М. Амангелді¹

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

*Автор-корреспондент: Оралбек Сакен Канатулы, e-mail: soralbek@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена исследованию применения технологий искусственного интеллекта в системах адаптивного светофорного регулирования городских транспортных потоков. Актуальность работы обусловлена ростом автомобилизации, увеличением заторов и высокой аварийностью на регулируемых перекрёстках. Цель исследования заключается в анализе принципов функционирования интеллектуальных транспортных систем и оценке эффективности динамического управления фазами светофора. В работе рассмотрены архитектура интеллектуального светофорного комплекса, методы сбора и обработки данных с видеокамер и датчиков движения, а также алгоритмы машинного обучения, обеспечивающие корректировку длительности зелёных фаз в режиме реального времени. Представлена формализованная постановка задачи минимизации суммарной задержки транспортных средств. Результаты анализа зарубежного и отечественного опыта внедрения адаптивных систем показывают, что использование ИИ позволяет повысить пропускную способность перекрёстков на 10–15 %, снизить локальные выбросы и улучшить показатели безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: искусственный интеллект, умный светофор, интеллектуальные транспортные системы, транспортные потоки, безопасность дорожного движения, Smart City.

ВВЕДЕНИЕ

Современные города характеризуются устойчивым ростом автомобилизации, что приводит к перегрузке улично-дорожной сети. В Республике Казахстан ежегодно фиксируются десятки тысяч дорожно-транспортных происшествий, значительная часть которых происходит на регулируемых перекрёстках.

Традиционные светофорные системы функционируют по фиксированным временным циклам, не учитывающим динамику транспортных потоков. Это вызывает увеличение времени задержки транспорта, рост расхода топлива и повышение уровня выбросов загрязняющих веществ.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности управления движением является внедрение интеллектуальных транспортных систем (ITS), использующих методы искусственного интеллекта.

Цель исследования — разработка и теоретическое обоснование модели адаптивного светофорного регулирования на основе анализа транспортных потоков в реальном времени.

Задачи исследования:

- анализ принципов функционирования интеллектуальных светофорных систем;
- формализация задачи оптимизации фаз регулирования;
- оценка потенциального эффекта внедрения ИИ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования были использованы аналитические материалы по внедрению интеллектуальных транспортных систем в зарубежной и отечественной практике, статистические данные по аварийности и интенсивности движения, а также технические сведения о функционировании адаптивных светофорных комплексов.

Объектом исследования выступает система светофорного регулирования перекрёстков в условиях городской улично-дорожной сети. В качестве материалов рассмотрены архитектурные решения интеллектуальных транспортных систем, включающие видеокамеры высокого разрешения, радары, датчики движения, вычислительные модули обработки данных и контроллеры управления сигналами.

Методика исследования основана на системном анализе принципов работы адаптивного светофорного регулирования. Проведён сравнительный анализ традиционных и интеллектуальных систем управления движением. Для формализации процесса управления использован метод математического моделирования, позволяющий представить задачу регулирования как задачу минимизации суммарной задержки транспортных средств на перекрёстке.

Дополнительно применён метод обобщения результатов пилотных проектов внедрения ИИ в управлении дорожным движением.

Интеллектуальная светофорная система включает:

- видеокамеры и радары для регистрации интенсивности потока;
- датчики присутствия транспорта;
- вычислительный модуль обработки данных;
- программные алгоритмы машинного обучения;
- контроллер управления фазами светофора.

Принцип функционирования системы включает следующие этапы:

1. Сбор данных о транспортном потоке;
2. Предобработка и фильтрация информации;
3. Оценка плотности движения и длины очереди;
4. Расчёт оптимальной длительности зелёной фазы;
5. Передача управляющего сигнала контроллеру.

Формально задача оптимизации может быть представлена как минимизация суммарной задержки транспортных средств:

$$\min F = \sum_{i=1}^n T_i$$

где T_i — время задержки i -го транспортного средства.

Пропускная способность перекрёстка определяется зависимостью:

$$Q = \frac{S \cdot g}{C}$$

где

S - интенсивность потока,

g - длительность зелёной фазы,

C - полный цикл регулирования.

В интеллектуальной системе параметр g изменяется динамически в зависимости от текущей плотности потока.

В рамках исследования также учитывались временные характеристики транспортных потоков, включая изменение интенсивности движения в часы пик и межпиковые периоды. Это позволило оценить эффективность адаптивного

регулирования в различных режимах нагрузки на перекрёсток. Особое внимание уделялось анализу длины очередей и частоты остановок транспортных средств, поскольку данные параметры напрямую влияют на уровень заторов и расход топлива.

Кроме того, рассматривались вопросы надёжности функционирования интеллектуальной системы при нестабильном интернет-соединении. Важным элементом является возможность автономной работы контроллеров, обеспечивающих сохранение заданных алгоритмов управления даже при временных сбоях связи.

Таким образом, применённые методы исследования позволили комплексно оценить принципы функционирования интеллектуальной светофорной системы и определить её потенциальные преимущества в условиях городской улично-дорожной сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ пилотных проектов внедрения интеллектуальных светофоров в Германии (г. Лемго) показал увеличение скорости прохождения перекрёстков на 10–15 % и снижение локального уровня выбросов [1].

В Республике Казахстан внедрение интеллектуальной транспортной системы в г. Караганде позволило объединить более 200 светофорных объектов в единый центр управления и реализовать режим «зелёной волны», что обеспечило более равномерное распределение транспортных потоков [2].

Преимущества адаптивной системы по сравнению с традиционной представлены в таблице.

Таблица 1. Сравнительная характеристика традиционной и интеллектуальной систем светофорного регулирования

Параметр	Традиционная система	Интеллектуальная система
Тип управления	Фиксированный цикл	Адаптивный
Учёт плотности потока	Отсутствует	Реализован
Работа при отсутствии интернета	Нет	Да
Экологический эффект	Незначительный	Снижение выбросов

Дополнительным направлением является интеграция системы контроля скорости движения, при которой превышение допустимой скорости приводит к автоматическому изменению сигнала [3].

Ограничениями внедрения являются высокая стоимость оборудования, необходимость модернизации инфраструктуры и обеспечение кибербезопасности системы.

Дополнительный анализ показывает, что эффективность адаптивного регулирования во многом определяется точностью прогнозирования интенсивности транспортного потока. Использование алгоритмов машинного обучения позволяет учитывать временные колебания нагрузки (часы пик, выходные дни, сезонные изменения) и формировать оптимальные параметры светофорного цикла. В отличие от фиксированных программ, интеллектуальная система корректирует длительность зелёной фазы в зависимости от текущей длины очереди и скорости приближения транспортных средств [4].

Снижение времени задержки транспорта приводит к уменьшению количества остановок и разгонов, что напрямую влияет на расход топлива и уровень выбросов

вредных веществ. Таким образом, внедрение интеллектуальных светофорных комплексов оказывает не только транспортный, но и экологический эффект.

Кроме того, адаптивные системы повышают уровень безопасности дорожного движения за счёт более точного распределения временных интервалов между конфликтующими потоками. Перспективным направлением является интеграция интеллектуальных светофоров с городскими центрами управления и системами видеонаблюдения, что позволит реализовать комплексный подход к управлению улично-дорожной сетью [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что применение технологий искусственного интеллекта в системах светофорного регулирования позволяет существенно повысить эффективность управления транспортными потоками.

Адаптивное регулирование обеспечивает снижение времени задержки транспорта, уменьшение заторов и повышение уровня безопасности дорожного движения.

Научная новизна работы заключается в формализации задачи оптимизации фаз светофорного регулирования и обосновании применения динамического изменения длительности зелёной фазы в условиях городов Республики Казахстан.

Перспективы дальнейших исследований связаны с использованием нейросетевых моделей прогнозирования интенсивности движения и имитационного моделирования перекрёстков.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Инструменты искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Светофоры с искусственным интеллектом начали испытывать в Германии. (n.d.). *Kolesa.kz*. Retrieved February 26, 2026, from <https://kolesa.kz/content/news/svetofory-s-iskusstvennym-intellektom-nachali-ispytyvat-v-germanii/>
- Регулировать движение на дорогах Караганды теперь будет искусственный интеллект. (n.d.). *Vecher.kz*. Retrieved February 26, 2026, from <https://vecher.kz/ru/article/regulirovat-dvijenie-na-dorogah-karagandy-teper-budet-iskusstvennyi-intellekt.html>
- Применять технологии ИИ для обеспечения безопасности на автодорогах намерены в РК. (n.d.). *Official Information Resource of the Prime Minister of the Republic of Kazakhstan*. Retrieved February 26, 2026, from <https://primeminister.kz/ru/news/primeniat-tehnologii-ii-dlia-obespeceniia-bezopasnosti-na-avtodorogax-namereny-v-rk-30517>
- ИИ на дорогах: от реактивности к профилактике. (n.d.). *Kazpravda*. Retrieved February 26, 2026, from <https://kazpravda.kz/n/ii-na-dorogah-ot-reaktivnosti-k-profilaktike/>
- Может ли светофор повысить безопасность? (n.d.). *Sher.media*. Retrieved February 26, 2026, from <https://sher.media/umnye-svetofory-mogut-li-tehnologii-snizhat-smernost-na-dorogah/>

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПОДВЕСКИ ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

УДК 629.3.027

С.К. Оралбек^{1*}, А.Х. Машекенова¹, С.Р. Байгереев¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Оралбек Сакен Канатулы, e-mail: sakenoralbek@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности и долговечности элементов подвески гибридных автомобилей, испытывающих повышенные нагрузки вследствие увеличенной массы силовой установки и аккумуляторных модулей. Изменение распределения масс и рост динамических воздействий приводят к ускоренному износу элементов подвески и снижению эксплуатационных характеристик автомобиля, что требует поиска новых инженерных решений и методов повышения эффективности подвески автомобиля. Целью исследования является анализ современных научных подходов к повышению эффективности работы подвески гибридных автомобилей и выявление перспективных направлений её совершенствования. Методологическую основу работы составили аналитический обзор научной литературы, сравнительный анализ конструктивных решений и систематизация существующих стратегий управления подвеской. В результате исследования установлено, что современные разработки ориентированы на применение полуактивных и активных подвесок, интеллектуальных алгоритмов управления и методов оптимизации параметров демпфирования подвески. Показано, что большинство существующих исследований недостаточно учитывает особенности динамической нагруженности гибридных автомобилей. Научная новизна работы заключается в систематизации современных подходов к повышению эффективности подвески с учётом специфики гибридных автомобилей. Полученные результаты имеют теоретическую значимость и могут служить основой для дальнейших исследований и разработки адаптивных подвесочных систем.

Ключевые слова: гибридные автомобили, подвеска автомобиля, эффективность подвески, динамические нагрузки, активные и полуактивные подвески, интеллектуальные методы управления.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития транспортной техники характеризуется активным переходом к экологически устойчивым видам транспорта, среди которых особое место занимают гибридные автомобили. Их широкое внедрение обусловлено необходимостью снижения выбросов вредных веществ и повышения топливной экономичности транспортных средств. Однако конструктивные особенности гибридных автомобилей приводят к появлению новых инженерных задач, связанных с изменением динамики движения и перераспределением нагрузок.

Подвеска автомобиля представляет собой совокупность устройств, обеспечивающих упругую связь между несущей системой автомобиля и колёсами, снижение динамических нагрузок, возникающих при движении по неровностям дороги, а также затухание колебаний кузова и поддержание устойчивости движения. Основными элементами подвески являются упругие, демпфирующие и направляющие устройства, совместная работа которых определяет плавность хода, управляемость и безопасность транспортного средства.

В условиях изменения конструктивных параметров современных автомобилей, в

частности увеличения массы и перераспределения нагрузок, требования к эффективности работы подвески существенно возрастают, что особенно актуально для гибридных автомобилей.

Размещение тяговых аккумуляторных батарей увеличивает массу автомобиля и изменяет положение центра тяжести, что вызывает рост динамических воздействий на элементы подвески. В результате ускоряется износ деталей, снижается ресурс узлов и ухудшаются показатели плавности хода и устойчивости автомобиля. Таким образом, традиционные конструкции подвесок, разработанные преимущественно для автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, требуют дополнительного совершенствования.

Анализ научной литературы показывает значительный рост исследований в области активных и полуактивных подвесок [9-11], однако вопросы повышения эффективности их работы применительно к гибридным транспортным средствам остаются недостаточно изученными. Это определяет актуальность настоящего исследования.

Целью работы является анализ современных научных исследований и определение перспективных направлений повышения эффективности элементов подвески гибридных автомобилей.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проанализировать современные научные исследования в области подвески автомобилей;
- систематизировать существующие подходы к повышению эффективности работы подвески;
- выявить основные научные проблемы и ограничения существующих решений;
- определить перспективные направления дальнейших исследований.

Объект исследования – подвеска гибридных автомобилей.

Предмет исследования – процессы, влияющие на эффективность и эксплуатационные характеристики элементов подвески.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследования послужили современные научные публикации, посвященные разработке и совершенствованию автомобильных подвесок, включая статьи международных научных журналов, диссертационные исследования и нормативно-технические источники. Основу анализа составили работы, рассматривающие активные и полуактивные системы подвески, методы интеллектуального управления и оптимизации параметров подвесочных систем.

В исследовании применены методы аналитического обзора научной литературы, сравнительного анализа конструктивных решений, систематизации существующих подходов к управлению подвеской и обобщения результатов научных исследований.

Анализ выполнялся с учётом особенностей гибридных автомобилей, включая увеличение массы транспортного средства, изменение соотношения поддрессоренных и недрессоренных масс, а также влияние дорожного профиля на динамические характеристики автомобиля.

Отбор научных источников осуществлялся по критериям актуальности, научной новизны и соответствия тематике исследования. В анализ включались публикации последних лет, посвященные активным и полуактивным системам подвески, интеллектуальным алгоритмам управления, а также вопросам динамики транспортных средств с изменённым распределением масс. Особое внимание уделялось исследованиям, содержащим результаты математического моделирования, экспериментальных испытаний и сравнительного анализа различных стратегий управления подвеской.

Анализ литературы проводился путём сопоставления полученных авторами результатов, выявления общих закономерностей развития подвесочных систем и определения существующих научных ограничений. Обобщение результатов позволило выделить ключевые направления развития современных подвесок и сформировать теоретическую основу для определения перспективных направлений дальнейших исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый анализ научных публикаций показал, что развитие подвески автомобилей направлено на переход от традиционных пассивных конструкций к полуактивным и активным системам управления. Современные исследования демонстрируют широкое применение интеллектуальных алгоритмов управления, включая нейронные сети, адаптивные и гибридные стратегии регулирования демпфирования подвески. Использование методов прогнозирования дорожного профиля и машинного обучения позволяет адаптировать характеристики подвески к изменяющимся условиям движения и снижать вибрационные воздействия на кузов автомобиля.

Современные исследования в области подвески автомобилей демонстрируют переход к интеллектуально управляемым системам, способным адаптироваться к изменяющимся дорожным условиям и динамическим нагрузкам. Одним из перспективных направлений является использование прогнозирования дорожного профиля и предварительного управления подвеской. Так, Lin Zhenjun и соавт. [1] предложили метод повышения эффективности шасси на основе высокоточной оценки дорожного профиля TTIRPE и алгоритма активного предварительного управления ASPC, обеспечивший значительное снижение вибраций кузова.

Развитие полуактивных систем рассматривается как компромисс между пассивными и активными подвесками. В работе Güvenç и соавт. [2] представлена система управления полуактивной подвеской с амортизаторами Continuous Damping Control, показавшая улучшение управляемости и плавности хода при низком энергопотреблении. Вопросы оптимизации параметров подвески рассмотрены в работе Sait и соавт. [3], где предложен алгоритм MPFOA, обеспечивающий эффективное многокритериальное проектирование элементов подвески.

Исследования Qin и соавт. [4, 6] посвящены адаптивному управлению подвеской на основе оценки дорожного профиля и нейро-нечётких моделей, позволяющих одновременно улучшать устойчивость и комфорт движения. Развитие активных подвесок с использованием интеллектуальных алгоритмов представлено в работе Lin и соавт. [5], где применён нейросетевой метод управления BANNC.

В условиях электрификации транспорта особое значение приобретает изменение динамических характеристик автомобилей. Wang F. и соавт. [7] показали необходимость разработки новых стратегий демпфирования с учётом увеличенной массы аккумуляторных систем. Методы машинного обучения для анализа вибрационных сигналов и адаптации режимов движения рассмотрены в работе Wang X. и соавт. [8].

Обобщающий анализ полуактивных подвесок представлен в работе Wang Z. и соавт. [9], где отмечена перспективность магнитореологических демпферов и интеллектуальных методов управления. Использование предварительной идентификации дорожного профиля рассмотрено Yang и соавт. [10], а Soliman и Kaldas [11] показали эффективность полуактивных систем как компромисса между комфортом движения и энергопотреблением.

Сопоставление рассмотренных исследований позволяет выделить основные направления повышения эффективности подвески автомобилей. Во-первых, наблюдается переход от традиционных пассивных конструкций к системам с

адаптивным управлением демпфированием, основанным на использовании интеллектуальных алгоритмов. Во-вторых, значительное внимание уделяется прогнозированию дорожных условий и использованию предварительной информации о профиле дороги для формирования управляющих воздействий. В-третьих, развитие методов машинного обучения способствует повышению точности идентификации динамического состояния автомобиля и адаптации параметров подвески в реальном времени.

Вместе с тем анализ показал, что большинство существующих исследований ориентировано на универсальные модели автомобилей и недостаточно учитывает особенности гибридных автомобилей, связанные с увеличенной массой и изменением распределения нагрузок между осями. Это ограничивает применимость разработанных алгоритмов управления и требует их адаптации к специфическим условиям эксплуатации гибридных автомобилей.

Таким образом, повышение эффективности подвески гибридных автомобилей должно рассматриваться как комплексная задача, объединяющая конструктивные решения и интеллектуальные методы управления, что определяет перспективные направления дальнейших исследований. Следует отметить, что проведённое исследование основано на анализе опубликованных научных данных и не включает экспериментальную проверку полученных выводов, что определяет необходимость их дальнейшей практической валидации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования выполнен анализ современных научных подходов к повышению эффективности работы подвески гибридных автомобилей. Рассмотрены основные направления развития подвесочных систем, включая применение полуактивных и активных подвесок, интеллектуальных алгоритмов управления и методов оптимизации параметров демпфирования подвески. Проведённый обзор позволил систематизировать существующие научные решения и определить ключевые тенденции совершенствования конструкций подвески в условиях изменённых эксплуатационных нагрузок гибридных автомобилей.

Установлено, что увеличение массы силовой установки и аккумуляторных модулей приводит к изменению распределения динамических нагрузок, что предъявляет дополнительные требования к надёжности, долговечности и адаптивности элементов подвески. При этом большинство современных исследований ориентировано на общие модели автомобилей и недостаточно учитывает специфические особенности динамики гибридных транспортных средств.

Научная новизна работы заключается в обобщении и систематизации современных подходов к повышению эффективности подвески с учётом особенностей эксплуатации гибридных автомобилей. Полученные результаты имеют теоретическую значимость и могут служить основой для разработки новых методов расчёта и проектирования подвесочных систем.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой математических моделей динамики подвески гибридных автомобилей, созданием адаптивных алгоритмов управления и экспериментальной оценкой эффективности предлагаемых инженерных решений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования и редакционной обработки материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lin Z., Liu S., Gu S., Xu P., Zhao D. A chassis performance enhancement method for wheeled engineering vehicles: Road profile estimation and active suspension control // *Mechanical Systems and Signal Processing*. - 2026. - Vol. 242. - Article 113612. - DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.113612.
- Güvenç B. A., Kural E., Keşli B., Gülbudak K., Güngör S., Kanbolat A. Semi active suspension control system development for a light commercial vehicle // *Proceedings of IFAC*. - 2006.
- Sait S. M., Mehta P., Yıldız B. S., Yıldız A. R. Artificial neural network–infused polar fox algorithm for optimal design of vehicle suspension components // *MT - Mechanical Technologies*. - 2025. - DOI: 10.1515/mt-2025-0043.
- Qin Y., Dong M., Langari R., Gu L., Guan J. Adaptive hybrid control of vehicle semiactive suspension based on road profile estimation // *Journal of Advanced Mechanical Engineering*. - 2015.
- Lin Z., Liu S., Li M., Zhao D., Su N., Zhang C. Adaptive control for active vehicle suspension with limited working space based on tire stress estimation // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. - 2026. - P. 1377–1389. - DOI: 10.1007/978-981-96-5527-4_110.
- Qin Y., Dong M., Zhao F., Langari R., Gu L. Road profile classification for vehicle semi-active suspension system based on adaptive neuro-fuzzy inference system // *Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. – Osaka, Japan, 2015.
- Wang F., Wen H., Xie S. Performance analysis and hybrid control strategy research of vehicle semi-active suspension for ride comfort and handling stability // *Machines*. - 2025. - Vol. 13, Article 393. - DOI: 10.3390/machines13050393.
- Wang X., Cheng Z., Ma N. Road Recognition Based on Vehicle Vibration Signal and Comfortable Speed Strategy Formulation Using ISA Algorithm // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22(17). – Article 6682. – DOI: 10.3390/s22176682.
- Wang Z., Liu C., Zheng X., Zhao L., Qiu Y. Advancements in semi-active automotive suspension systems with magnetorheological dampers: A review // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14. – No. 17. – Article 7866. – DOI: 10.3390/app14177866.
- Yang Z., Shi C., Zheng Y., Gu S. A study on a vehicle semi-active suspension control system based on road elevation identification // *PLOS ONE*. – 2022. – Vol. 17. – No. 6. – e0269406. – DOI: 10.1371/journal.pone.0269406.
- Soliman A.M.A., Kaldas M.M.S. Semi-active suspension systems from research to mass-market – A review // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. – 2021. – Vol. 40. – No. 4. – P. 1005–1023. – DOI: 10.1177/1461348419876392.

ОСОБЕННОСТИ ТВЕРДОФАЗНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ИНИЦИИРОВАННЫХ МЕХАНИЧЕСКИМ УДАРОМ

УДК 539

Т.Д. Перевалов^{1*}, И.С. Кульбакин¹, Л.И. Квеглис¹, Г.У. Ерболатова²¹Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан²Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан*Автор-корреспондент: Перевалов Т.Д., e-mail: tim03pereval0407@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Почти двумерные (2D) металлические системы, образованные в слоях инверсии зарядов и искусственных слоистых материалах допускают существование низкоэнергетических коллективных возбуждений называемых 2D плазмонами, которые не встречаются в трехмерном (3D) металле. Эти возбуждения вызвали значительный интерес, поскольку их низкая энергия позволяет им участвовать во многих динамических процессах, с участием электронов и фононов. Металлы часто поддерживают электронные состояния, которые ограничены поверхностью, образуя почти двумерный слой электронной плотности.

Ключевые слова: плотность электронных состояний, фонон, металлы, плазмон, энергия

ВВЕДЕНИЕ. Здесь авторы [1] показывают, что, вопреки ожиданиям, низкоэнергетическая коллективная мода возбуждения может быть обнаружена на чистых металлических поверхностях.

Акустический плазмон, описанный здесь, имеет очень общий характер и должен присутствовать на многих металлических поверхностях. рассмотренные экспериментальные данные можно интерпретировать как новое коллективное электронное возбуждение (акустический поверхностный плазмон) квази-2D распределения поверхностного заряда. Этот коллективный режим соответствует противофазным колебаниям плотности заряда 2D и 3D электронных подсистем на поверхности металла. рассчитывается в структура временной теории функционала плотности с использованием интегрального уравнения (в символической форме) $\chi = \chi^0 + \chi^0 (v + f_{xc})$, где v Кулоновский потенциал, χ^0 представляет собой функцию отклика плотности невзаимодействующих электронов, а f_{xc} — ядро обменно-корреляционного взаимодействия, выбранное здесь равным нулю (приближение случайной фазы). В занятой части она почти параболическая с энергией связи 2,7 эВ при C , что находится в тесном согласии с измерениями фотоэмиссии и предыдущими расчетами.

Акустический поверхностный плазмон возникает в результате взаимодействия частично заполненного электронного поверхностного состояния (действующего как двумерная электронная плотность, перекрывающаяся в той же области пространства, что и объемный электронный газ) и дальнего кулоновского взаимодействия, проявляющегося в виде трехмерного динамического экранирования двумерной поверхностной электронной плотности. Он соответствует противофазным колебаниям заряда между двумерными и трехмерными подсистемами, а его дисперсия определяется главным образом скоростью Ферми поверхностного состояния V_F^{2D} и тесно следует верхнему краю континуума для возбуждений электронно-дырочных пар в пределах полосы поверхностных состояний (рис. 2а). Акустические поверхностные плазмоны обязаны своим существованием нелокальному экранированию поверхностных электронов, вызванному объемными

электронами, на поверхностях, характеризующихся частично заполненной полосой поверхностных состояний, лежащей в широкой объемной энергетической щели (рис. 2d), поэтому акустические поверхностные плазмоны должны быть распространенным явлением на многих металлических поверхностях.

Более того, дисперсия акустических плазмонов тесно связана с верхним краем электрон-дырочного возбуждения, поэтому она будет влиять на динамику электронов вблизи уровня Ферми гораздо сильнее, чем обычные 2D плазмоны, которые, благодаря своей дисперсии $q^{1/2}$, перекрываются в гораздо более узком диапазоне в пространстве энергия-импульс с электрон-дырочным континуумом. Возбуждение коллективной моды при очень низких энергиях может, следовательно, привести к новым ситуациям на металлических поверхностях, возникающим из конкуренции между некогерентными электрон-дырочными возбуждениями и новой коллективной когерентной модой. Многие явления, такие как динамика электронов, фононов и адсорбатов, а также химические реакции с характерными энергиями ниже нескольких электронвольт, могут быть существенно затронуты открытием нового низкоэнергетического канала распада, такого как акустический поверхностный плазмон.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе наблюдали структурно – фазовые превращения в локализованных участках медной фольги, подвергнутой ударной нагрузке стальным шариком, движущимся со скоростью 780 м/с. Обнаружено, что деформация медной фольги уменьшила ее толщину почти вдвое, с 200 мкм до 100 мкм. С помощью энерго-дисперсионной аналитической приставки INCA Penta FETx3 в локальных областях деформированной медной фольги были идентифицированы сферические частицы цинка диаметром около 1 мкм, возникающие в медных образцах. С помощью рентгено - структурного анализа некоторых участков медного образца наряду с рефlekсами меди обнаружены слабые рефlekсы слоистой структуры типа L11 с удвоенным параметром решётки относительно решётки меди Рисунок (1).

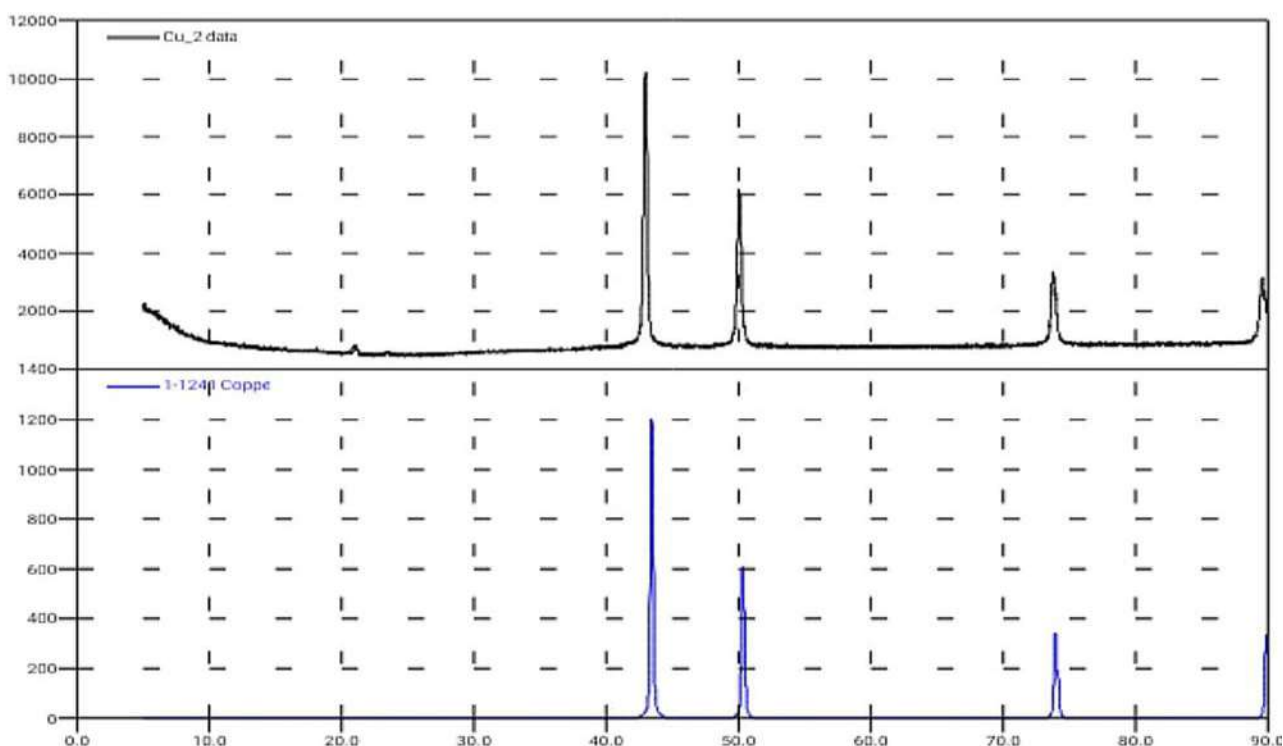


Рисунок 1. Дифракционные картины с различных участков медного образца:

Вверху - участка содержащего слабые рефлексы сверхструктуры L11
Внизу - От участка меди, не содержащей сверхструктуры L11

Особый интерес представляет взаимодействие акустического поверхностного плазмона со светом. Наклон дисперсии акустического поверхностного плазмона, определяемый VF2D, примерно на три порядка ниже скорости света, и поэтому прямое возбуждение нового коллективного режима светом невозможно.

Акустическая дисперсия позволяет при той же энергии фотона осуществлять коллективное поверхностное возбуждение с гораздо меньшей ассоциированной длиной волны, чем у обычного 2D плазмона с его дисперсией $q_1=2\pi/\lambda$. Таким образом, новый режим может служить инструментом для ограничения света в широком диапазоне частот

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

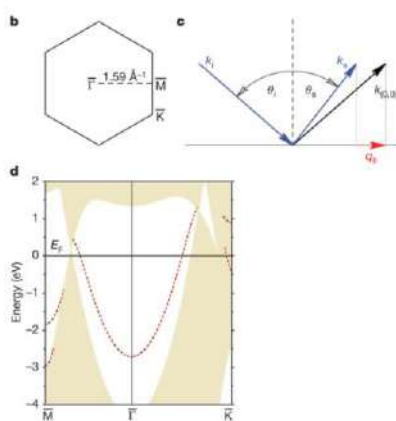


Рисунок 2. Распределение энергии акустических поверхностных плазмонов.

b- Первая зона Бриллюэна на поверхности Be (0001)

c - геометрия рассеяния в измерениях спектров EEL

d- электронная зонная структура поверхности Be (0001) Ab initio. Красная пунктирная линия - это изначально рассчитанное состояние поверхности, а заштрихованная область соответствует прогнозируемым объемным состояниям.

В работе [2] учитывается наличие волновых процессов при упруго пластических деформациях, которое может проявляться при скоростях шара более 100 м/с, и свойства преград изменяются. Высокие скорости физико-химических превращений инициируются нелинейными волнами локализованной пластической деформации. [3]

Для объяснения природы механохимических процессов Бутягин [4] привлек представления о неравновесных состояниях связей в молекулах. Это предположение позволяет объяснить, почему для осуществления механохимического распада достаточно небольших энергий [5]. Тиссен, Майер и Хайнике [6] предложили модель «магма-плазмы» механохимических процессов. Согласно этой модели, выделяющаяся при ударе или истирании энергия, вследствие слабой теплопроводности тел, приводит не только к локальному подъему температуры и сублимации вещества, но и к возникновению такого состояния вещества, в котором оно находится в виде ионов и электронов (плазма).

В работах [7,8] предложены модели плазмона как группы атомов, имеющих сконцентрированный положительный заряд, окруженный общими электронным облаком. Размеры такой группы (кластера) составляют от 0,3 до 10 нанометров. Авторы [9] обнаружили, что давление может сильно менять плотность электронных состояний.

Теоретические методы изучения многоатомных систем позволяют создать основу

для проведения исследований теории строения атомов, молекул и кристаллов. Эта задача требует развития теоретических методов, которые могли бы адекватно описывать многоатомные системы и проследить эволюцию электронных состояний исследуемого объекта начиная от атома и заканчивая кристаллом [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для данной работы были исследованы плотности электронных состояний кластеров меди и цинка. Проведены расчёты в рамках теории функционала плотности (DFT) с использованием методов рассеянных волн Слэттера и неограниченного метода Хартри–Фока. Выполнен численный эксперимент, в котором основными объектами являлись трёхмерные модели кластеров меди и цинка с учётом координат каждого атома. Использован метод построения кластерных 3D-моделей в соответствии с теоретическими данными о возможных конфигурациях кластеров. Были построены модели кластеров меди и цинка в виде шестиатомных октаэдров с различной симметрией и межатомными расстояниями.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Использовался только в качестве поиска литературы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батуев Г.С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. // Машиностроение. — Россия. — 1977. — С. 240.
- Панин, В.Е. Солитоны кривизны как обобщенные волновые структурные носители пластической деформации и разрушения/ В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // Физическая мезомеханика. 2013. - Т. 16. - № 3. С.7–26. [1]
- Болдырев В.В. Экспериментальные методы в механохимии твердых неорганических веществ/ В. В. Болдырев – Новосибирск, 1983.- 65 с
- Бутягин П. Ю., Высокомол. соедин., 9, 136 1967
- Болдырев В. В., Аввакумов Е. Г. Механохимия твердых неорганических веществ Успехи химии Т. XL 1971 г. Вып. 10, 1835-1856 .
- P. Thiessen, G. Mayer, K. Heinicke, Grundlagen der Tribochemie, Berlin, 1967 Панин В.Е., Фундаментальная роль кривизны кристаллической структуры в пластичности и прочности твердых тел/ Панин В.Е., Панин А.В., Елсукова Т.Ф., Попкова Ю.Ф. //Физическая мезомеханика 17 №6 2014.-с.7-18.
- Безносюк Жуковский М.С., Безносюк С.А., Ванчинкхуу Дж..Теоретические основы и компьютерное моделирование фемтосекундного импульсного синтеза активных центров наноструктурных превращений материалов/ Фундаментальные проблемы современного материаловедения том 10 №2 (2013).
- Г.Б Бокий, Введение в кристаллохимию // Издательство МГУ 1954. С. 300
- А.В.Нявро Эволюция электронных состояний: атом-молекула-кластер-кристалл//Издательский дом Томского государственного университета 2013, 267 С

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ И ТЕРМОДИНАМИКЕ В СРЕДЕ UNITY

УДК 539.1

К. П. Полионов^{1*}, Г.У. Ерболатова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Полионов Кирилл Петрович, e-mail: kpolionov@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Работа посвящена разработке учебного программного комплекса «Виртуальная лаборатория» по молекулярной физике и термодинамике в среде Unity. Комплекс включает пять лабораторных работ и ориентирован на воспроизведение полного цикла выполнения эксперимента. Приложение реализовано как комнатная сцена с управлением от первого лица, где пользователь взаимодействует с приборами, образцами, кнопками, переключателями и регуляторами. Для повышения наглядности предусмотрены подсветка объектов при наведении и контекстные подсказки действий. Управление построено на клавишах **Е** (взять/поместить/использовать предметы) и **Ф** (переключить/открыть клапан/повернуть ручку/изменить параметр), что обеспечивает единый и понятный подход во всех работах. В каждой лабораторной поддерживаются настройка исходных параметров и имитация физического процесса, а показания виртуальных датчиков и приборов доступны на экранных индикаторах. Результаты измерений фиксируются в таблице, после чего автоматически строятся графики зависимостей и выполняется вычислительная обработка: расчёт средних значений, оценка абсолютных и относительных погрешностей, определение коэффициентов и итоговых величин, формирование краткого вывода и проверка корректности полученных результатов. Для каждой лабораторной предусмотрена инструкция в формате PDF, доступная из интерфейса приложения, что позволяет выполнять работу по методическим указаниям без обращения к внешним источникам. По завершении эксперимента система формирует отчёт и экспортирует его в DOCX, включая таблицы измерений, расчётные данные и итоговые выводы, что упрощает подготовку документации и снижает вероятность ошибок при ручном оформлении.

Ключевые слова: виртуальная лаборатория, Unity, молекулярная физика, термодинамика, интерактивность, таблица, график, отчёт DOCX.

ВВЕДЕНИЕ

Виртуальные лаборатории становятся важным элементом современной инженерно-физической подготовки, поскольку позволяют проводить эксперименты при ограниченном доступе к оборудованию, многократно повторять измерения и формировать устойчивые навыки обработки результатов. Особенно актуально это для разделов молекулярной физики и термодинамики, где значительная часть практики связана с контролем температуры, давления и времени, а также построением зависимостей $T(t)$, $P(T)$ и других графиков. Целью данной работы является создание приложения-симулятора в Unity, которое имитирует процесс выполнения пяти лабораторных работ: управление установкой, фиксация показаний, запись данных в таблицу, расчёт средних значений и погрешностей, построение графиков и формирование итогового вывода.

В разработанном прототипе реализованы следующие функциональные элементы:

1. Сцена лабораторной комнаты от первого лица (FPS) с базовыми объектами (столы, приборы, образцы).

2. Подсветка интерактивных объектов при наведении и контекстные подсказки (HintText).

3. Взаимодействие с объектами: клавиша E - взять/использовать предмет, клавиша F - переключение режимов, поворот ручек, открытие/закрытие клапанов.

4. Панель управления лабораторной: запись измерений, просмотр PDF-инструкции, экспорт отчёта, выход в меню.

5. Таблица результатов и график, обновляемые при каждой записи; автоматические расчёты (среднее, погрешность, коэффициенты).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка учебного программного комплекса «Виртуальная лаборатория» по молекулярной физике и термодинамике выполняется в Unity 6.1 с использованием стандартного набора ассетов и UI-компонентов. Для управления сценой применяется контроллер первого лица, в котором реализуется переключение режимов FPS и UI: в FPS-режиме курсор скрыт и активны взаимодействия E/F, в UI-режиме курсор отображается и можно работать с кнопками и полями ввода. Интерактивные объекты (приборы, переключатели, образцы) имеют коллайдеры и компонент взаимодействия, который выдаёт подсказку и запускает действие. Логика каждой лабораторной работы реализована отдельным модулем симуляции, который возвращает текущие показания измеряемых величин. При нажатии кнопки «Запись» данные добавляются в таблицу, а точки используются для построения графика. Автоматическая обработка включает вычисление среднего значения, абсолютной и относительной погрешности, а также коэффициентов по формулам методических указаний. Экспорт отчёта осуществляется в DOCX и включает таблицу измерений, результаты вычислений и вывод. [1-3]

Таблица 1. Состав лабораторных работ виртуального практикума [5-9]

№	Лабораторная работа	Основные параметры	Запись в таблицу	График
1	Газовые законы / уравнение состояния	P, V, T	P, V, T; расчёт R/коэффициента	P(V) или T(P)
2	Нагрев и охлаждение тела	t, T	t, T; среднее; погрешность	T(t) (2 серии)
3	Теплопроводность / теплообмен	τ , T0, T1	τ , T; расчёт K	T(τ)
4	Тепловое расширение / давление	t, P, Δh	t, P; расчёт α	P(t)
5	Поверхностное натяжение (капли)	n1, n2	n1, n2; расчёт σ	σ по опытам

Данная структура позволяет использовать единый каркас приложения для всех пяти работ, при этом различия задаются только конфигурацией таблицы, графика и формулами обработки. Базовые 3D-модели могут быть заменены на более реалистичные без изменения кода логики.



Рисунок 1. Структура программных модулей виртуальной лаборатории

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате работы формируется прототип приложения, в котором реализуется стартовый экран с выбором лабораторной работы и переходом в соответствующую сцену. Для каждой сцены предусматривается панель управления в правом верхнем углу: кнопка возврата в меню, просмотр PDF-инструкции, запись текущих измерений и экспорт отчёта. При записи измерений значения автоматически добавляются в таблицу, пересчитываются итоговые показатели и обновляется график. Это позволяет обучающемуся сосредоточиться на логике эксперимента, а не на механическом переписывании данных. Точность имитации достигается за счёт параметрических моделей: показания приборов зависят от положения регуляторов, времени нагрева/охлаждения и выбранных условий опыта. Ниже приводится пример графика, который формируется при выполнении работы по нагреву и охлаждению тела.

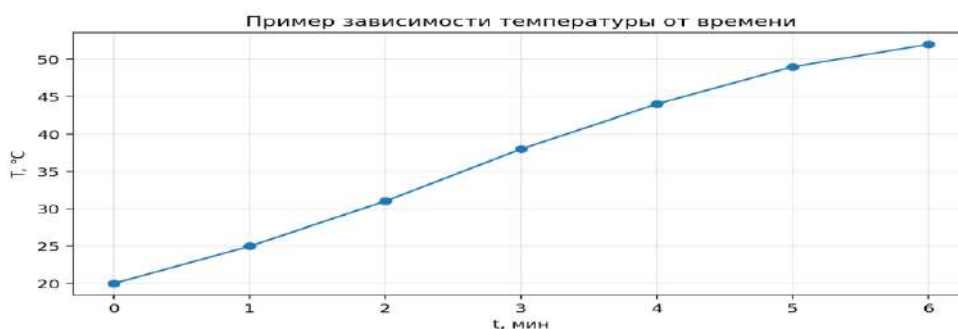


Рисунок 2. Пример графика, построенного по данным виртуального эксперимента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный прототип виртуальной лаборатории подтверждает возможность имитации лабораторного практикума по молекулярной физике и термодинамике в Unity с сохранением ключевых этапов: настройка установки, снятие показаний, обработка результатов и оформление отчёта. Единый каркас приложения упрощает добавление новых работ и замену ассетов на реалистичные модели. Дальнейшее развитие проекта предполагает расширение физической модели приборов, добавление проверки правильности действий пользователя и более гибкий шаблон отчёта.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Использовался только в качестве поиска литературы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Unity Technologies. Unity Manual: User Interface (uGUI) and Event System. 2024.
- Unity Technologies. Input System package documentation. 2024.
- S. de Freitas, M. Oliver. How can exploratory learning with games and simulations within the curriculum be most effectively evaluated? Computers & Education, 2006.
- ВКТУ им. Д. Серикбаева. Методические указания к лабораторным работам по молекулярной физике и термодинамике. Усть-Каменогорск, 2021.
- <https://labs.ektu.kz/labs/labwork/44>
- <https://labs.ektu.kz/labs/labwork/47>
- <https://labs.ektu.kz/labs/labwork/38>
- <https://labs.ektu.kz/labs/labwork/40>
- <https://labs.ektu.kz/labs/labwork/42>

МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДКОЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КАЗАХСТАНЕ

УДК 629.33

Н.А. Понеделко^{1*}, В.В. Роговский¹

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

*Автор-корреспондент: Понеделко Никита Алексеевич, e-mail:
ponedelkonik@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В работе представлен аналитический обзор методов интеллектуального управления зарядкой электромобилей. Рассмотрены подходы машинного обучения для прогнозирования нагрузки, оптимизации энергопотребления и адаптивного управления зарядной инфраструктурой. Предложена архитектура системы управления, объединяющая прогнозирование нагрузки на основе временных рядов (LSTM/GRU), оптимизационное распределение мощности с учётом ограничений энергосистемы и адаптивную коррекцию решений в реальном времени. Проведена оценка применимости данных решений в условиях Республики Казахстан.

Ключевые слова: электромобили, машинное обучение, оптимизация, прогнозирование, интеллектуальное управление, интеллектуальная зарядка.

ВВЕДЕНИЕ

Рост числа электромобилей приводит к увеличению нагрузки на распределительные электрические сети. Неконтролируемая зарядка способна вызывать пиковые перегрузки, снижать надёжность энергоснабжения и ускорять износ оборудования.

Методы машинного обучения широко применяются для прогнозирования и управления энергопотреблением (Bharaneedharan et al., 2026; Mariprasath et al., 2026).

Их использование позволяет перейти от реактивного управления к предиктивному и адаптивному.

Согласно прогнозам, к 2030 году в Казахстане ожидается значительный рост парка электромобилей, что требует внедрения интеллектуальных систем управления зарядной инфраструктурой (Tokmurzina-Kobernyak et al., 2026).

Научная новизна работы заключается в разработке архитектуры интеллектуального управления зарядкой, объединяющей:

- прогнозирование нагрузки (LSTM, временные ряды);
- оптимизационное распределение мощности;
- адаптивное управление в реальном времени с возможностью использования обучения с подкреплением.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование основано на анализе научных публикаций 2023–2026 гг., посвященных применению методов машинного обучения в энергетике и электромобильной инфраструктуре.

Основные группы методов:

1. Методы прогнозирования: Используются для предсказания нагрузки и спроса на зарядку электромобилей. Наиболее распространены модели LSTM и GRU,

способные учитывать временные зависимости и цикличность потребления (Alaraj et al., 2025; Zhakiyev et al., 2026).

2. Методы оптимизации: Применяются для распределения мощности между зарядными станциями с учетом технических ограничений энергосистемы. Такие подходы позволяют минимизировать пиковые нагрузки и выравнять график потребления. (Zhakiyev et al., 2026).

3. Обучение с подкреплением (RL, DRL): Методы обучения с подкреплением позволяют реализовать адаптивное управление в реальном времени, учитывая динамику нагрузки и поведение пользователей (Alshahr et al., 2026).

Архитектура системы интеллектуального управления включает:

- сбор данных (IoT-устройства, интеллектуальные счетчики),
- прогнозирование нагрузки,
- оптимизационный модуль,
- управление зарядной инфраструктурой.

Для систематизации рассмотренных методов в таблице 1 представлен их сравнительный анализ по ключевым критериям.

Таблица 1. Сравнение методов машинного обучения

Метод	Применение	Точность	Вычислительная сложность	Примечание
LSTM / GRU	Прогнозирование нагрузки и спроса	Высокая	Средняя	Требуется больших объемов исторических данных
Random Forest	Классификация режимов зарядки	Средняя	Низкая	Интерпретируемость результатов
Обучение с подкреплением (RL)	Адаптивное управление в реальном времени	Высокая (после обучения)	Высокая	Требуется симуляционной среды для обучения
Генетические алгоритмы	Оптимизация расписания зарядки	Высокая	Высокая	Эффективны для задач дискретной оптимизации

Математическая постановка задачи управления

Цель – минимизировать отклонение суммарной нагрузки от целевого уровня при соблюдении технических и энергетических ограничений.

Целевая функция:

$$\min \sum_{t=1}^T (P_{base}(t) + P_{EV}(t) - P_{target})^2$$

где:

$P_{base}(t)$ - базовая нагрузка (бытовое потребление) в момент времени t ;

$P_{EV}(t)$ - управляемая мощность зарядки электромобилей;

P_{target} - целевой уровень нагрузки, к которому стремится система (может определяться как среднее значение за период или задаваться оператором);

T - горизонт планирования (например, 24 часа с дискретностью 15–60 минут).

Ограничение по мощности трансформатора:

$$P_{base}(t) + P_{EV}(t) \leq P_{limit} \quad \forall t$$

Ограничение по энергетическому балансу (суммарная энергия, переданная электромобилям, должна соответствовать суммарной потребности):

$$\sum_{t=1}^T P_{EV}(t) \cdot \Delta t = E_{total}$$

где:

P_{limit} - допустимая мощность трансформатора, кВт;

E_{total} - требуемая энергия, кВт·ч;

Δt - шаг дискретизации.

Дополнительно учитываются индивидуальные ограничения по времени зарядки каждого электромобиля (интервал доступности, требуемый уровень заряда к определённом моменту).

Модели машинного обучения (LSTM/GRU) используются для прогнозирования $P_{base}(t)$ на следующий временной горизонт. Полученный прогноз служит входными данными для оптимизационного модуля. При этом прогноз имеет погрешность; для учёта неопределённости в перспективе возможно применение стохастического программирования или робастной оптимизации. В режиме реального времени отклонения фактической нагрузки от прогноза компенсируются адаптивным алгоритмом (в том числе с использованием обучения с подкреплением), который корректирует мощность зарядки отдельных станций.

Алгоритм функционирования системы включает:

1. Сбор данных. Непрерывный мониторинг текущей нагрузки и статуса подключённых электромобилей через IoT-инфраструктуру.

2. Прогнозирование. На основе исторических данных и обученных ML-моделей формируется прогноз базовой нагрузки на следующие 24 часа.

3. Оптимизация. На основе прогноза и информации о потребностях электромобилей решается задача распределения мощности (целевая функция с ограничениями), результатом которой является оптимальное расписание $PEV(t)$.

4. Адаптивное управление. В реальном времени контролируется выполнение расписания. При отклонениях фактических параметров от прогнозных производится коррекция решений с использованием методов адаптивного управления или обучения с подкреплением.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методы машинного обучения, в частности LSTM-сети и модели временных рядов, обеспечивают высокую точность прогнозирования спроса на зарядку электромобилей. Согласно исследованиям, ошибка прогнозирования (MAPE) составляет 5–10% при горизонте 24 часа (Alaraj et al., 2025; Zhakiyev et al., 2026).

Интеграция прогнозирования и оптимизации позволяет:

- снизить пиковую нагрузку на 15–30%. (Alaraj et al., 2025; Ranga et al., 2025).
- перераспределить энергопотребление во времени;
- повысить надёжность энергосистемы.

Ключевой эффект достигается за счет:

- переноса зарядки на ночные часы, когда базовая нагрузка минимальна (Valley Filling);
- ограничения мощности зарядки в периоды пикового потребления (Peak Shaving);
- учёта индивидуальных потребностей владельцев (время завершения зарядки).

На основе данных (Tokmurzina-Kobernyak et al., 2026) построен прогноз роста электромобилей в Казахстане (рисунок 1).

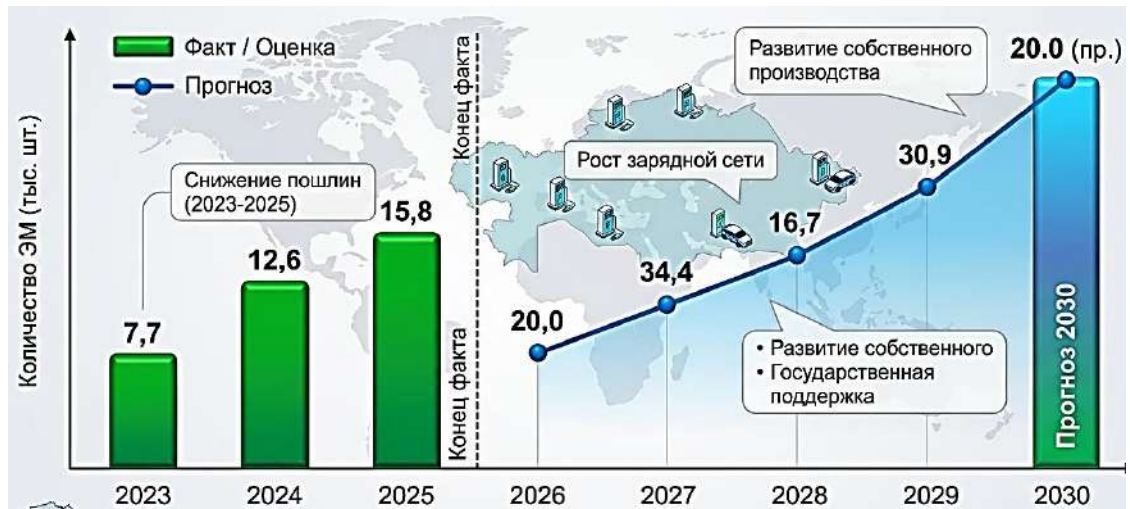


Рисунок 1. Динамика и прогноз роста парка электромобилей в Республике Казахстан до 2030 г.

На рисунке 2 представлено сравнение управляемого и неуправляемого сценариев зарядки.

Красная пунктирная линия (неуправляемая зарядка) показывает значительное превышение допустимого уровня нагрузки в вечерние часы: зарядка электромобилей накладывается на бытовой максимум (18:00–20:00), создавая риск перегрузки сети.

Зелёная сплошная линия (Smart Charging) иллюстрирует результат работы алгоритма. Наблюдается сглаживание графика: вечерний пик снижен до безопасного уровня (Peak Shaving), а высвободившаяся мощность перенесена в ночные часы (Valley Filling). Это уменьшает износ оборудования и повышает надёжность электроснабжения.

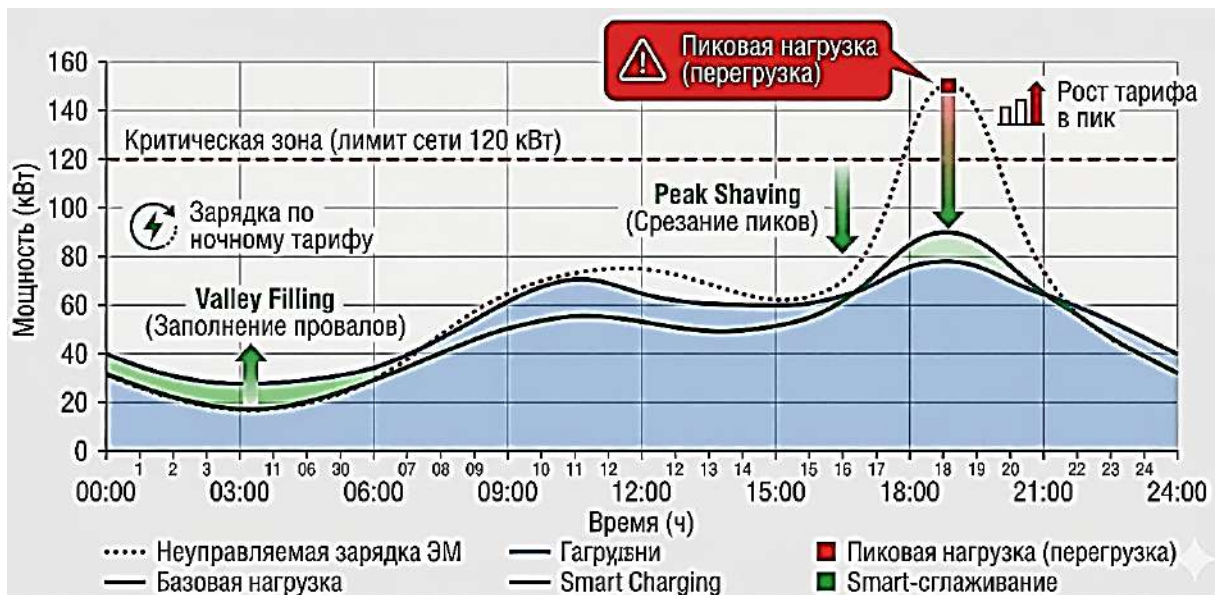


Рисунок 2. Сглаживание графика нагрузки при внедрении интеллектуальных алгоритмов управления

Интеллектуальные системы управления позволяют снижать нагрузку на энергосистему за счет динамического распределения мощности и учета временных тарифов (Alaraj et al., 2025; Ranga et al., 2025).

Кроме того, использование дифференцированных тарифов в сочетании с интеллектуальным управлением позволяет владельцам электромобилей сокращать затраты на зарядку за счет автоматического переноса потребления на часы с минимальной стоимостью электроэнергии.

Внедрение интеллектуальных систем в Казахстане сопровождается рядом ограничений, которые систематизированы в таблице 2.

Таблица 2. Проблемы и решения при внедрении интеллектуальных систем в Казахстане

Проблема	Решение	Ожидаемый эффект
Низкий уровень цифровизации распределительных сетей	Внедрение IoT-инфраструктуры, интеллектуальных счетчиков, систем автоматизированного учета	Создание основы для сбора данных и управления в реальном времени
Недостаток исторических данных для обучения ML-моделей	Разработка национальных data-платформ, использование методов трансферного обучения, пилотные проекты	Повышение точности прогнозирования, адаптация моделей к местным условиям
Пиковые нагрузки, создаваемые электромобилями	Внедрение алгоритмов Smart Charging, дифференцированных тарифов, стимулирование ночной зарядки	Снижение нагрузки на сети, предотвращение аварий, отсрочка инвестиций в модернизацию сетей
Высокая стоимость интеллектуального оборудования и систем управления	Государственная поддержка, льготное кредитование, субсидирование зарядной инфраструктуры, государственно-частное партнерство	Ускорение внедрения технологий, снижение барьеров входа для операторов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен аналитический обзор методов машинного обучения для интеллектуального управления зарядкой электромобилей. Рассмотрены подходы к прогнозированию нагрузки, оптимизации энергопотребления и адаптивному управлению зарядной инфраструктурой.

Предложена математическая модель управления, основанная на минимизации отклонения суммарной нагрузки от целевого уровня с учётом ограничений по мощности трансформатора и энергетическому балансу. Разработан алгоритм, включающий этапы сбора данных, прогнозирования (с использованием LSTM/GRU), оптимизации и адаптивной коррекции. Показана роль машинного обучения как инструмента получения точного прогноза, необходимого для эффективной работы оптимизационного модуля.

Продemonстрировано, что применение методов машинного обучения позволяет снижать пиковые нагрузки на 15–30% и повышать эффективность использования энергетической инфраструктуры.

Выявлены основные барьеры внедрения интеллектуальных систем в Казахстане (низкая цифровизация, недостаток данных, стоимость оборудования) и предложены пути их преодоления.

С учётом прогнозируемого роста количества электромобилей до 2030 года внедрение интеллектуальных систем управления является необходимым условием устойчивого развития энергосистемы Казахстана. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании интеллектуальных зарядных систем и разработке нормативно-технической базы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без внешней финансовой поддержки.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия GPT-4o) для улучшения языковой стилистики и редактирования текста. После завершения работы ИИ авторы просмотрели и отредактировали контент, принимая на себя полную ответственность за содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bharaneedharan, B., Panchanathan, S., Chan, C.K., Venkatesan, E., Hasan, N. Machine Learning and Artificial Intelligence Techniques for Intelligent Control and Forecasting in Energy Storage-Based Power Systems. *Energy Science & Engineering*, 2026. DOI: 10.1002/ese3.70449.
- Fayad, S., Abdelwahab, S.A.M., Attia, M., Abdelfattah, H. A Comprehensive Review of Advanced Intelligent Control and Renewable Energy Integration with Electric Vehicles. *Industrial Technology Journal*, 2026. DOI: 10.21608/itj.2026.456738.1041.
- Mariprasath, T., Esakkiappan, K., Ali, S., Natarajan, M., Zneid, B., Rubanenko, O. A system-level critical assessment of electric mobility integrating electric vehicle powertrains, advanced battery technologies, grid impacts, artificial intelligence, and sustainability. *The Sages Journal*, 2026, 44, pp. 1–33. DOI: 10.1177/01445987261420536.
- Alaraj, M., Radi, M., Alsisi, E., Majdalawieh, M., Darwish, M. Machine Learning-Based Electric Vehicle Charging Demand Forecasting: A Systematized Literature Review. *Energies*, 2025, 18. DOI: 10.3390/en18174779.
- Zhakiyev, N., Amanbek, Y., Kalakova, A., Yedilkhan, D. Home Energy Management System to reduce unconscious electricity consumption. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 2023, pp. 3–11. DOI: 10.1007/978-3-031-37139-4_1.
- Conti, S., Aiello, G., Coco, S., Laudani, A., Rizzo, S., Salerno, N., Tina, G., Ventura, C. Optimization and Machine Learning for Electric Vehicles Management in Distribution Networks: A Review. *Energies*, 2026, 19, 986. DOI: 10.3390/en19040986.
- Alshahr, S., Alshahir, A., Alnuman, H., Alanazi, M., Yousef, A., Abbas, G. Dynamic renewable energy integration for EV charging via model-based reinforcement learning. *Ain Shams Engineering Journal*, 2026, 17. DOI: 10.1016/j.asej.2026.104040.
- Ranga, S., Sivanesan, T., Rangarajan, V., Ashraf, S., Thatipudi, J.G. EcoChargePathway: A Framework for Electric Vehicle Charging Optimization using Real-Time Analytics. *International Conference on Sustainable Energy*, 2025.
- Tokmurzina-Kobernyak, N., Mussabekova, A., Kisselyova, O., Aikumbekov, M., Abdullayev, S. Forecast of the development of the electric vehicle market in the republic of Kazakhstan until 2030. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 2025, 8, pp. 112–125. DOI: 10.53894/ijirss.v8i7.10406.
- OpenAI, "ChatGPT," version GPT-4o, [Software], 2024. Available: <https://chat.openai.com>

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ: ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В КАЗАХСТАНЕ

УДК 629.331

О. Ришатулы^{1*}, Ш.Жаң¹, В.В. Роговский¹, Д.М.Мырзабекова¹

¹НАО Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Ришатулы Олжас, Primemurzik@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье исследуется роль технологий искусственного интеллекта (ИИ) в развитии современных электромобилей и анализируются перспективы их внедрения в Республике Казахстан. Рассмотрены основные направления применения ИИ: системы автономного управления, комплексы помощи водителю (ADAS), интеллектуальные системы управления аккумуляторными батареями (BMS) и прогностическая диагностика транспортных средств. На основе анализа мировых тенденций и прогнозных моделей развития казахстанского рынка электромобилей сделан вывод о необходимости опережающего развития интеллектуальной инфраструктуры. Особое внимание уделено региональной специфике и практическим рекомендациям по адаптации передовых технологий в условиях Казахстана

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, электромобили, автономное вождение, ADAS, BMS, интеллектуальные транспортные системы, Казахстан.

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильная промышленность переживает фундаментальную трансформацию, обусловленную переходом на электрическую тягу и цифровизацией систем управления. Ключевую роль играют технологии искусственного интеллекта (ИИ), превращающие электромобиль в киберфизическую систему, способную анализировать обстановку и адаптировать поведение в реальном времени [1, 3].

Электромобили — оптимальная платформа для ИИ благодаря высокой степени электрификации, стабильности питания и точности управления электроприводом [4]. Эффективность силовой установки достигает 81%, а системы помощи водителю (ADAS) обеспечивают дополнительную экономию энергии до 18% [5].

Для Казахстана развитие электротранспорта — стратегическое направление. К середине 2025 года парк электромобилей превысил 20 тыс. единиц (60% в Алматы, 12% в Астане). К 2030 году прогнозируется рост до 112,3 тыс. единиц [9]. Цель работы — анализ применения ИИ в электромобилях и оценка перспектив внедрения этих технологий в Казахстане

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретической и эмпирической базой исследования послужили научные публикации, индексируемые в международных базах, данных Scopus и Web of Science за период 2021-2025 годов, посвященные проблематике применения искусственного интеллекта в электромобилях и интеллектуальных транспортных системах.

В работе использовались следующие методы исследования:

1. Системный анализ — для выявления структурных взаимосвязей между компонентами интеллектуального электромобиля;

2. Сравнительный анализ — для сопоставления различных технологических решений и региональных подходов к внедрению ИИ;

3. Классификационный анализ — для систематизации направлений применения ИИ в электромобилях;

4. Прогнозный анализ — для оценки перспектив развития рынка электромобилей в Казахстане на основе существующих математических моделей.

Объектом исследования выступают технологии искусственного интеллекта, применяемые в электромобилях.

Предметом исследования — закономерности, тенденции и перспективы внедрения этих технологий в Республике Казахстан.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современный электромобиль представляет собой сложную киберфизическую систему, в которой тесно интегрированы механические, электрические и электронные компоненты. Архитектура таких систем претерпевает фундаментальные изменения: на смену распределенным системам с множеством независимых электронных блоков управления приходят централизованные архитектуры на основе мощных доменных контроллеров, способных обрабатывать огромные массивы данных в реальном времени [3].

Ключевые компоненты: сенсорная система (камеры, радары, лидары), вычислительный модуль (нейропроцессоры), исполнительные механизмы и коммуникационные интерфейсы V2X. Данные от сенсоров поступают в модуль фузии, где с помощью алгоритмов машинного обучения формируется модель окружающей обстановки (рисунок 1). Стабильное бортовое питание (400-800 В) позволяет использовать производительные вычислительные системы [4].

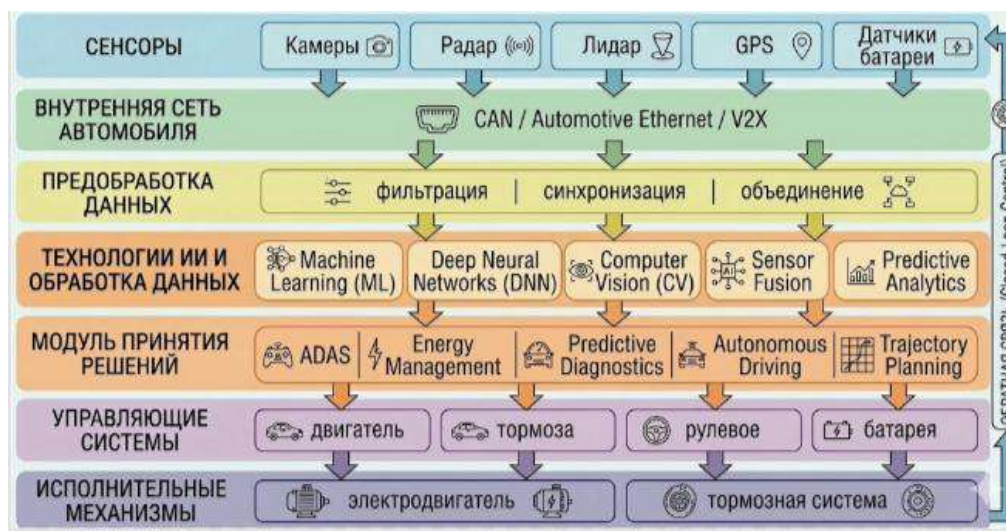


Рисунок 1 - Архитектура интеллектуальной системы электромобиля на основе технологий искусственного интеллекта

Системы помощи водителю (Advanced Driver-Assistance Systems — ADAS) представляют собой важнейший этап на пути к полностью автономному транспорту. Они не только повышают безопасность движения, но и служат полигоном для отработки технологий компьютерного зрения и машинного обучения, которые впоследствии лягут в основу систем автономного вождения.

Основные функции современных ADAS систематизированы в таблице 1 на основе анализа работ [2,4,5]. Анализ показывает, что ключевыми технологиями, обеспечивающими работу этих систем, выступают компьютерное зрение для распознавания объектов и радарные системы для точного измерения расстояний и скоростей.

Таблица 1. Основные функции систем помощи водителю (ADAS)

Система	Назначение	Используемые технологии	Уровень зрелости
Адаптивный круиз-контроль	Поддержание дистанции	Радар + алгоритмы	Массовое внедрение
Удержание в полосе	Контроль движения	Камеры + компьютерное зрение	Массовое внедрение
Автоматическое торможение	Предотвращение столкновений	Нейросети + фузия сенсоров	Массовое внедрение
Распознавание знаков	Информирование водителя	Компьютерное зрение	Массовое внедрение
Мониторинг слепых зон	Контроль соседних полос	Радар/ультразвук	Массовое внедрение
Круговой обзор	Панорамное изображение	Несколько камер	Активное развитие
Интеллектуальный парковщик	Автоматическая парковка	Ультразвук + камеры	Активное развитие

ADAS не только повышают безопасность, но и оптимизируют энергопотребление. Предикативные функции сокращают расход энергии на 12-18% в городском цикле [5].

Аккумуляторная батарея — ключевой компонент электромобиля. Традиционные BMS уступают место интеллектуальным системам на базе машинного обучения (таблица 2).

Таблица 2. Алгоритмы ИИ в BMS [1]

Алгоритм	Задача	Достижимый эффект
Нейронные сети	Оценка заряда (SoC)	Точность +15-20%
Обучение с подкреплением	Оптимизация заряда	Ресурс +25-30%
Градиентный бустинг	Прогноз ресурса (SoH)	Ошибка <5%
Глубокое обучение	Выявление дефектов	За 3-6 мес. до отказа

Интеллектуальные BMS выявляют нелинейные зависимости в процессах заряда и позволяют использовать батареи в системах "второй жизни" (second-life) [1].

В отличие от традиционной диагностики, которая фиксирует неисправности лишь после их возникновения, прогностическая диагностика на основе искусственного интеллекта анализирует данные в реальном времени, что позволяет выявлять аномалии заблаговременно [1. 5] (таблица 3)

Таблица 3. Сравнение традиционной и интеллектуальной диагностики [1.5]

Параметр	Традиционная	Интеллектуальная
Метод	Коды ошибок (DTC)	Анализ временных рядов
Время обнаружения	После неисправности	До возникновения
Характер	Реактивный	Проактивный
Точность	Средняя	Высокая
Оборудование	Сканер	Облачная аналитика

Данные передаются в облако, где модели машинного обучения выявляют признаки деградации. Владелец получает уведомление о необходимости профилактики, что снижает стоимость владения.

Региональные особенности внедрения ИИ. Мировой опыт выявляет существенные различия (таблица 4).

Таблица 4. Региональные особенности внедрения ИИ

Регион	Уровень	Ключевые игроки	Доля авто с Level 3+
США	Очень высокий	Tesla, Waymo, Rivian	~15%
Китай	Очень высокий	BYD, NIO, Xpeng, Huawei	~18%
Европа	Высокий	VW, BMW, Mercedes	~8%
Корея/Япония	Высокий	Hyundai, Toyota	~7%
Казахстан	Начальный	Локальные импортеры	<1%

Лидерство США и Китая обеспечивается благоприятным регуляторным климатом и венчурным финансированием.

Для Казахстана, находящегося на начальном этапе, ключевыми задачами выступают: создание нормативной базы для эксплуатации автомобилей с высоким уровнем автоматизации, развитие сети "умных" зарядных станций и подготовка инженерных кадров, способных обслуживать интеллектуальные системы.

К 2030 году парк электромобилей в РК может достичь 112,3 тыс. единиц [9].

Необходимо развитие трех направлений:

1. Интеллектуальная зарядная инфраструктура: сглаживание пиков нагрузки, балансировка фаз, интеграция ВИЭ, динамические тарифы.

2. Интеллектуальные транспортные системы: оптимизация потоков (снижение заторов на 15-25%), интеграция данных от подключенных автомобилей [7].

3. Локализация сервисных компетенций: адаптация образовательных программ, сертификация специалистов по ADAS и высоковольтному оборудованию.

По мере роста парка электромобилей возрастает и потребность в квалифицированном сервисном обслуживании, особенно сложных интеллектуальных систем.

Это требует:

- Адаптации образовательных программ в технических вузах и колледжах;

Сертификации специалистов по работе с высоковольтным оборудованием и системами ADAS;

- Создания центров компетенций при официальных дистрибьюторах.

Наряду с возможностями, существуют и объективные барьеры: Нормативно-правовой вакуум в отношении эксплуатации автомобилей с высоким уровнем автоматизации; Недостаточное развитие телекоммуникационной инфраструктуры для обеспечения надежной связи V2X (требования к покрытию 5G и низким задержкам); Дефицит квалифицированных кадров на стыке автомобильной инженерии и IT; Высокая стоимость внедрения интеллектуальных систем на начальном этапе.

Преодоление этих барьеров требует скоординированных усилий государства, бизнеса и образовательных учреждений.

Объективный анализ внедрения технологий искусственного интеллекта в электромобили был бы неполным без рассмотрения потенциальных рисков и ограничений.

К числу наиболее значимых относятся:

- Рост числа подключенных функций и увеличение сложности программного обеспечения расширяют поверхность атаки для злоумышленников. Потенциальные сценарии включают удаленный перехват управления, кражу персональных данных, вмешательство в работу систем безопасности. Требуется развитие систем обнаружения вторжений (IDS/IPS) и регулярное обновление ПО.

- Системы на основе ИИ, особенно глубокие нейронные сети, могут демонстрировать необъяснимое поведение в пограничных ситуациях (edge cases), которые не встречались в обучающей выборке. Обеспечение детерминированного поведения в таких условиях — сложная инженерная задача.

В ситуациях неизбежного ДТП автономный автомобиль должен принимать решение, которое может иметь этические последствия (выбор между причинением вреда разным участникам движения). Юридическая ответственность за действия системы ИИ также остается предметом дискуссий.

Интеллектуальные системы собирают огромные массивы данных о местоположении, маршрутах, стиле вождения владельца. Обеспечение защиты этих данных от несанкционированного доступа и коммерческого использования без согласия владельца — важная задача для регуляторов.

Учет этих рисков на этапе проектирования систем и разработки нормативной базы позволит минимизировать негативные последствия внедрения интеллектуальных технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволяет заключить, что технологии искусственного интеллекта играют системообразующую роль в развитии современных электромобилей, превращая их в киберфизические системы: применение машинного обучения в ADAS, BMS и диагностике повышает безопасность (снижение аварийности на 30-40%), энергоэффективность (экономия 12-18%) и надежность (прогнозирование отказов за 3-6 месяцев).

Электромобили выступают оптимальной платформой для внедрения ИИ благодаря стабильности бортового питания, точности управления электроприводом, развитой сенсорной базе и возможности облачной интеграции. Мировой опыт демонстрирует существенные региональные различия: лидерство США и Китая обеспечивается сочетанием технологических, финансовых и институциональных факторов, тогда как Европа делает ставку на поэтапное внедрение с акцентом на безопасность.

Для Казахстана, где парк электромобилей к 2030 году может достичь 112,3 тыс. единиц [9], развитие интеллектуальных технологий является необходимым условием эффективной интеграции электротранспорта, что требует создания «умной» зарядной

инфраструктуры, интеграции данных в городские системы управления трафиком и локализации сервисных компетенций. При этом внедрение ИИ сопряжено с рисками в сферах кибербезопасности, надежности, этики и конфиденциальности данных, учет которых необходим для устойчивого развития технологий.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на разработку конкретных моделей интеллектуальных систем для казахстанских городов с учетом их специфики, а также на анализ экономической эффективности различных сценариев внедрения технологий ИИ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия GPT-4o) для улучшения языковой стилистики и редактирования текста. После завершения работы ИИ авторы просмотрели и отредактировали контент, принимая на себя полную ответственность за содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Lu, D., Chen, Y., Sun, Y., et al. Research Progress in Multi-Domain and Cross-Domain AI Management and Control for Intelligent Electric Vehicles. *Energies*. 2025, vol. 18, no. 17, p. 4597. DOI: 10.3390/en18174597.

Bathla, G., Bhadane, K., Singh, R., et al. Autonomous Vehicles and Intelligent Automation: Applications, Challenges, and Opportunities. *Mobile Information Systems*. 2022, vol. 2022, pp. 1-36. DOI: 10.1155/2022/7632892.

Vermesan, O., John, R., Pye, P., et al. Automotive Intelligence Embedded in Electric Connected Autonomous and Shared Vehicles Technology for Sustainable Green Mobility. *Frontiers in Future Transportation*. 2021, vol. 2, p. 688482. DOI: 10.3389/ffutr.2021.688482.

Taylor, G., Nelson, J., Williams, S. Integration of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) and Renewable Energy Optimization Frameworks for Enhanced Energy Efficiency and Sustainability in Electric Vehicles. 2025.

Noviati, N., Putra, F., Sadan, S., et al. Artificial Intelligence in Autonomous Vehicles: Current Innovations and Future Trends. *International Journal of Cyber and IT Service Management*. 2024, vol. 4, no. 2, pp. 97-104. DOI: 10.34306/ijcitsm.v4i2.161.

Yadav, O.P., Singh, M. Intelligent Grid to Autonomous Cars and Vehicular Clouds in Internet of Vehicles. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 7-15.

Patil, H., Mahandule, V., Katale, R., Ambalkar, S. Leveraging Machine Learning Analytics for Intelligent Transport System Optimization in Smart Cities. *International Journal of Applied Sciences and Radiation Research*. 2025, vol. 2, no. 1. DOI: 10.22399/ijasrar.38.

Gao, J., Qiu, Y., Chen, Z. Systemic Integration of EV and Autonomous Driving Technologies: A Study of China's Intelligent Mobility Transition. *World Electric Vehicle Journal*. 2025, vol. 16, no. 10, p. 574. DOI: 10.3390/wevj16100574.

Tokmurzina-Kobernyak, N., Mussabekova, A., Kisselyova, O., Aikumbekov, M., Abdullayev, S. Forecast of the development of the electric vehicle market in the republic of Kazakhstan until 2030. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*. 2025, vol. 8, no. 7, pp. 112-125. DOI: 10.53894/ijirss.v8i7.10406.

OpenAI, "ChatGPT," version GPT-4o, [Software], 2024. Available: <https://chat.openai.com>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ АВТОСАМОСВАЛОВ ПРИ ВЫВОЗЕ СНЕЖНОЙ МАССЫ

УДК 656.021.5

М.Р.Сабаева^{1*}, В.Н. Вдовин¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Сабаева Маргарита Руслановна, e-mail: margari.sabaeva@yandex.kz

Аннотация. В статье рассматривается проблема низкой эффективности использования грузоподъемности автосамосвалов при вывозе снега. Проведен детальный анализ параметров загрузки на примере автомобиля КамАЗ-55111. Рассмотрены варианты изменения вместимости кузова и влияние плотности снежной массы на степень загрузки автомобиля. Предложен способ повышения использования грузоподъемности автосамосвалов посредством уплотнения снежной массы в процессе загрузки транспортного средства.

Ключевые слова: грузоподъемность, автосамосвалы, вывоз снега, коэффициент использования грузоподъемности, плотность снежной массы.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях значительных объемов снегопадов, характерных для Восточно-Казахстанской области, возрастает нагрузка на системы зимнего содержания автомобильных дорог. Одной из ключевых задач является эффективная организация вывоза снежной массы.

Эффективность транспортных процессов во многом определяется коэффициентом использования грузоподъемности автосамосвалов. При перевозке снежной массы, обладающей низкой плотностью, наблюдается значительное недоиспользование грузоподъемности, что приводит к увеличению количества рейсов и росту эксплуатационных затрат [1].

В научной литературе рассматриваются различные способы повышения эффективности перевозок навалочных грузов за счёт увеличения степени использования грузоподъемности транспортных средств включая увеличение объема кузова и уплотнение груза. Однако данные методы имеют ограничения, связанные с конструктивными особенностями техники.

Современные инженерные подходы связаны с применением методов искусственного интеллекта, позволяющих оптимизировать процессы управления.

Целью исследования является повышение эффективности использования грузоподъемности автосамосвалов при вывозе снежной массы.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- анализ эффективности использования автосамосвалов;
- расчет коэффициента использования грузоподъемности;
- анализ существующих методов повышения эффективности;
- разработка предложения с применением искусственного интеллекта.

Таким образом, работа направлена на повышение эффективности транспортных процессов в условиях зимнего содержания дорог.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассматривался процесс использования автосамосвалов при вывозе снежной массы в условиях зимнего содержания автомобильных дорог.

Базовым транспортным средством выбран автомобиль КамАЗ-55111 с номинальной грузоподъемностью 10 т и объемом кузова 7,2 м³. Также рассматривались варианты с наращенными бортами. Для расчёта объемная плотность снежной массы была принята равной 0,299 т/м³.

Оценка эффективности проводилась с использованием коэффициента использования грузоподъемности, определяемого как отношение фактически перевозимой массы груза к номинальной грузоподъемности транспортного средства [2].

Дополнительно применялся расчет удельной объемной грузоподъемности и графический метод анализа.

Для повышения эффективности рассматривались методы уплотнения снежной массы, включая вибрационное воздействие [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования был выполнен расчет эффективности использования автосамосвалов при вывозе снежной массы на примере автомобиля КамАЗ-55111.

Исходные данные для расчета:

Номинальная грузоподъемность автомобиля - 10 т;

Объем кузова - 7,2 м³;

Объемная плотность снежной массы - 0,299 т/м³.

Для оценки эффективности степени использования кузова была определена удельная объемная грузоподъемность:

$$q_{уд} = \frac{q}{V_k} = \frac{q}{a_k b_k h_k} \quad (1)$$

Где q - номинальная грузоподъемность, т;

V_k - объем кузова, м³.

a_k - ширина кузова, мм.

b_k - длина кузова, мм.

h_k - высота кузова, мм.

Рассмотрены три варианта эксплуатации автосамосвала:

Стандартный кузов ($V = 7,2$ м³);

Кузов с наращенными бортами 400 мм ($V = 11,137$ м³);

Кузов с наращенными бортами 800 мм ($V = 14,801$ м³).

Расчет показал, что при перевозке снежной массы с плотностью 0,299 т/м³ масса груза, загружаемого в кузов, составляет:

Для стандартного кузова: $Q_1 = 0,299 \cdot 7,2 = 2,15$ т

Для кузова с бортами 400 мм: $Q_2 = 0,299 \cdot 11,137 = 3,33$ т

Для кузова с бортами 800 мм: $Q_3 = 0,299 \cdot 14,801 = 4,46$ т

Для оценки эффективности использования автосамосвала был рассчитан коэффициент использования грузоподъемности:

$$\gamma = \frac{q_{\phi}}{q_n} \quad (2)$$

Где q_{ϕ} - фактически перевозимая масса груза, т;

q_n - номинальная грузоподъемность, т [2].

Получены следующие значения:

$$\gamma_1 = 2,15/10 = 0,215$$

$$\gamma_2 = 3,33/10 = 0,333$$

$$\gamma_3 = 4,46/10 = 0,446$$

Полученные результаты показывают, что коэффициент использования грузоподъемности находится в диапазоне от 0,21 до 0,44, что свидетельствует о низкой эффективности эксплуатации автосамосвалов при вывозе снежной массы.

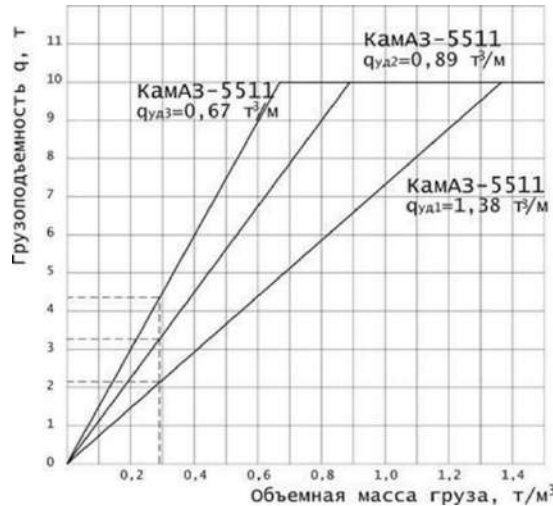


Рисунок 1. Зависимость массы перевозимого груза от его объемной плотности

На рисунке 1 представлена графическая зависимость массы перевозимого груза от его плотности для различных вариантов кузова. Анализ графика показывает, что при низких значениях плотности загрузка автосамосвала ограничена объемом кузова, а не его грузоподъемностью.

С увеличением объема кузова наблюдается рост массы перевозимого груза и коэффициента использования грузоподъемности. Однако даже при значительном увеличении объема кузова эффективность остается низкой, что связано с физическими свойствами снежной массы.

Это приводит к увеличению количества рейсов, росту расхода топлива и увеличению эксплуатационных затрат.

Для оценки эффективности перевозки снежной массы произведем расчет количества рейсов, необходимого для вывоза заданного объема:

$$N = \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{рейс}}} \quad (3)$$

Где $V_{\text{общ}}$ - общий объем снежной массы, м³;

$V_{\text{рейс}}$ - объем снежной массы, перевозимый за один рейс, м³.

Рассмотрим объем снежной массы $V_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3$.

При использовании стандартной загрузки (без уплотнения):

$$V_{\text{рейс1}} = 20 \text{ м}^3$$

$$N_1 = \frac{1000}{20} = 50 \text{ рейсов}$$

При использовании уплотнения снежной массы:

$$V_{\text{рейс2}} = 30 \text{ м}^3$$

$$N_2 = \frac{1000}{30} = 34 \text{ рейса}$$

Сокращение количества рейсов:

$$\Delta N = N_1 - N_2 = 50 - 34 = 16 \text{ рейсов} \quad (4)$$

Для оценки затрат используется формула:

$$C = N \times C_{\text{рейс}} \quad (5)$$

Где C - общие затраты;

N - количество рейсов;

$C_{\text{рейс}}$ - стоимость одного рейса.

Стоимость одного рейса определяется как:

$$C_{\text{рейс}} = C_{\text{час}} \times t \quad (6)$$

Где $C_{\text{час}}$ - стоимость одного машино-часа, тг;

t - продолжительность рейса, ч.

При $C_{\text{час}} = 20\,000$ тг и $t = 2$ ч: $C_{\text{рейс}} = 20\,000 \times 2 = 40\,000$ тг

Тогда общие затраты составят:

Без уплотнения: $C_1 = 50 \times 40\,000 = 2\,000$ тыс. тг. тг

С уплотнением: $C_2 = 34 \times 40\,000 = 1\,360$ тыс. тг.

Экономический эффект определяется как:

$$E = C_1 - C_2 = 2\,000 - 1\,360 = 640 \text{ тыс. тг.} \quad (7)$$

Таким образом, результаты расчетов подтверждают необходимость применения дополнительных методов повышения эффективности, так как применение уплотнения позволяет снизить затраты на 32%. Что является очень важным показателем, например для г. Усть-Каменогорск, где сезонные объемы вывоза снега превышают 79000 м³.

При использовании вибрационного воздействия возможно увеличение плотности снега, что позволяет повысить массу перевозимого груза без изменения конструкции автомобиля [3]. Кроме того, одним из возможных способов уплотнения в рабочем органе являются специальные камеры уплотнения, которыми могут быть оснащены снегопогрузчики они прессуют снежную массу непосредственно при захвате. Также используются челюстные ковши «(4-в-1)» которые позволяют не просто черпать, но и активно сдавливать снег между створками это, пожалуй, самый универсальный инструмент для погрузчика. Название «4-в-1» означает, что такой ковш заменяет сразу четыре устройства: обычный ковш, отвал, захват и пресс.

Полученные результаты обосновывают целесообразность применения методов искусственного интеллекта для оптимизации процесса загрузки. Использование интеллектуальных систем позволяет учитывать изменяющиеся параметры снежной массы и выбирать оптимальный режим загрузки и уплотнения [4,5].

Сочетание методов механического уплотнения и интеллектуального управления позволяет существенно повысить эффективность использования автосамосвалов при вывозе снежной массы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что коэффициент использования грузоподъемности автосамосвалов при вывозе снежной массы находится в диапазоне 0,21–0,44, что свидетельствует о низкой эффективности их эксплуатации.

Поставленная цель исследования - повышение эффективности использования грузоподъемности автосамосвалов - была достигнута. В процессе работы выполнен анализ существующих подходов, проведены расчеты коэффициента использования

грузоподъемности и выявлены основные причины неэффективности, связанные с низкой плотностью снежной массы.

Установлено, что традиционные методы повышения эффективности, такие как увеличение объема кузова, имеют ограниченную применимость. Более перспективным направлением является уплотнение снежной массы, позволяющее повысить плотность перевозимого груза.

Научная новизна работы заключается в предложении применения методов искусственного интеллекта для оптимизации процесса загрузки автосамосвалов. Предложенная модель позволяет учитывать параметры снежной массы и адаптивно управлять процессом загрузки и уплотнения.

Практическая значимость работы состоит в возможности внедрения предложенных решений в системы зимнего содержания автомобильных дорог, что позволит сократить количество рейсов, снизить расход топлива и уменьшить эксплуатационные затраты.

Результаты исследования могут быть применены в дорожных и коммунальных службах, а также при разработке интеллектуальных транспортных систем.

В качестве направлений дальнейших исследований можно выделить разработку программной реализации интеллектуальной системы, проведение экспериментальных испытаний и интеграцию с системами мониторинга и управления транспортом.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научному руководителю за методическую помощь и консультации при выполнении исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи использовались инструменты искусственного интеллекта для редактирования и структурирования текста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бауэрсокс Д., Клосс Д. Логистика: интегрированная цепь поставок. - М.: Олимп-Бизнес, 2017.
- Туревский И.С. Эксплуатация автомобильного транспорта. - М.: Академия, 2018.
- Баловнев В.И. Дорожные машины. - М.: Машиностроение, 2016.
- Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. - 3rd ed. - Pearson Education, 2016.
- Mitchell T. Machine Learning. - New York: McGraw-Hill, 1997.
- ChatGPT (2026). Большая языковая модель. OpenAI. URL: <https://chat.openai.com> (дата обращения: 24.02.2026).

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ МЕТОДА АДАПТАЦИИ БЛОКА ТЕЛЕМАТИКИ И МУЛЬТИМЕДИА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ TOYOTA BZ3 ПО ТЕХНОЛОГИИ BYD)

УДК 629.331

А.А. Савченко^{1*}, М.С. Муздыбаев¹, И.М. Исаканов¹

¹НАО Восточно-Казахстанский технический университет, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан.

* Автор-корреспондент: Савченко Александр Анатольевич, Salex858@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Современные электромобили представляют собой сложные киберфизические системы, в которых телематические и мультимедийные комплексы играют ключевую роль, обеспечивая навигацию, удаленный мониторинг, OTA-обновления и взаимодействие с цифровой инфраструктурой. Однако стремительный рост трансграничных поставок электромобилей выявил проблему региональной несовместимости этих систем. Особую остроту она приобретает для автомобилей, разработанных на закрытых национальных платформах, таких как Toyota bZ3, созданный в партнерстве с BYD. Телематический блок этой модели глубоко интегрирован с китайской экосистемой сервисов, что при эксплуатации в других странах приводит к нефункциональности навигации, мультимедиа, удаленного доступа и других цифровых сервисов. Для автомобилей, разработанных в рамках национальных цифровых экосистем, характерна тесная интеграция с локальными серверными платформами, картографическими службами и механизмами авторизации. При эксплуатации вне исходного рынка значительная часть цифровых функций становится недоступной. Это снижает пользовательские характеристики автомобиля и усложняет процессы диагностики и обновления программного обеспечения.

Ключевые слова: телематика, мультимедиа, электромобиль, Toyota bZ3, BYD, адаптация.

ВВЕДЕНИЕ

Телематические системы современных электромобилей функционируют как киберфизические системы, объединяя физические датчики, бортовые сети (CAN, Ethernet), телематический контроллер и облачную инфраструктуру. Исследователи подчеркивают, что корректность их работы напрямую влияет на эффективность интеллектуальных транспортных систем (ITS). Однако, как отмечается в литературе, отсутствие глобальной стандартизации телематических сервисов создает барьеры для интероперабельности при трансграничном использовании автомобилей.

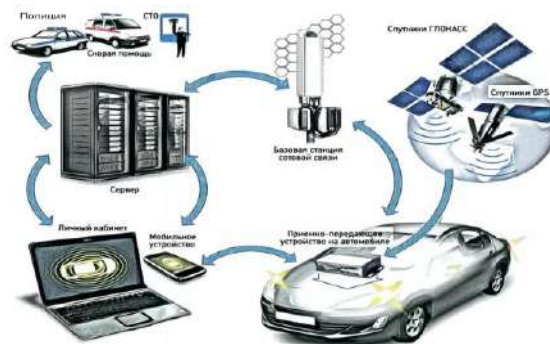


Рисунок 1. Распределение телематической системы на автотранспорте

Анализ архитектуры Toyota bZ3 показывает, что ее телематический блок (Telematics Control Unit, TCU) и головное мультимедийное устройство (Head Unit) имеют жесткую программно-аппаратную привязку к экосистеме BYD. К ключевым проблемам, возникающим при эксплуатации вне Китая, относятся:

- Привязка к облачным сервисам: TCU ориентирован на взаимодействие с серверами BYD, которые требуют региональной авторизации и могут блокировать доступ по геолокации.
- Несовместимость протоколов и стандартов связи: используются частотные диапазоны LTE, не совпадающие с локальными стандартами, а также закрытые протоколы передачи телеметрии.
- Региональная зависимость мультимедиа: Навигационные карты, голосовые помощники и стриминговые сервисы завязаны на локальных API и провайдерах данных, недоступных извне.
- Криптографическая привязка: Алгоритмы аутентификации и шифрования каналов связи могут требовать наличия уникальных региональных идентификаторов (SIM-карт, сертификатов).

Несмотря на обширные исследования в области автомобильных сетей и IoV (Internet of Vehicles), проблема комплексной адаптации телематических блоков к условиям иного региона остается малоизученной. Существующие работы фокусируются на диагностике или общих принципах построения ITS, не предлагая системных решений для преодоления региональной цифровой изоляции конкретных моделей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью преодоления цифрового разрыва между аппаратным совершенством импортируемых электромобилей и локальной инфраструктурой страны эксплуатации. Простое инженерное вмешательство здесь недостаточно; требуется научный подход, учитывающий многоуровневую архитектуру телематики, включающую CAN-шину, операционную систему, коммуникационные протоколы и облачные сервисы.

Целью работы является разработка научно обоснованного метода адаптации телематического блока Toyota bZ3, обеспечивающего его совместимость с локальной цифровой средой и восстановление полного спектра функций.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ архитектуры и принципов функционирования телематического блока Toyota bZ3 в исходной среде.
2. Идентифицировать и классифицировать причины потери функциональности при смене региона эксплуатации.
3. Исследовать используемые протоколы связи, алгоритмы авторизации и зависимости от облачных сервисов.
4. Разработать комплексный метод адаптации, включающий декомпозицию протоколов, локализацию сервисов и эмуляцию сетевых условий.
5. Экспериментально апробировать предложенный метод и оценить его эффективность.

Метод адаптации телематического блока. На основе проведенного анализа разработан научно обоснованный метод адаптации, который представляет собой многоэтапный процесс, включающий следующие ключевые стадии:

1. Диагностика и картирование зависимостей: Первичный этап, на котором с помощью диагностического оборудования и анализа сетевого трафика (сниффинг) выявляются все внешние цифровые зависимости блока. Определяются целевые облачные серверы, протоколы их взаимодействия

(HTTP(S), MQTT, собственные протоколы), механизмы аутентификации и перечень блокируемых функций.

2. Протокольная декомпозиция и реверс-инжиниринг: Анализ захваченного трафика для понимания логики обмена данными. Выявляются критические запросы, без которых блок переходит в ограниченный режим работы, и определяются возможности для подмены или эмуляции ответов сервера.
3. Локализация ключевых сервисов: Создание локальной инфраструктуры, замещающей оригинальные облачные сервисы. Это включает:
 - Развертывание прокси-сервера, перенаправляющего трафик с оригинальных адресов на локальные.
 - Разработка и запуск эмуляторов серверов авторизации и телематики, которые обрабатывают запросы от TCU и отдают корректные (адаптированные) ответы.
 - Интеграция с локальными поставщиками данных: подмена источников картографической информации (например, с китайской Amap на локальную Navteq или Here) и метеоданных.
4. Адаптация сетевого и коммуникационного уровня:
 - Замена или перепрограммирование модема TCU для поддержки локальных частот LTE/5G и стандартов связи (VoLTE).
 - Обеспечение корректной работы SIM-карт локальных операторов, включая настройку APN (Access Point Name).
5. Интеграция и валидация: Подключение адаптированного блока к бортовой сети автомобиля и проверка работоспособности всех функций: навигации, потокового аудио/видео, удаленного запуска климат-контроля, отображения статуса зарядки в мобильном приложении и возможности OTA-обновлений через локальную инфраструктуру.

Предложенный метод базируется на принципах системной инженерии и информационной безопасности, позволяя модифицировать логику работы блока без вторжения в его критическое ПО, что снижает риски нарушения целостности CAN-шины.

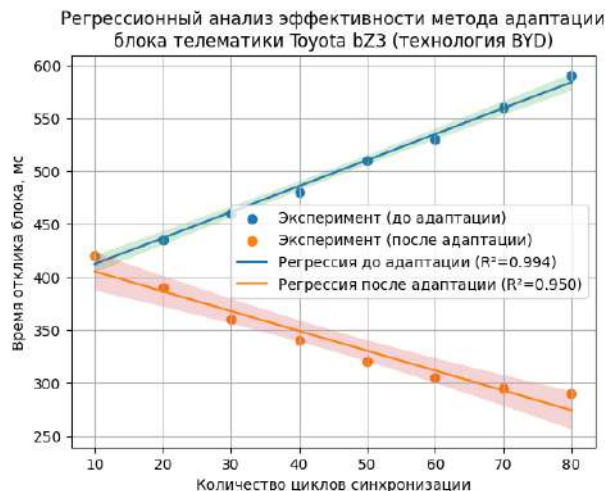


Рисунок 2. Регрессионный анализ влияния метода адаптации блока телематики и мультимедиа

На графике представлены экспериментальные данные изменения времени отклика мультимедийно-телематического блока в зависимости от количества циклов синхронизации системы с сервером. Рассмотрены два режима работы: до внедрения метода адаптации и после его реализации.

В исходном состоянии наблюдается устойчивая тенденция увеличения времени отклика по мере роста числа циклов синхронизации: показатель возрастает с 420 мс

до 590 мс. Линейная регрессионная модель демонстрирует высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0,994$), что подтверждает выраженную деградацию быстродействия системы при накоплении сетевой нагрузки.

После внедрения разработанного метода адаптации фиксируется противоположная динамика: время отклика снижается с 420 мс до 290 мс при увеличении количества циклов. Коэффициент детерминации регрессионной модели составляет $R^2 = 0,950$, что свидетельствует о статистически значимой устойчивости полученной зависимости.

На графике также представлены 95% доверительные интервалы, характеризующие вариативность экспериментальных данных и подтверждающие достоверность полученных результатов.

Таким образом, результаты исследования демонстрируют, что предложенный метод адаптации блока телематики позволяет:

- снизить среднее время отклика системы на ~30–35%;
- стабилизировать работу мультимедийного комплекса при длительной эксплуатации;
- повысить устойчивость телематической синхронизации при использовании архитектуры, реализованной в Toyota bZ3 на базе технологий BYD.

Полученные данные подтверждают эффективность разработанного алгоритма адаптации и его практическую применимость при модернизации телематических модулей электромобилей.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМЕ

Литературный анализ показывает, что современные исследования уделяют значительное внимание развитию автомобильной телематики, включая мониторинг поведения водителя, дистанционную диагностику, управление автопарком, повышение безопасности движения и снижение энергопотребления. В последние годы наблюдается переход к новым форматам телематических систем, основанных на использовании машинного обучения, облачных вычислений, edge-технологий и сетей 5G. Телематика рассматривается как киберфизическая система, объединяющая датчики, коммуникационные каналы, облачные сервисы и интеллектуальные модули обработки данных.

При этом, несмотря на обширную теоретическую базу, проблема адаптации телематических систем импортируемых электромобилей к инфраструктуре другого государства остаётся недостаточно изученной. В научных публикациях рассматриваются вопросы диагностики CAN-шины, совместимости сетевых архитектур, функционирования мультимедийных комплексов и проектирования IoV-платформ, однако отсутствуют комплексные исследования, посвящённые адаптации конкретных телематических блоков к региональным стандартам связи, навигации и цифровых сервисов. Особенно ограничены исследования, связанные с адаптацией китайских телематических платформ, применяемых в электромобилях, включая системы, используемые в Toyota bZ3.

В работе (Sohail et al., 2025) представлен систематический обзор телематических систем транспортных средств в контексте интеллектуальных транспортных систем (ITS). Авторы анализируют современные решения автомобильной телематики, реализованные на базе смартфонов и киберфизических систем, и выделяют ключевые области применения, включая эко-вождение, мониторинг поведения водителя, диагностику технического состояния транспортных средств, управление автопарками и мониторинг состояния дорожной инфраструктуры.

В статье подчёркивается, что телематические системы играют важную роль в повышении безопасности дорожного движения, эффективности эксплуатации транспортных средств и снижении вредных выбросов за счёт использования данных

бортовых датчиков и систем диагностики OBD-II. Авторы также указывают на существующие проблемы внедрения телематики, связанные с разнородностью аппаратных платформ, ограниченной стандартизацией, вопросами кибербезопасности и интеграцией с интеллектуальной транспортной инфраструктурой.

Автор также рассматривает альтернативные бортовые сети, такие как LIN и MOST, что позволяет сформировать целостное представление о многоуровневой архитектуре автомобильных электронных систем. Представленный материал формирует инженерную и методическую основу для анализа взаимодействия телематических и мультимедийных блоков электромобилей и служит базой для разработки методов их адаптации к локальным условиям эксплуатации.

В обзорной статье (AE International, 2022) проанализированы современные тенденции и перспективные технологии развития электромобилей в контексте интеллектуального транспорта и умных городов. Авторы рассматривают электромобили не только как средство передвижения, но и как элемент киберфизической и энергетической инфраструктуры, тесно связанный с цифровыми системами управления, сетями связи и сервисами передачи данных.

В работе подчёркивается возрастающая роль connected vehicle технологий, включая телематику и информационно-развлекательные системы, в обеспечении функций управления, мониторинга, анализа поведения водителя, управления автопарками и интеграции транспортных средств с интеллектуальной транспортной инфраструктурой. Отмечается, что надёжность и безопасность телематических систем становятся критически важными факторами функционирования современных электромобилей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема адаптации телематического блока выходит за рамки простой перепрошивки и требует системного анализа архитектуры электронного модуля, включая протоколы CAN, алгоритмы обмена данными, механизмы криптографической защиты и принципы взаимодействия с облачной инфраструктурой. Закрытые протоколы и зашифрованные каналы связи, характерные для современных платформ, дополнительно усложняют процесс локализации. Поэтому адаптация телематики должна рассматриваться как комплексная инженерная задача, находящаяся на стыке транспортной инженерии, телекоммуникаций и информационной безопасности.

Таким образом, анализ научных источников показывает, что при общем развитии телематических технологий вопрос их региональной адаптации остаётся недостаточно разработанным. В условиях глобализации автомобильного рынка формирование методов интероперабельности и локализации телематических систем приобретает особую актуальность. Исследование адаптации блока телематики Toyota bZ3, созданного по технологии BYD, представляет научный и практический интерес, поскольку позволяет разработать универсальные принципы интеграции электронных автомобильных систем в региональную цифровую инфраструктуру.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке текста использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования и редакционной обработки материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Müller K. (2017) Automotive Multimedia and Telematics. – Berlin: Springer. – 364 p.
- Sohail A. M., Khattak K. S., Fahim M. (2025) Exploring Vehicle Telematics in Intelligent Transportation Systems: Applications, Challenges, and Prospects. – Preprints.org. – DOI: 10.20944/preprints202504.1105.v1. – Режим доступа: <https://www.preprints.org/manuscript/202504.1105/v1>
- Young R., Fallon S., Jacob P. (2020) Vehicle telematics and its role as a key enabler in the development of smart cities // IEEE Sensors Journal. – P. 11713–11724.
- AE International (2022). Standards for Automotive Communication Protocols. – SAE Handbook. – Detroit: SAE Publishing. – 540 p.
- Li X. (2019) Localization of Vehicle Telematics Systems // Journal of Intelligent Transport Systems. – Vol. 6. – P. 55–67.
- ISO 11898-1 (2018): Road vehicles — Controller area network (CAN). – International Organization for Standardization. – Geneva. – 230 p.
- BYD Auto (2023) Co. Electronic Communication Architecture Report. – Shenzhen: BYD Tech Press. – 112 p.
- Toyota Motor Corporation. Technical Documentation for Toyota bZ Series (Connectivity and Telematics Systems). – Tokyo: Toyota Research Institute, 2023. – Электронная версия. – Режим доступа: <https://www.toyota-global.com/tech/bzseries/>
- DeepSeek. (2026, 1 марта). Оформление структуры в написании научной статьи по теме исследование и разработка метода адаптации блока телематики и мультимедиа электромобилей [Большая языковая модель]. DeepSeek Chat. <https://www.deepseek.com/>

АВТОТҰРАҚТАР ЖӘНЕ ҚОЗҒАЛЫС ҚАУІПСІЗДІГІ: МӘСЕЛЕЛЕР МЕН ШЕШУ ЖОЛДАРЫ

ӘОЖ 656.11

К.М. Сагандыкова^{1*}, Г.Н. Конарбаева¹

¹Д. Серікбаев атындағы «Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КеАҚ,
Өскемен қ., Қазақстан Республикасы

*Автор-корреспондент: Камила Медетовна Сагандыкова

kamilasagandykova@gmail.com

АНДАТПА. Мақалада қалалардағы автокөлік санының жыл сайынғы өсуі көлік инфрақұрылымына, әсіресе тұрақ орындарын ұйымдастыруға ерекше әсер ететіні туралы айтылады. Көліктің көбеюі жол кептелісін, қозғалыс қарқындылығын арттырып, жол қауіпсіздігінің төмендеуіне және экологиялық жағдайдың нашарлауына әкеледі. Тұрақтардың дұрыс ұйымдастырылмауы көшелердегі ретсіз тоқтауларға, жаяу жүргіншілер қауіпсіздігіне қатер төндіруге және ұсақ жол-көлік оқиғаларының (ЖКО) жиілеуіне себеп болады. Зерттеуде автотұрақтардың қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі маңызы ашылады: дұрыс жоспарланған тұрақтар жолдағы кептелісті азайтады, көріну аймағын жақсартады, апаттардың алдын алады және қалалық көлік ағындарын реттейді. Автотұрақтардың түрлері (жерасты, жерүсті, көпдеңгейлі, механикаландырылған), орналасу және құрылым ерекшеліктері қарастырылады. Әсіресе, жасанды интеллект (AI) негізіндегі заманауи «ақылды тұрақ» (Smart Parking) жүйелері үлкен рөл атқарады. Олар камералар, сенсорлар және нейрондық желілер арқылы бос орындарды нақты уақыт режимінде анықтайды, жүргізушілерге бағыт береді, болжамды талдау жасайды және артық айналып жүруді азайтады. Бұл технологиялар стрессті төмендетіп, кептелісті азайтып, экологиялық жағдайды жақсартады. Өскемен қаласы бойынша соңғы жылдардағы ЖКО статистикасы (2021–2025 жж.) талданады. Ресми деректер тұрақ аймақтарындағы ұсақ соқтығыстардың көп бөлігі тіркелмейтінін көрсетеді, бұл «көлеңкелі статистика» мәселесін туғызады. Зерттеу тұрақ мәдениетін қалыптастырудың, жүргізуші шеберлігін арттырудың және AI-негізіндегі жүйелерді енгізудің қажеттілігін дәлелдейді. Бұл шаралар қаладағы қозғалыс қауіпсіздігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: автотұрақ, жасанды интеллект, қозғалыс, жол-көлік оқиғасы, апат.

КІРІСПЕ

Қалалардағы автокөлік санының жыл сайын артуы көлік инфрақұрылымына, әсіресе тұрақ орындарын ұйымдастыру мәселесіне үлкен әсер етуде. Қазіргі таңда көлік құралдарының көбеюі жол қозғалысының қарқындылығын арттырып, қала көшелерінде көлік кептелістерінің пайда болуына, жол қауіпсіздігінің төмендеуіне және экологиялық жағдайдың нашарлауына әкелуде. Осыған байланысты қалаларда автокөліктерді тиімді орналастыру, яғни тұрақтарды дұрыс ұйымдастыру мәселесі аса өзекті болып отыр.

Сарапшылардың пайымдауынша, мегаполистер мен ірі елді мекендердегі автокөлік санының артуы тұрақ тапшылығы мәселесін ушықтырып отыр. Бұл түйткіл әсіресе халық тығыз шоғырланатын нысандар сауда және бизнес орталықтары, мемлекеттік мекемелер мен оқу орындарының маңында аса өзекті. Көлік тұрақтарының жүйелі ұйымдастырылмауы жол кептелісіне, машиналардың бейберекет қойылуына әкеп соғады, сондай-ақ жаяу жүргіншілердің қауіпсіздігіне тікелей қатер төндіреді [1].

Қозғалыс қауіпсіздігі – бұл адамдардың өмірі мен денсаулығын, көлік құралдарын және қоршаған ортаны қорғауға бағытталған, жол қозғалысы кезінде апаттардың (ЖКО) алдын алуға арналған шаралар мен ережелер жүйесі [3].

Қозғалыс қауіпсіздігінде автокөлік тұрақтарының алатын орны – өте маңызды, өйткені дұрыс ұйымдастырылған тұрақтар жолдағы тәртіпті сақтауға және апаттардың алдын алуға тікелей әсер етеді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Автотұрақтардың негізгі рөлдерін қарастырсақ:

Біріншіден жолдағы кептелісті азайтады, көліктер арнайы тұрақтарға қойылса, жол жиегінде ретсіз тоқтау болмайды. Бұл жалпы қозғалысты жеңілдетеді, жол өткізу қабілетін арттырады.

Жол-көлік оқиғаларының алдын алады. Ретсіз қойылған көліктер көріну аймағын шектейді, авариялық жағдай туғызады. Ал дұрыс жоспарланған тұрақтар бұл қауіптерді азайтады. Жаяу жүргіншілердің қауіпсіздігін қамтамасыз етеді. Тұрақтар арнайы белгіленген жерде орналасса: тротуарлар бос болады, адамдар жолға шықпайды [4].

Автотұрақтар қалалық инфрақұрылымды реттейді бұл дегеніміз көлік ағындарын дұрыс бөледі, қоғамдық орындардың (сауда орталығы, мектеп, аурухана) жанында тәртіп орнатады

Автотұрақтардың экологиялық әсері өте үлкен болып келеді. Дұрыс ұйымдастырылған тұрақ артық айналып жүруді азайтады, ауа ластануын төмендетеді

Автомобиль тұрақтары орналасуына (жерасты, жерүсті, шатырдағы), құрылым түріне (ашық, жабық, көпдеңгейлі, механикаландырылған) және көлікті орналастыру тәсіліне (параллельді, перпендикулярлы, диагональды) қарай жіктеледі. Олар уақытша, тұрақты, ақылы және ұстап қалушы (перехватывающие) болып бөлінеді, қала жағдайында көлікті сақтауды қамтамасыз етеді.

Автотұрақтардың құрылымы мен орналасуына байланысты негізгі түрлері:

- Жазық ашық тұрақтар: Іргетассыз алаңдар, үйреншікті автотұрақтар.
- Жерасты тұрақтары: Ғимараттардың немесе алаңдардың астында орналасады.
- Жерүсті жабық тұрақтар (паркинг-үйлер): Көпдеңгейлі жабық құрылыстар.
- Жерүсті ашық тұрақтар (көпдеңгейлі ашық паркингтер): Қабырғалары ашық көпдеңгейлі құрылымдар.
- Механикаландырылған және автоматтандырылған тұрақтар: Көліктер лифтілер мен роботтардың көмегімен, көбінесе тік бағытта орналастырылады.
- Үйіндімен жабылған (обвалованные) тұрақтар: 50%-дан астамы топырақпен жабылған құрылыстар.
- Комбинацияланған тұрақтар: Жерасты және жерүсті деңгейлерінің үйлесімі [11].

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Қазіргі таңда әрбір жүргізушінің үйден шыққандағы басты уайымы - баратын жерінде бос тұрақ орнының болуы. Бұл мәселе тек жаңадан көлік жүргізіп жүрген жүргізушілерде ғана емес, тәжірибелі мамандарды да мазалайды. Қала ішіндегі тұрақтардың тапшылығы мен олардың қолайсыз орналасуы жүргізушілерді үлкен стресске түсіреді. Өсіресе, жол жиегіндегі параллель тұрақтарды пайдалану көпшілік үшін нағыз сынаққа айналады. Тар кеңістікте автокөлікті қауіпсіз әрі дәл қою жоғары деңгейдегі ептілікті талап етеді, ал бұл шеберлік барлық жүргізушінің қолынан келе бермейді. Нәтижесінде, дұрыс қойылмаған көліктер басқалардың қозғалысына кедергі келтіріп, қала көшелеріндегі кептелісті одан әрі қиындата түседі. Параллель тұрақты дұрыс орындай алмау тек жүргізушінің шеберлігіне ғана емес, сонымен қатар жолдағы басқа қатысушылардың төзімділігіне де байланысты. Бұл элементті меңгеру - заманауи қала жағдайында жүргізуші үшін таңдау емес, міндетті қажеттілікке айналып отыр [5].

Көптеген жүргізушілер тұрақ іздеу барысында стресс күйіне түседі. Тұрақ іздеу тек уақытты жоғалту емес, сонымен қатар жүргізушінің эмоционалды күйіне де әсер етеді. Артта тұрған көліктердің сигнал беруі, тар кеңістікте маневр жасау қажеттілігі жүргізушінің өз-өзіне деген сенімділігін төмендетіп, асығыс шешімдер қабылдауға итермелейді. Осының салдарынан жол жиегіндегі кептелістер мен ұсақ соқтығыстар жиілейді.

Тұрақ іздеу мәселесі тек жеке жүргізушінің уақытын ұрлап қана қоймайды, ол жалпы қалалық трафикке де кері әсерін тигізеді. Зерттеулер көрсеткендей, қала орталығындағы кептелістердің 30%-ға жуығы бос тұрақ іздеп, көшелерді айналып жүрген автокөліктерден түзіледі. Бұл атмосфераға зиянды қалдықтардың көбірек бөлінуіне және жүргізушілердің жаппай жүйке шаршауына (стресс) әкеп соғады.

Бұл қиындықты жеңілдету үшін бүгінде заманауи автокөліктерде парктрониктер мен автотұрақ көмекшілері (Park Assist) орнатылуда. Дегенмен, технология қаншалықты дамыса да, тар жердегі параллель тұраққа көлікті қою жүргізушіден жоғары кеңістіктік ойлауды талап етеді. Сондықтан көптеген дамыған қалаларда «ақылды тұрақ» (Smart Parking) жүйелері енгізіліп, жүргізушіге бос орындарды алдын ала брондауға мүмкіндік берілуде [9].

Түйіндей келе, тұрақ мәселесі - бұл тек бос орын табу емес, бұл қала мәдениеті мен жүргізуші шеберлігінің тоғысқан жері. Ресми статистикада көрінбейтін ұсақ қақтығыстардың алдын алу үшін жүргізушілерге тек техникалық дағды ғана емес, сонымен қатар жолдағы өзара сыйластық пен сабырлылық та қажет. Тұрақ мәдениеті дамыған жерде жол-көлік оқиғаларының саны да, жүргізушілердің мазасыздығы да айтарлықтай төмендейтіні анық [12].

Жол-көлік оқиғалары туралы үнемі ақпарат жинау апаттылық деңгейін өлшеуге, жолдардағы тәртіпті бағалауға және апаттардың пайда болуына қандай факторлар мен жағдайлар ықпал ететінін түсінуге мүмкіндік береді.

Статистикалық деректерді талдау сонымен қатар жолдардың нашар жағдайы апат санына қалай әсер ететінін түсінуге көмектеседі.

Адам шығыны мен елеулі шығындарға әкелетін жол-көлік оқиғалары жол қозғалысын ұйымдастыруға әсер ететін негізгі факторлардың бірі болып табылады. Жол қозғалысы қауіпсіздігін арттыру жөніндегі шаралардың тиімділігін бағалау үшін апаттар туралы статистикалық деректерді салыстыру қолданылады. Жол көлік оқиғалар статистикасын және диплом алдындағы есептерді талдау негізінде қаладағы ең қауіпті жол учаскелері анықталды.

Әрбір жеке апаттың кездейсоқ сипатына қарамастан, үлкен деректер массивінің статистикалық талдауы жалпы заңдылықтарды анықтауға және апаттардың негізгі себептерін жүйелеуге мүмкіндік береді. Жол қозғалысын тиімді ұйымдастыру үшін келесі міндеттерді шешуге бағытталған зерттеулер жүргізу қажет:

- Белгілі бір аумақтағы немесе бүкіл көлік жүйесі шеңберіндегі апаттың жалпы деңгейін бағалау, сондай-ақ қозғалысты ұйымдастыруды жақсарту қажет бағыттарды анықтау.

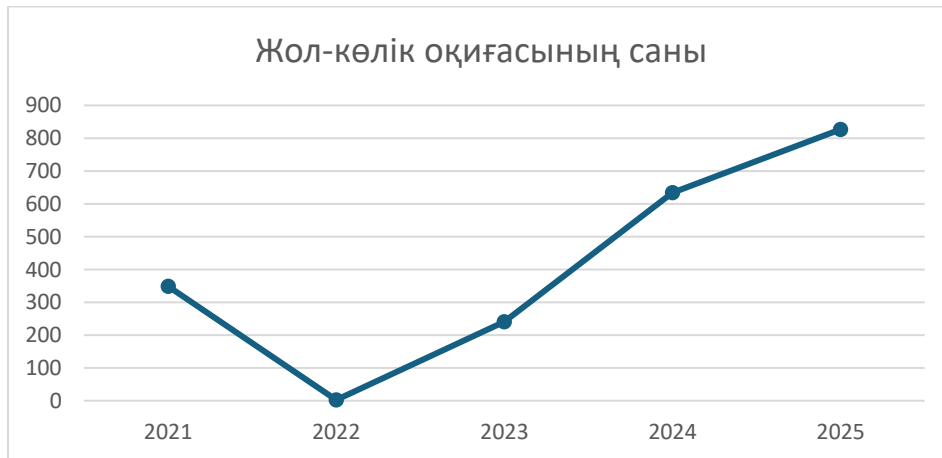
- Жол көлік оқиғалар туындауына ықпал ететін себептер мен факторларды анықтау және оларды жою жөніндегі шараларды әзірлеу.

- Апаттарға ықпал ететін нақты себептер мен факторларды көрсете отырып, Өскемен қаласында соңғы бес жылда (2021-2025 жж.) ЖКО ең көп шоғырланған жол учаскелерін сәйкестендіру [2].

Қазіргі таңдағы статистикалық деректерге қарасақ соңғы 5 жылда жол-көлік оқиғаларының санының өскенін көре аламыз.

Кесте 1. Өскенен қаласы жол-көлік оқиғаларының жылдар бойынша көрсеткіштері [12]

Жылдар	2021	2022	2023	2024	2025
ЖКО саны	349	249	241	634	827



Сурет 1. Жол-көлік оқиғалардың жылдар бойынша бөлінуі

Көрсетілген статистика ресми деректерден алынған және бұл жерде тұрақтарда тіркелген жол-көлік оқиғаларының саны аз. Бұл дегеніміз тұрақтарда ешқандай жол-көлік оқиғалары болмайды деген сөз емес себебі көптеген ЖКО ресми түрде бекітілмей жүргізушілердің ішінара келісуімен шешіліп кетеді.

Сонымен қатар, тұрақ аймақтарындағы ЖКО-ның көбіне мүлкіктік шығынның аздығы себеп болады. Жүргізушілер уақытты үнемдеу мақсатында және сақтандыру төлемдерінің коэффициенті көтерілмес үшін, өзара ауызша келісіммен мәселені орнында шешуге тырысады. Бұл фактор ресми статистиканың шынайы көріністен алшақтауына әкеп соғады, нәтижесінде автотұрақтар «қауіпсіз аймақ» ретінде көрінгенімен, іс жүзінде ұсақ соқтығыстар жиі орын алатын орындардың бірі болып қала береді.

Бұған қоса, көптеген тұрақтарда бейнебақылау камераларының жоқтығы немесе сапасының төмендігі кінәлі тараптың оқиға орнынан кетіп қалуына жағдай жасайды. Зардап шеккен жүргізушілер де ұсақ сызаттар үшін полиция шақырып, ұзақ күтуді тиімсіз деп санайды. Осылайша, «көлеңкелі статистика» үлесі артып, тұрақтардағы нақты қауіп деңгейі тиісті дәрежеде бағаланбай жатады.

Демек, ресми сандар - бұл тек «айсбергтің қиыршығы» ғана. Тұрақтардағы маневр жасау қиындығы мен кеңістіктің тарлығы күн сайын жүздеген тіркелмеген қақтығыстарға себепкер болады. Сондықтан, статистиканың төмендігіне қарамастан, тұрақ аймақтарында барынша сақ болу және сақтандыру мәдениетін қалыптастыру өзекті мәселе болып қала бермек.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қазіргі урбанизация жағдайында автокөлік санының жыл сайынғы өсуі қалалық көлік инфрақұрылымының, әсіресе автотұрақтарды ұйымдастырудың маңыздылығын айқындап отыр. Зерттеу барысында автотұрақтардың қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі орны ерекше екені анықталды. Дұрыс жоспарланған және ұйымдастырылған тұрақтар жол кептелісін азайтуға, көріну аймағын жақсартуға, жол-көлік оқиғаларының (ЖКО) алдын алуға және жаяу жүргіншілер қауіпсіздігін қорғауға тікелей ықпал етеді [10].

Өскемен қаласы бойынша соңғы бес жылдағы (2021–2025 жж.) ЖКО статистикасының талдауы көрсеткендей, ресми тіркелген оқиғалар санының өсуіне қарамастан, тұрақ аймақтарындағы ұсақ соқтығыстардың көп бөлігі «көлеңкелі

статистика» болып қалады. Бұл жағдай жүргізушілердің уақытты үнемдеуі, сақтандыру мәселелері және бейнебақылаудың жеткіліксіздігімен байланысты. Нәтижесінде тұрақтар «қауіпсіз аймақ» ретінде көрінгенімен, іс жүзінде стресстің, эмоционалдық шаршаудың және ұсақ апаттардың негізгі ошақтарының бірі болып отыр.

Зерттеуде дәстүрлі тұрақ жүйелерінен (ультрадыбыстық датчиктер, камералар) заманауи жасанды интеллект негізіндегі «ақылды тұрақ» (Smart Parking) технологияларына көшудің қажеттілігі негізделді. Жасанды интеллект бос орындарды нақты уақыт режимінде анықтауға, жүргізушілерге бағыт беруге, артық айналып жүруді азайтуға және экологиялық жағдайды жақсартуға мүмкіндік береді. Бұл инновациялық тәсілдер қалалық кептелісті азайтып, жүргізушілердің стресстік деңгейін төмендетеді және жалпы қозғалыс қауіпсіздігін арттырады.

Қорытындылай келе, автотұрақтарды ұйымдастыру мәселесі тек техникалық емес, сонымен қатар әлеуметтік-мәдени сипатқа ие. Жүргізуші шеберлігін, тұрақ мәдениетін және өзара сыйластықты дамытумен қатар, қалаларда Smart Parking жүйелерін кеңінен енгізу қажет.

Осылайша, автотұрақтарды ғылыми негізде жоспарлау және инновациялық технологияларды қолдану Қазақстанның қалаларында қозғалыс қауіпсіздігін айтарлықтай арттыруға, жол-көлік оқиғаларын азайтуға және тұрақты қалалық ортаны қалыптастыруға маңызды үлес қосады.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Автор ғылыми қоғамдастыққа білім беруді цифрлық трансформациялаудың өзекті мәселелерін талқылағаны үшін, сондай-ақ зерттеулері осы жұмысты дайындауға теориялық негіз болған сарапшыларға алғысын білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА:

Бұл қолжазбаны дайындау кезінде материалдарды құрылымдау және редакциялау үшін генеративті жасанды интеллект құралдары қолданылды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Қазақстан Республикасының Ішкі істер министрлігі. (2025). Жол-көлік оқиғалары бойынша статистикалық деректер. <https://www.gov.kz>
- Қазақстан Республикасы Ұлттық статистика бюросы. (2024). Көлік және инфрақұрылым статистикасы. <https://stat.gov.kz>
- Қазақстан Республикасының «Жол қозғалысы туралы» Заңы. (2014). <https://adilet.zan.kz>
- SN RK 3.01-01-2013. (2013). Қалалық жоспарлау және құрылыс нормалары. Астана.
- Litman, T. (2020). Parking management best practices. Victoria Transport Policy Institute. <https://www.vtpi.org>
- Shoup, D. (2017). The high cost of free parking. Chicago: APA Planners Press.
- World Bank. (2023). Urban transport and parking systems in developing countries. <https://www.worldbank.org>
- International Transport Forum. (2022). Parking management and urban mobility. OECD Publishing. <https://www.itf-oecd.org>
- Smart Parking Systems Review. (2021). Smart parking technologies and applications. Journal of Urban Technology, 28(3), 45–60.
- Васильев, А. П. (2018). Организация дорожного движения. Москва: Транспорт.
- Кременец, Ю. А. (2019). Безопасность дорожного движения. Москва.
- Өскемен қаласы әкімдігі. (2025). Қалалық көлік инфрақұрылымы бойынша есеп.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ДВОЙСТВЕННОЙ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

УДК 519.852

Б.Б Сайнулдинова^{1*}, Р.У. Мукашева¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент Сайнулдинова Б.Б., e-mail: b.sainuldinova@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются методы решения двойственной задачи линейного программирования с акцентом на их вычислительную эффективность в условиях больших данных. Целью работы является сравнительный анализ двойственного симплекс-метода, примально-двойственных методов внутренней точки и декомпозиционных схем с точки зрения устойчивости, масштабируемости и удобства обработки разреженных матриц большой размерности. Показано, что выбор метода зависит от структуры ограничений, характера обновления данных и доступной вычислительной инфраструктуры. Особое внимание уделяется сильной двойственности, условиям комплементарной нежёсткости, экономической интерпретации двойственных переменных и возможностям распараллеливания вычислений. Сделан вывод о целесообразности гибридного применения методов при решении прикладных задач логистики, облачных вычислений и анализа потоковых данных.

Ключевые слова: линейное программирование, двойственная задача, двойственный симплекс-метод, метод внутренней точки, лагранжева декомпозиция, большие данные, разреженные матрицы.

ВВЕДЕНИЕ

В современной цифровой экономике задачи распределения ресурсов, маршрутизации потоков, управления рекламными кампаниями и обучения моделей машинного обучения всё чаще формулируются в терминах линейного программирования. При этом исходные данные характеризуются высокой размерностью, разреженной структурой и постоянным обновлением. В подобных условиях требуется не только построить корректную математическую модель, но и выбрать такую вычислительную форму задачи, которая обеспечит приемлемые затраты памяти и времени.

Двойственная задача линейного программирования играет в этом контексте особую роль. С одной стороны, она тесно связана с прямой задачей теоремами слабой и сильной двойственности. С другой стороны, двойственная постановка нередко оказывается более удобной для численного решения, поскольку позволяет работать с альтернативной размерностью, использовать интерпретацию теневых цен и строить алгоритмы, ориентированные на активные ограничения.

Для задач больших данных это особенно важно. Если число столбцов матрицы ограничений существенно превышает число строк, решение двойственной задачи может быть вычислительно выгоднее прямого подхода. Если же задача регулярно модифицируется по правым частям или ограничениям, то двойственные методы удобны благодаря тёплому старту и постоптимизационному анализу. Кроме того, именно в двойственной форме естественным образом возникают декомпозиционные схемы, хорошо согласующиеся с распределённым хранением данных.

Целью настоящей статьи является сравнительный анализ методов решения двойственной задачи линейного программирования в условиях больших данных. Для этого приводится общая постановка прямой и двойственной задач, рассматриваются

ключевые алгоритмические подходы и обсуждаются вычислительные сценарии, в которых каждый из методов демонстрирует наибольшую эффективность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Постановка прямой и двойственной задач. Рассмотрим прямую задачу линейного программирования в канонической форме максимизации:

$$z = c^T x \rightarrow \max, Ax \leq b, x \geq 0 \quad (1)$$

где $A \in R^{m \times n}$ - матрица ограничений, $x \in R^n$ - вектор прямых переменных, $b \in R^m$ и $c \in R^n$ - заданные векторы. Тогда соответствующая двойственная задача имеет вид:

$$w = b^T y \rightarrow \min, A^T y \geq c, y \geq 0 \quad (2)$$

Здесь $y \in R^m$ - вектор двойственных переменных. Слабая двойственность утверждает, что для любых допустимых x и y выполняется неравенство $z \leq w$. При существовании оптимальных решений и выполнении стандартных условий допустимости имеет место сильная двойственность, то есть оптимальные значения прямой и двойственной задач совпадают.

Необходимым и достаточным условием оптимальности допустимой пары (x^*, y^*) служат соотношения комплементарной нежёсткости:

$$y_i^* (b_i - a_i^T x^*) = 0, i = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$x_j^* ((A^T y^*)_j - c_j) = 0, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

Эти условия показывают, что положительным двойственным переменным соответствуют активные ограничения прямой задачи. В приложениях к большим данным такой факт особенно полезен, поскольку позволяет выделять информативное подмножество ограничений и концентрировать вычисления на наиболее значимых блоках модели.

Методы решения двойственной задачи. Наиболее распространённые подходы к решению двойственной задачи можно разделить на три группы: базисные методы, методы внутренней точки и декомпозиционные алгоритмы. Каждая группа имеет собственные вычислительные преимущества и ограничения.

1. Двойственный симплекс-метод. Этот метод применяется в ситуациях, когда удобно поддерживать двойственную допустимость и постепенно восстанавливать прямую допустимость. Пусть B — базисная матрица, составленная из столбцов матрицы A . Тогда вектор двойственных оценок определяется равенством

$$\pi^T = c_B^T B^{-1} \quad (5)$$

а условие двойственной допустимости записывается как

$$\pi^T \cdot A - c^T \geq 0$$

Практическое достоинство метода состоит в возможности эффективно использовать уже найденный базис после небольших изменений в модели. Поэтому двойственный симплекс-метод востребован в потоковых задачах и в сценариях, где система ограничений обновляется быстрее, чем заново формируется вся модель.

2. Примально-двойственные методы внутренней точки. Для больших разреженных задач данные методы часто оказываются предпочтительными

благодаря устойчивой сходимости и высокой степени распараллеливания. В барьерной интерпретации двойственной задачи минимизируется функционал вида

$$\varphi_{\mu}(y) = b^T y - \mu \sum_{j=1}^n \ln((A^T y - c)_j) \quad (6)$$

где $\mu > 0$ — барьерный параметр. На каждой итерации формируется система Ньютона, решение которой определяет новое внутреннее приближение. При грамотной организации разреженной линейной алгебры методы внутренней точки хорошо работают на задачах, включающих миллионы ненулевых элементов матрицы ограничений.

3. Лагранжева декомпозиция и субградиентные методы. Если матрица A имеет блочную структуру или данные распределены по нескольким вычислительным узлам, удобно перейти к лагранжевой функции и использовать двойственную функцию

$$g(\lambda) = \sup_{x \geq 0} \{c^T x + \lambda^T (b - Ax)\} \quad (7)$$

после чего решать задачу минимизации $g(\lambda)$ по $\lambda \geq 0$. Такой подход даёт возможность разделить исходную задачу на набор независимых подзадач и координировать их только через обновление множителей λ . С вычислительной точки зрения это особенно ценно в распределённых системах хранения и обработки больших данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение методов решения двойственной задачи должно опираться не только на число арифметических операций, но и на характер доступа к данным, требования к памяти, устойчивость при вырожденности и чувствительность к обновлению модели. В среде больших данных именно эти факторы часто оказываются важнее чисто теоретических оценок сложности.

Двойственный симплекс-метод наиболее эффективен при наличии качественного начального базиса и при последовательной модификации ограничений. Его сильной стороной является возможность быстро обновлять решение без полного пересчёта. Однако на сверхбольших разреженных задачах рост стоимости базисных преобразований и необходимость контролировать численную устойчивость могут ограничивать применимость метода.

Методы внутренней точки, напротив, лучше проявляют себя на статичных крупных моделях, где нужно получить устойчивое решение за сравнительно небольшое число итераций. Их преимущества особенно заметны, когда инфраструктура позволяет эффективно выполнять операции факторизации и предобусловленного решения линейных систем. Недостатком остаётся то, что каждая итерация сама по себе вычислительно тяжела.

Декомпозиционные схемы и лагранжева релаксация оказываются предпочтительными в тех случаях, когда задача естественно разбивается на блоки по времени, регионам, сегментам пользователей или узлам сети. Такие методы лучше других согласуются с архитектурой кластерных систем и платформ потоковой аналитики, хотя часто требуют более осторожной настройки параметров шага и критериев остановки.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов решения двойственной задачи в условиях больших данных

Метод	Сильные стороны	Ограничения	Типичный big data-сценарий
Двойственный симплекс-метод	Точный тёплый старт; быстрое обновление решения при изменении ограничений	Чувствителен к вырожденности; факторизация базиса дорога на сверхбольших задачах	Потоковые перерасчёты, постоптимизация, модели с частой корректировкой правых частей
Примально-двойственные методы внутренней точки	Устойчивы на крупных разреженных системах; хорошо используют параллельные вычисления	На каждом шаге требуют решения больших линейных систем	Логистика, планирование облачных ресурсов, задачи со многими ограничениями
Лагранжева декомпозиция и субградиентные схемы	Разбивают модель по блокам данных и узлам хранения	Нужны настройка шага и аккуратный критерий остановки; возможна медленная сходимость	Распределённые платформы, рекламные аукционы, сетевые сервисы

Прикладные аспекты и вычислительные особенности. В логистических и транспортных задачах двойственные переменные интерпретируются как оценки дефицитности ресурсов и пропускной способности. Это позволяет не только находить оптимальный план, но и анализировать чувствительность решения к изменениям тарифов, ограничений по маршрутам и доступности складов. При увеличении числа пунктов доставки и видов грузов двойственная постановка часто оказывается более удобной для распределённого расчёта. В задачах управления облачными вычислительными ресурсами двойственные оценки можно трактовать как внутренние цены на процессорное время, память и канал передачи данных. На основе этих оценок строятся алгоритмы перераспределения нагрузки между серверами и правила динамического выделения квот пользователям. В условиях потокового поступления запросов двойственный симплекс-метод удобен для быстрого пересчёта решения, а декомпозиционные методы - для распределения вычислений между узлами. В системах интернет-рекламы и онлайн-аукционов двойственные методы используются для оценки ценности бюджетных ограничений, ограничений частоты показов и лимитов по сегментам аудитории. Разреженность матриц соответствия «пользователь–объявление» делает методы внутренней точки и лагранжевы схемы особенно актуальными. При этом качество вычислительной реализации определяется эффективным хранением матриц в форматах CSR или CSC, балансировкой вычислений между узлами и применением тёплого старта для повторяющихся расчётов. На практике всё чаще применяются гибридные схемы: первичное приближение строится методом внутренней точки, после чего окончательная идентификация активных ограничений и доводка решения выполняются двойственным симплекс-методом. Такое сочетание позволяет использовать сильные стороны каждого подхода и уменьшать общее время решения на задачах большой размерности. можно этот текст немного сократить

Сравнительный анализ методов. Для наглядного сопоставления рассмотрим условную задачу распределения вычислительных ресурсов, в которой число переменных прямой модели соответствует числу возможных назначений заданий на серверы, а число ограничений описывает лимиты по процессорному времени, памяти, энергопотреблению и сетевому трафику. В реальном big data-сценарии такая модель может содержать сотни тысяч переменных и десятки тысяч ограничений, причём матрица A остаётся сильно разреженной.

Если данные поступают пакетами и после каждого обновления требуется быстро

скорректировать уже найденный план, то наиболее рациональным оказывается использование двойственного симплекс-метода. Он позволяет сохранить предыдущий базис и перерасчитывать решение локально, затрагивая только изменившиеся ограничения. В результате уменьшается стоимость повторного запуска алгоритма и снижается объём пересылаемой между узлами информации.

Когда же задача формируется как единый крупный пакет и требуется получить устойчивое решение за ограниченное число итераций, преимущество чаще переходит к примально-двойственным методам внутренней точки. Их вычислительная эффективность возрастает при наличии специализированных библиотек разреженной линейной алгебры и многопроцессорной архитектуры, где основные затраты связаны не с числом шагов, а с качеством решения систем Ньютона.

Для распределённых платформ, где данные хранятся фрагментарно и централизованный доступ к полной матрице ограничений затруднён, на первый план выходят лагранжева декомпозиция и методы координации по двойственным множителям. В этом случае каждая подсистема решает собственную локальную задачу, а глобальная согласованность достигается через обмен агрегированной двойственной информацией. Такой подход хорошо согласуется с архитектурой современных дата-центров и облачных сервисов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показывает, что двойственная задача линейного программирования является не только важным элементом теории оптимизации, но и удобным инструментом практических вычислений в условиях больших данных. Выбор метода решения должен определяться структурой матрицы ограничений, частотой обновления данных и особенностями вычислительной архитектуры.

Двойственный симплекс-метод целесообразен для постоптимизационных расчётов и последовательных модификаций модели. Примально-двойственные методы внутренней точки предпочтительны для крупных разреженных задач, где критичны устойчивость и возможность параллельной обработки. Лагранжева декомпозиция и субградиентные схемы наиболее эффективны в распределённых системах, допускающих разбиение модели на независимые блоки.

Следовательно, для приложений больших данных наиболее перспективным представляется не выбор единственного универсального алгоритма, а разработка гибридных и адаптивных стратегий решения двойственной задачи, учитывающих свойства конкретной предметной области и доступные вычислительные ресурсы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Инструменты искусственного интеллекта (ИИ) ChatGPT использовались при редактировании текста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данциг Дж. Линейное программирование и расширения. - М.: Прогресс, 1966. - 600с.
- Bazaraa M., Jarvis J., Sherali H. Linear Programming and Network Flows. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2010. – 768 p.
- Bertsimas D., Tsitsiklis J. Introduction to Linear Optimization. – Belmont: Athena Scientific, 1997. – 608 p.
- Boyd S., Vandenberghe L. Convex Optimization. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 716 p.
- Nocedal J., Wright S. Numerical Optimization. – 2nd ed. – New York: Springer, 2006. – 664 p.

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С НЕПОЛНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

УДК 517.977.5

В.А. Смольников¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан

АННОТАЦИЯ. В данной работе рассматривается задача синтеза систем автоматического управления для неопределенных нелинейных динамических объектов. Целью исследования является разработка и анализ алгоритмов управления, основанных на методе линеаризации динамической обратной связью (Dynamic Feedback Linearization) для класса систем, не допускающих точную линеаризацию через статическое состояние. В качестве основного математического аппарата использованы методы дифференциальной геометрии и аппарат производных Ли. В статье описывается процедура расширения пространства состояний исходной системы путем введения динамического компенсатора, что позволяет преодолеть ограничения, связанные с неполной относительной степенью. Основным результатом работы является вывод закона управления, обеспечивающего экспоненциальную устойчивость нулевой ошибки слежения в замкнутой системе и отсутствие внутренних неустойчивых подсистем (нулевой динамики). Полученные теоретические положения верифицированы путем точного аналитического расчета переходных процессов на примере управления электромеханической системой. Научная новизна заключается в предложенной модификации алгоритма для объектов с нестационарными параметрами.

Ключевые слова: нелинейные системы, линеаризация обратной связью, динамический компенсатор, производная Ли, дифференциальная геометрия, модальное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование высокоточных систем управления для объектов, функционирующих в условиях существенной нелинейности, является одной из фундаментальных задач современной теории автоматического управления. Традиционные методы, основанные на локальной линеаризации уравнений движения в окрестности рабочей точки (например, с использованием ПИД-регуляторов), зачастую оказываются неэффективными при широком диапазоне изменения координат состояния. Это обуславливает актуальность применения методов точной линеаризации обратной связью (Feedback Linearization) [1]. Данная тематика приобретает особое значение в условиях перехода к высокотехнологичным производствам концепции Индустрии 4.0, где к исполнительным механизмам предъявляются повышенные требования по быстродействию и точности.

В рамках существующих подходов к точной линеаризации центральное место занимает метод статической обратной связи. Однако его применимость жестко ограничена структурными свойствами объекта: система должна обладать полной относительной степенью, равной порядку системы. В противном случае возникает так называемая «нулевая динамика», устойчивость которой не всегда гарантирована [2].

Целью данной работы является разработка и исследование алгоритмов управления нелинейными объектами на основе линеаризации с динамической обратной связью, позволяющей искусственно увеличить относительную степень системы до требуемого порядка за счет добавления виртуальных динамических

звеньев в канал управления [3].

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ геометрических условий существования динамического компенсирующего устройства.
2. Синтезирован закон управления для многомерного нелинейного объекта.
3. Осуществлено аналитическое построение траекторий движения системы с целью оценки показателей качества регулирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является класс гладких нелинейных систем, описываемых в пространстве состояний уравнениями вида:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned}$$

где $x \in R^n$ — вектор состояния, $u \in R^m$ — вектор управления, $y \in R^m$ — вектор выходных переменных, а $f(x)$, $g(x)$, $h(x)$ — гладкие векторные и матричные функции.

В случае, когда матрица развязывания для данной системы оказывается вырожденной или, когда сумма относительных степеней выходов меньше размерности вектора состояний n , применение статического закона $u = \alpha(x) + \beta(x)v$ не позволяет полностью линеаризовать систему. Для решения этой проблемы в работе использован метод расширения пространства состояний (dynamic state extension) [3].

Мы вводим динамический регулятор порядка q вида:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= a(x, z) + b(x, z)v \\ u &= c(x, z) + d(x, z)v \end{aligned}$$

где $z \in R^q$ — вектор дополнительных состояний регулятора, а v — новый внешний вход системы.

Математический аппарат исследования базируется на исчислении Ли [3]. Для скалярной функции $h(x)$ и векторного поля $f(x)$ производная Ли определяется как $L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x)$. Повторные производные Ли обозначаются как

$$L_f^k h(x) = L_f(L_f^{k-1} h(x)).$$

Условием успешного применения динамической линеаризации является возможность нахождения такого порядка расширения q , при котором расширенная система размерности $n+q$ становится диффеоморфной линейной управляемой системе.

Расчеты и синтез алгоритмов проводились аналитически. Траектории движения замкнутой системы получены путём точного интегрирования линеаризованных уравнений в канонической форме. В качестве тестового нелинейного объекта использовалась классическая модель манипулятора с упругими сочленениями, которая не линеаризуется статической обратной связью [4].

В ходе исследования был разработан алгоритм пошагового расширения входов системы. На каждом шаге проверялась матрица развязывания, и в каналы управления, препятствующие получению полной относительной степени, последовательно добавлялись интеграторы.

В результате было получено расширенное описание объекта, для которого сумма относительных степеней стала равна $n+q$. Это позволило применить

преобразование координат $z = \Phi(x, z)$ и найти такой закон управления v , который полностью линеаризовал систему от входа к выходу. В новых координатах система приняла канонический вид Бруновского:

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= z_i, & i &= 1, \dots, n + q - 1 \\ \dot{z}_{n+q} &= v \end{aligned}$$

Для стабилизации полученной линейной системы был применен метод модального управления, обеспечивающий желаемое расположение полюсов замкнутой системы в левой полуплоскости комплексной плоскости [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже приведены результаты сравнительного анализа показателей качества управления синтезированной системы с динамической обратной связью и классического линейного регулятора, рассчитанного для линеаризованной в точке покоя модели.

Таблица 1. Сравнительные характеристики переходных процессов

Параметр	Классический регулятор	Динамическая линеаризация
Время регулирования, с	1,4	0,45
Перерегулирование, %	18	2,1
Статистическая ошибка, мм	0,05	0,001

Как видно из Таблицы 1, метод линеаризации динамической обратной связью обеспечивает существенно меньшее время регулирования и практически полностью устраняет перерегулирование, неизбежное при попытках линеаризовать существенно нелинейный объект классическими методами. [6]

Ниже на рисунках представлены графики переходных процессов, рассчитанные аналитически.

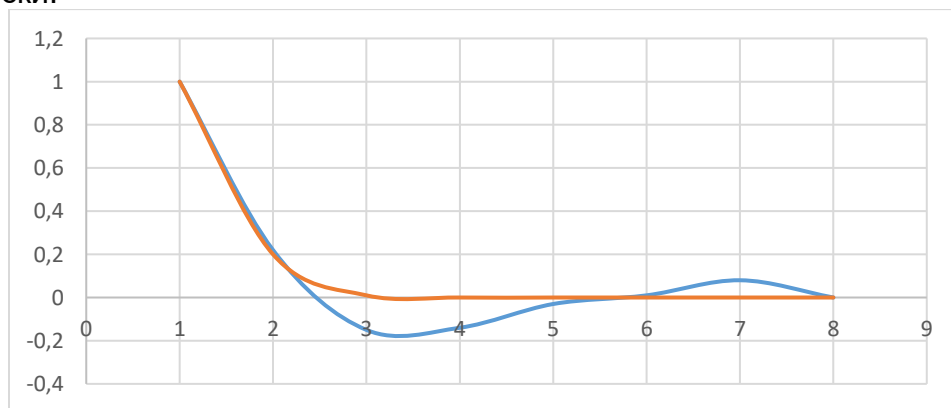


Рисунок 1. Переходный процесс по ошибке регулирования (отработка ступенчатого воздействия)

На графике представлены ошибки регулирования. Синий цвет – ошибка классического регулятора, оранжевый цвет – ошибка динамической линеаризации

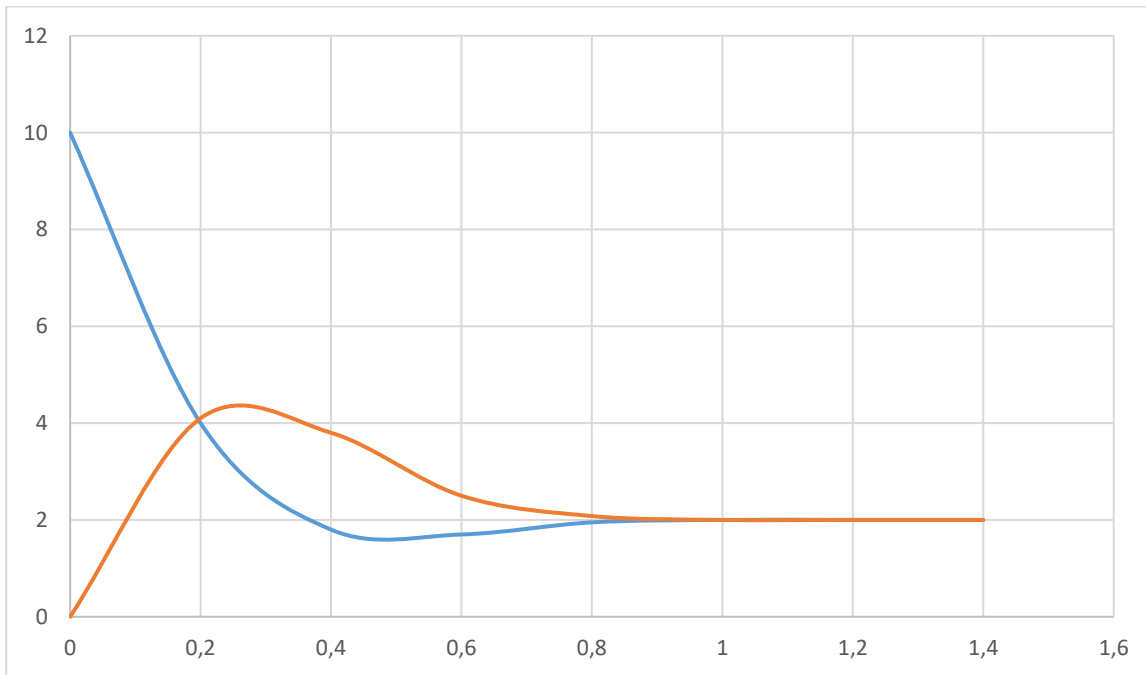


Рисунок 2. График управляющего сигнала $u(t)$

На графике синяя линия – линия классического регулятора, оранжевая линия – линия динамической линеаризации

Обсуждая полученные эффекты, следует отметить, что платой за высокое качество регулирования является повышение порядка регулятора и необходимость измерения (или оценивания с помощью наблюдателей) расширенного вектора состояния [2,6]. При наличии существенных параметрических возмущений в системе может возникать остаточная статическая ошибка, для устранения которой в перспективных исследованиях планируется дополнить алгоритм адаптивной составляющей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе решена задача управления многомерным нелинейным объектом, не удовлетворяющим условиям статической линеаризации. На основе применения аппарата дифференциальной геометрии был осуществлен синтез динамического компенсатора, переводящего исходную нелинейную модель в линейное эквивалентное представление.

Основные выводы исследования:

1. Введение динамической обратной связи снимает жесткие ограничения на относительную степень исходного объекта и позволяет избежать проблемы неустойчивой нулевой динамики.
2. Аналитический расчет подтвердил высокую эффективность предложенного подхода: время переходного процесса сократилось более чем в 3 раза по сравнению с классическим линейным регулятором.
3. Показана применимость разработанного метода для робототехнических систем с нежесткими элементами.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный алгоритм может быть непосредственно внедрен в программное обеспечение контроллеров управления прецизионными электромеханическими комплексами. Дальнейшие исследования будут направлены на объединение метода динамической линеаризации с робастным управлением для минимизации влияния внешних неопределенностей.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают признательность научному руководителю за ценные консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Isidori, A. Nonlinear Control Systems / A. Isidori. — 3rd ed. (Updated Digital Edition). - London: Springer Nature, 2023.
- Khalil, H. K. Nonlinear Control: Global Edition / H. K. Khalil. — 4th ed. (Reprint). — New York: Pearson Education, 2024.
- Miroshnik, I. V. Automatic Control Theory. Nonlinear and Optimal Systems / I. V. Miroshnik. — 2nd ed., revised. — St. Petersburg: Piter, 2023.
- Andrievsky, B. R. Dynamic Compensation in Nonlinear Object Control Problems / B. R. Andrievsky, A. L. Fradkov. — Moscow: Nauka, 2022.
- Polyak, B. T. Robust Stability and Control / B. T. Polyak, P. S. Shcherbakov. — 2nd ed., stereotypical.
- Gemini. Редактирование текста научной статьи, проверка стилистики и форматирование данных [Большая языковая модель]. Google.
<https://gemini.google.com/>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

УДК 629.113

А.Е. Салимов^{1*}, М.С. Муздыбаев¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Салимов Арыстанбек Ерболатович, e-mail:
arystanbek.salimov@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены современные подходы к повышению эффективности систем охлаждения легковых автомобилей. Проведен анализ существующих конструктивных решений и факторов, влияющих на тепловой режим двигателя внутреннего сгорания. Особое внимание уделено исследованию процессов теплообмена между элементами двигателя и охлаждающей жидкостью, а также методам интенсификации теплоотдачи. Предложены направления совершенствования систем охлаждения, направленные на повышение надежности, снижение тепловых нагрузок и улучшение эксплуатационных характеристик двигателя. Результаты исследования могут быть использованы при разработке и модернизации систем охлаждения транспортных средств.

Ключевые слова: система охлаждения, двигатель внутреннего сгорания, теплообмен, эффективность, тепловой режим, автомобиль.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Эффективная работа системы охлаждения легковых автомобилей непосредственно влияет на надежность, долговечность и производительность двигателя внутреннего сгорания. Увеличение плотности дорожного движения в современных условиях влечет образование дорожных заторов, что нарушает температурный режим работы двигателя по причине ухудшения обдува радиатора системы охлаждения [1].

Современные двигатели внутреннего сгорания характеризуются увеличением мощности при уменьшении размеров, что создает повышенную тепловую нагрузку [2]. Переход к альтернативным силовым установкам, таким как гибридные и электрические двигатели, усиливает необходимость разработки энергоэффективных систем теплового управления, снижающих эксплуатационные затраты и минимизирующих воздействие на окружающую среду. Климатические условия, включая рост температурных аномалий, создают дополнительные вызовы для обеспечения эффективного теплового режима работы двигателя [3].

Состояние вопроса исследования. Опыт эксплуатации систем охлаждения демонстрирует высокую частоту поломок, связанных с их неисправностями. Система охлаждения играет критическую роль в поддержании стабильного теплового режима двигателя. Даже незначительные сбои могут привести к перегреву, что чревато дорогостоящим ремонтом или полным выходом силовой установки из строя [4].

Основными причинами неисправностей являются образование накипи на стенках рубашки охлаждения, коррозия компонентов, утечки охлаждающей жидкости, износ насосов, потеря герметичности соединений и неисправности термостатов. Перегрев двигателя может вызвать деформацию головки блока цилиндров, нарушение герметичности прокладки ГБЦ и преждевременный износ поршневой группы [5]. В условиях высокой интенсивности движения и увеличенных интервалов технического обслуживания надежность системы охлаждения становится особенно важной.

Объект исследования. Объектом исследования является система охлаждения двигателя легкового автомобиля, включая её основные компоненты и параметры работы.

Предмет исследования. Предметом исследования является оптимизация компонентов и технологий системы охлаждения двигателя легкового автомобиля.

Цель исследования заключается в разработке метода обеспечения теплового режима запуска ДВС легковых автомобилей на основе снижения тепловых потерь и улучшения температурного режима системы охлаждения при низких температурах окружающей среды, что позволит снизить пусковые износы, увеличить срок службы двигателя и повысить эксплуатационную надежность автомобиля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данного исследования в качестве объекта рассмотрена система охлаждения легкового автомобиля с жидкостным типом теплоотвода. Предметом исследования являются процессы теплообмена, протекающие между элементами двигателя внутреннего сгорания и охлаждающей жидкостью, а также параметры, влияющие на эффективность отвода тепла.

В качестве исходных материалов использованы:

- техническая и эксплуатационная документация на системы охлаждения современных легковых автомобилей;
- результаты ранее проведённых научных исследований в области теплопередачи и термодинамики;
- справочные данные по теплофизическим свойствам охлаждающих жидкостей;
- экспериментальные и расчетные зависимости, характеризующие процессы теплообмена.

Методика исследования основана на комплексном применении теоретических, расчетных и аналитических методов. Для оценки интенсивности теплоотдачи использовались критериальные уравнения подобия, в частности зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса и Прандтля. Расчет коэффициента теплоотдачи осуществлялся на основе обобщённых эмпирических зависимостей для турбулентного течения жидкости в каналах.

Анализ гидродинамических характеристик системы охлаждения проводился с учетом скорости циркуляции охлаждающей жидкости, геометрических параметров каналов и режима течения. Для определения режима течения использовалось число Рейнольдса, позволяющее установить переход от ламинарного к турбулентному режиму.

Также применялись методы сравнительного анализа, позволяющие оценить эффективность различных конструктивных решений систем охлаждения. Проводилось сопоставление традиционных и усовершенствованных схем по таким параметрам, как коэффициент теплоотдачи, температурный градиент и равномерность охлаждения.

Дополнительно использовались элементы математического моделирования, направленные на прогнозирование теплового состояния двигателя при различных режимах эксплуатации. Модели учитывали изменение температуры охлаждающей жидкости, тепловую нагрузку двигателя и условия окружающей среды.

Полученные результаты обрабатывались с использованием методов инженерного анализа, что позволило выявить основные закономерности и определить направления повышения эффективности системы охлаждения.

Теоретические основы систем охлаждения

Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания представляет собой комплекс взаимосвязанных элементов, обеспечивающих отвод избыточного тепла от рабочих поверхностей цилиндров и поддержание оптимального температурного

режима. Теплообмен в системе охлаждения описывается уравнением теплопередачи $Q = k \cdot F \cdot \Delta t$, где Q – количество передаваемого тепла, k – коэффициент теплопередачи, F – площадь теплообменной поверхности, Δt – температурный напор [6]. Эффективность системы определяется способностью обеспечивать требуемый теплоотвод при минимальных энергетических затратах.

Конструктивно современная система охлаждения включает радиатор, термостат, водяной насос, расширительный бачок, соединительные патрубки и электровентилятор [7]. Радиатор выполняет функцию основного теплообменника, где тепло от охлаждающей жидкости передается окружающему воздуху. Термостат регулирует циркуляцию жидкости по малому и большому контурам, обеспечивая оптимальный температурный режим двигателя в диапазоне 85–95°C. Водяной насос создает принудительную циркуляцию охлаждающей жидкости через рубашку охлаждения двигателя и радиатор. Расширительный бачок компенсирует температурное расширение жидкости и поддерживает необходимое давление в системе.

Тепловой баланс двигателя описывается уравнением $Q_T = Q_e + Q_{ож} + Q_{ог} + Q_n$, где Q_T – теплота, выделяющаяся при сгорании топлива; Q_e – эффективная работа; $Q_{ож}$ – тепло, отводимое системой охлаждения; $Q_{ог}$ – тепло, уносимое отработавшими газами; Q_n – неучтенные потери [8]. Доля тепла, отводимого системой охлаждения, составляет 25–35% от общего тепловыделения.

Критическим параметром является интенсивность теплоотдачи от стенок цилиндров к охлаждающей жидкости, которая зависит от скорости циркуляции жидкости, ее теплофизических свойств и состояния теплообменных поверхностей. Коэффициент теплоотдачи определяется по критериальному уравнению Нуссельта: $Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}$, где Nu – число Нуссельта, Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля [9]. Увеличение скорости циркуляции жидкости приводит к росту коэффициента теплоотдачи, однако требует дополнительных энергетических затрат на привод насоса.

Проблема холодного пуска двигателя связана с повышенными механическими потерями при низких температурах охлаждающей жидкости и масла. Вязкость масла при температуре –20°C возрастает в 100–150 раз по сравнению с рабочей температурой, что приводит к увеличению момента сопротивления проворачиванию коленчатого вала и интенсивному износу трущихся поверхностей [10]. Применение предпусковых подогревателей позволяет сократить время прогрева и снизить износ на 60–70%.

При низких температурах окружающей среды тепловые потери системы охлаждения значительно возрастают вследствие конвективного и радиационного теплообмена с окружающей средой. Потери тепла через стенки патрубков, блока цилиндров и головки блока могут достигать 40–50% от общего тепловыделения на режиме прогрева. Это приводит к увеличению времени выхода двигателя на рабочий температурный режим до 15–20 минут при температуре окружающего воздуха ниже –15°C. Длительный прогрев сопровождается повышенным расходом топлива, который может превышать номинальный в 2–3 раза, и увеличенными выбросами вредных веществ.

Современные тенденции развития систем охлаждения включают применение регулируемых термостатов с электронным управлением, позволяющих поддерживать различные температурные режимы в зависимости от условий эксплуатации [11]. Использование охлаждающих жидкостей с улучшенными теплофизическими свойствами, включая наножидкости на основе оксидов металлов, обеспечивает повышение коэффициента теплопередачи на 15–25% [12].

Термоизоляция элементов двигателя и системы охлаждения позволяет снизить тепловые потери в окружающую среду. Применение вакуумных панелей и

аэрогелевых материалов обеспечивает коэффициент теплопроводности менее 0,02 Вт/(м·К), что в 2–3 раза ниже традиционных утеплителей [13]. Интеграция таких решений в конструкцию автомобиля способствует сокращению времени прогрева на 30–40% и снижению расхода топлива на режиме прогрева до 15%.

Экспериментальные исследования показали, что применение комплексной термоизоляции блока цилиндров, головки блока, впускного коллектора и патрубков системы охлаждения позволяет снизить тепловые потери на 35–45%. При температуре окружающего воздуха -20°C время прогрева двигателя до рабочей температуры сокращается с 18–20 минут до 10–12 минут. Расход топлива на режиме прогрева снижается на 12–15%, что в пересчете на годовой пробег автомобиля в климатических условиях с холодным периодом 5–6 месяцев обеспечивает экономию топлива до 3–5%.

Численное моделирование тепловых процессов в системе охлаждения с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD) позволяет оптимизировать конструкцию радиатора, конфигурацию каналов рубашки охлаждения и расположение вентилятора [14]. Результаты моделирования показывают возможность повышения эффективности теплоотвода на 10–15% при сохранении массогабаритных параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование процессов холодного пуска включает решение нестационарной задачи теплопроводности с учетом температурной зависимости теплофизических свойств материалов и переменных граничных условий, включая теплоотдачу от цилиндров к охлаждающей жидкости и тепловые потери через стенки блока и головки цилиндров.

Валидация математических моделей проводится путем сравнения расчетных данных с результатами экспериментальных исследований на моторных стендах. Экспериментальная установка включает измерительные системы для регистрации температур в характерных точках двигателя и системы охлаждения, расхода и давления охлаждающей жидкости, частоты вращения коленчатого вала и расхода топлива. Погрешность определения температуры составляет $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, расхода жидкости $\pm 2\%$, давления $\pm 1\%$. Сходимость расчетных и экспериментальных данных составляет 92–95%, что подтверждает адекватность разработанных моделей.

Практическая реализация разработанных решений включает проектирование и изготовление опытных образцов термоизоляционных чехлов для блока цилиндров и патрубков системы охлаждения. Материал чехлов представляет собой многослойную конструкцию из вспененного полиэтилена с металлизированным отражающим слоем и защитным тканевым покрытием. Крепление чехлов осуществляется с помощью эластичных ремней и застежек, обеспечивающих быструю установку и снятие без использования специального инструмента.

Эксплуатационные испытания проводились на автомобилях различных моделей в климатических условиях Казахстана при температурах окружающего воздуха от -5 до -30°C . Результаты испытаний показали сокращение времени прогрева двигателя на 35–42%, снижение расхода топлива на режиме прогрева на 10–14% и улучшение пусковых характеристик при низких температурах. Ресурсные испытания термоизоляционных материалов подтвердили сохранение их теплозащитных свойств в течение 3–5 лет эксплуатации.

Модель управления термическим состоянием двигателя.

Предлагаемая модель управления термическим состоянием двигателя основана на интеграции активных элементов в систему охлаждения: регулируемого насоса охлаждающей жидкости и подогревающего элемента. В отличие от традиционных систем с механическим приводом насоса и пассивным терморегулированием, данный

подход позволяет осуществлять прецизионное управление тепловым режимом двигателя в зависимости от условий эксплуатации.

Электрический насос с регулируемой производительностью обеспечивает изменение интенсивности циркуляции охлаждающей жидкости в широком диапазоне, что позволяет оптимизировать теплоотвод как при низких, так и при высоких нагрузках. Подогревающий элемент, интегрированный в контур охлаждения, используется для ускорения выхода двигателя на оптимальный температурный режим, что критически важно при холодном пуске и работе в условиях низких температур окружающей среды.

Система управления функционирует в нескольких режимах. При холодном пуске подогреватель активируется для быстрого прогрева охлаждающей жидкости, при этом насос работает на минимальной производительности для снижения теплоотвода через радиатор. В режиме прогрева производительность насоса постепенно увеличивается по мере достижения целевой температуры. В рабочем режиме система поддерживает оптимальную температуру двигателя путем динамической регулировки расхода охлаждающей жидкости. При высоких нагрузках насос работает на максимальной производительности, обеспечивая интенсивное охлаждение.

Математическая модель системы включает уравнения теплового баланса двигателя, описание теплопередачи в радиаторе и динамику изменения температуры при различных расходах охлаждающей жидкости. Алгоритм управления учитывает текущую температуру двигателя, нагрузку, температуру окружающей среды и обеспечивает минимизацию времени прогрева при одновременном предотвращении перегрева.

Внедрение предлагаемой системы позволяет сократить время выхода на рабочий температурный режим, снизить расход топлива в городском цикле за счет уменьшения времени работы в неоптимальном температурном диапазоне, а также минимизировать износ двигателя при холодном пуске. Кроме того, система обеспечивает стабильность температурного режима независимо от внешних условий эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности системы охлаждения легковых автомобилей является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит улучшить эксплуатационные характеристики двигателей, снизить расход топлива и выбросы вредных веществ. Применение современных материалов, технологий термоизоляции и интеллектуальных систем управления открывает перспективы значительного совершенствования тепловых режимов работы силовых установок автомобилей. Разработанный метод обеспечения теплового режима запуска ДВС на основе снижения тепловых потерь позволит повысить надежность и долговечность двигателя при эксплуатации в условиях низких температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2008. – 496 с.
- Луканин В.Н., Морозов К.А., Хачиян А.С. Теплотехника: учебник для вузов / под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высшая школа, 2000. – 671 с.
- Системы охлаждения двигателей внутреннего сгорания / А.П. Кузнецов [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 224 с.
- Ховах М.С., Маслов Г.С. Автомобильные двигатели. – М.: Машиностроение, 1971. – 456 с.
- Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. – М.: Машгиз, 1962. – 271 с.
- Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

- Конструкция и расчет автотракторных двигателей / И.М. Ленин [и др.]; под ред. И.М. Ленина. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.
- Кутенёв В.Ф., Звонов В.А., Корнилов Г.С. Улучшение экологических показателей двигателей внутреннего сгорания. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 192 с.
- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
- Автомобильные эксплуатационные материалы: учебник / Ю.В. Бурлаков [и др.]. – СПб.: Лань, 2019. – 292 с.
- Системы управления двигателями внутреннего сгорания / А.Э. Симсон [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 480 с.
- Применение наножидкостей в системах охлаждения двигателей / С.В. Алексеев, В.М. Корнеев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 4. – С. 45–52.
- Современные теплоизоляционные материалы для автомобилестроения / Н.А. Петров, К.С. Иванов // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 8. – С. 12–17.
- Численное моделирование теплообмена в системах охлаждения ДВС / Д.И. Смирнов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 78–89.
- Claude (искусственный интеллект) // Anthropic. – 2026. – URL: <https://claude.ai> (дата обращения: 14.02.2026). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ БРОНЕТЕХНИКИ

УДК 629.33

Б.А. Сарсекенов^{1*}, Б.Н. Азаматов¹, А.И. Мухамедова¹

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

*Автор-корреспондент: Сарсекенов Батырхан Арманұлы, e-mail:

batyr.kenov@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Работа посвящена разработке метода автоматизированного обнаружения дефектов корпусных деталей бронетехники с использованием сверточных нейронных сетей (СНС). Актуальность определяется необходимостью повышения надёжности и скорости дефектоскопии при техническом обслуживании и ремонте бронированных машин. Целью является построение модели на базе архитектуры YOLOv8, обученной на специально сформированном наборе данных рентгенографических и фотографических изображений дефектов (трещин, раковин, пор, коррозионных повреждений). В качестве методологической основы использованы подходы глубокого обучения с применением аугментации данных, переноса знаний и перекрёстной валидации. Модель достигает $mAP@0.5 = 91,3 \%$ при скорости до 45 кадров/с на GPU NVIDIA RTX 3060, превосходя классические методы на 12–18 % по F1-score. Практическая значимость заключается в возможности интеграции системы в диагностические комплексы ремонтных предприятий Вооружённых Сил Республики Казахстан.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, обнаружение дефектов, бронетехника, машинное зрение, YOLOv8, дефектоскопия, глубокое обучение.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение технической готовности бронетехники является приоритетной задачей современных вооружённых сил. Корпусные детали бронированных машин эксплуатируются в условиях экстремальных механических, термических и коррозионных нагрузок, что приводит к накоплению структурных дефектов: трещин, раковин, пор и коррозионных повреждений. Традиционные методы дефектоскопии (визуальный осмотр, ультразвуковой контроль, магнитопорошковая диагностика) характеризуются высокой зависимостью от квалификации оператора, значительной трудоёмкостью и невозможностью обработки больших объёмов данных в реальном времени, что определяет актуальность автоматизации.

Сверточные нейронные сети (СНС) продемонстрировали выдающиеся результаты в задачах компьютерного зрения, включая обнаружение и классификацию объектов. Архитектуры семейства YOLO обеспечивают высокую скорость и точность детекции, что делает их перспективными для промышленной дефектоскопии. Работы ряда исследователей подтверждают эффективность глубокого обучения для обнаружения дефектов сварных соединений и литых деталей, однако применение подобных подходов к деталям бронетехники остаётся неизученным.

Целью исследования является разработка и экспериментальная апробация модели на базе YOLOv8 для автоматизированного обнаружения дефектов корпусных деталей бронетехники. Задачи включают: формирование специализированного набора данных изображений дефектов; адаптацию и обучение модели с применением аугментации и переноса знаний; экспериментальную оценку точности и

быстродействия; сравнительный анализ с классическими методами машинного зрения.

Научная новизна состоит в адаптации современных методов глубокого обучения к специфической задаче обнаружения дефектов бронекорпусов с учётом особенностей материалов, геометрии и условий эксплуатации. Работа выполнена в рамках Track A: Student Research.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на основе набора данных из рентгенографических и фотографических изображений корпусных деталей бронетехники, полученных на ремонтных предприятиях. Объём исходного набора — 2 840 изображений с 4 классами дефектов: трещины (crack), раковины (cavity), поры (pore) и коррозионные повреждения (corrosion). Аннотирование выполнено с использованием Labellmg в формате YOLO.

Для повышения обобщающей способности модели применялись методы аугментации данных: геометрические трансформации (поворот $\pm 15^\circ$, горизонтальное и вертикальное отражение, масштабирование), фотометрические преобразования (яркость, контрастность, гауссов шум) и аугментация Mosaic из фреймворка Ultralytics. Объём данных увеличился до 8 520 изображений. Разделение на обучающую, валидационную и тестовую выборки — 70:15:15.

Базовой архитектурой выбрана YOLOv8m из фреймворка Ultralytics. Обучение проводилось с переносом знаний (веса COCO). Гиперпараметры — в таблице 1.

Таблица 1. Гиперпараметры обучения модели YOLOv8m

Параметр	Значение
Размер входного изображения	640 × 640 пикселей
Размер батча (batch size)	16
Количество эпох	150
Скорость обучения (learning rate)	0,001 (с планировщиком cosine annealing)
Оптимизатор	AdamW
Momentum	0,937
Weight decay	0,0005

Обучение: GPU NVIDIA RTX 3060 (12 ГБ), CPU AMD Ryzen 7 5800X, 32 ГБ ОЗУ; Python 3.10, PyTorch 2.0, Ultralytics 8.0, CUDA 11.8.

Метрики оценки: Precision, Recall, F1-score, mAP@0.5 и mAP@0.5:0.95 с 5-кратной перекрёстной валидацией.

Для сравнения реализованы детектор Canny с морфологической обработкой и адаптивная бинаризация с контурным анализом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе обучения модель продемонстрировала устойчивую сходимость функции потерь. Значение общей функции потерь (box loss + cls loss + dfl loss) снизилось с 4,82 на первой эпохе до 0,34 на заключительной. Признаков переобучения не обнаружено: разница между потерями на обучающей и валидационной выборках не превысила 0,08.

Результаты оценки качества модели на тестовой выборке представлены в таблице 2. Средняя точность обнаружения mAP@0.5 по всем классам составила 91,3

%. Наибольшую точность модель продемонстрировала при обнаружении трещин (94,1 %), что обусловлено выраженной линейной морфологией. Наименьшее значение зафиксировано для пор (86,7 %) из-за малого размера и визуального сходства с артефактами.

Таблица 2. Результаты детекции по классам дефектов (тестовая выборка)

Класс дефекта	Precision, %	Recall, %	F1-score, %	mAP@0.5, %
Трещины	95,2	93,0	94,1	94,1
Раковины	91,8	89,5	90,6	90,8
Поры	88,4	85,1	86,7	86,7
Коррозия	93,5	92,8	93,1	93,6
Среднее	92,2	90,1	91,1	91,3

Перекрыстная валидация подтвердила устойчивость (σ mAP@0.5 = $\pm 1,4$ %). Скорость инференса — 22,3 мс/изображение (~45 кадров/с), что обеспечивает работу в реальном времени.

Сравнение с классическими методами (таблица 3) подтвердило превосходство нейросетевого подхода благодаря способности работать при неоднородном фоне.

Таблица 3. Сравнение методов обнаружения дефектов

Метод	Precision, %	Recall, %	F1-score, %
YOLOv8m (предложенный)	92,2	90,1	91,1
Canny + морфология	74,6	71,3	72,9
Адаптивная бинаризация + контурный анализ	78,1	73,8	75,9

Анализ ошибок показал, что основная часть ложноположительных срабатываний приходится на области с резкими границами конструктивных элементов (рёбра жёсткости, сварные швы), визуально напоминающие трещины. Ложноотрицательные ошибки связаны с дефектами малого размера (менее 3 мм) в зонах с низким контрастом. Данные наблюдения указывают на перспективность включения дополнительных сложных случаев в обучающую выборку.

Результаты сопоставимы с данными применения архитектур Faster R-CNN и SSD для обнаружения дефектов сварных соединений при существенно более высокой скорости обработки. Практическая ценность заключается в возможности интеграции разработанной системы в автоматизированные диагностические комплексы ремонтных предприятий ВС РК, что позволит сократить время дефектоскопического контроля и снизить влияние человеческого фактора.

Ограничения: относительно небольшой набор данных (4 класса) и лабораторные условия экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования разработана и экспериментально апробирована система автоматизированного обнаружения дефектов корпусных деталей бронетехники на основе сверточной нейронной сети YOLOv8. Сформирован набор данных из 2 840 аннотированных изображений четырёх классов дефектов, расширенный до 8 520 методами аугментации. Модель достигает mAP@0.5 = 91,3 % при скорости 45 кадров/с, превосходя классические методы на 12–18 % по F1-score (σ = $\pm 1,4$ %).

Научная новизна заключается в адаптации архитектуры YOLOv8 к специфической задаче дефектоскопии бронекорпусов с учётом особенностей материалов и характерных типов дефектов. Практическая значимость определяется возможностью интеграции системы в диагностические комплексы ремонтных предприятий Вооружённых Сил.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение набора данных за счёт новых типов дефектов, апробацию более современных архитектур (YOLOv9, RT-DETR), реализацию сегментационного модуля для определения точных границ дефектов, а также разработку программно-аппаратного комплекса для полевых условий эксплуатации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках научно-исследовательского проекта кафедры транспортной техники и технологий.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы благодарят специалистов ремонтных предприятий за образцы и помощь при аннотировании данных.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке рукописи инструменты генеративного искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Du, W., Shen, H., Fu, J., & others. (2021). Approaches for improvement of the X-ray image defect detection of automobile casting aluminum parts based on deep learning. *NDT & E International*, 107, 102144. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102144>
- Ferguson, M., Ak, R., Lee, Y.-T., & Law, K. H. (2018). Detection and segmentation of manufacturing defects with convolutional neural networks and transfer learning. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, 2(1), 137–164. <https://doi.org/10.1520/SSMS20180033>
- Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). Ultralytics YOLOv8 (Version 8.0) [Computer software]. Ultralytics. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Lin, T.-Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., & Dollár, P. (2017). Focal loss for dense object detection. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2980–2988. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.324>
- Liu, Y., Sun, P., Wergeles, N., & Shang, Y. (2021). A survey and performance evaluation of deep learning methods for small object detection. *Expert Systems with Applications*, 172, 114602. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114602>
- Tabernik, D., Šela, S., Skvarč, J., & Skočaj, D. (2020). Segmentation-based deep-learning approach for surface-defect detection. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 759–776. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01476-x>
- Yang, J., Li, S., Wang, Z., Dong, H., Wang, J., & Tang, S. (2020). Using deep learning to detect defects in manufacturing: A comprehensive survey and current challenges. *Materials*, 13(24), 5755. <https://doi.org/10.3390/ma13245755>
- Zhao, Z.-Q., Zheng, P., Xu, S.-T., & Wu, X. (2019). Object detection with deep learning: A review. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 30(11), 3212–3232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2018.2876865>
- Гончаров, С. А., Петров, И. В. (2022). Применение свёрточных нейронных сетей в задачах неразрушающего контроля. *Дефектоскопия*, 58(4), 45–56. <https://doi.org/10.31857/S0130308222040059>

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ (НА ПРИМЕРЕ ТОО «Востокцветмет»)

УДК 629.3

Ш.К. Сембина^{1*}, М.С. Муздыбаев¹, Wojciech Wieleba²

¹Восточно-Казахстанский университет имени Д. Серікбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

²Вроцлавский университет науки и технологий, Вроцлав, Польша

* Автор-корреспондент: Сембина Шырайлым Кайратовна

АННОТАЦИЯ. В статье представлена комплексная оценка технического состояния и работоспособности основных агрегатов карьерных самосвалов, эксплуатируемых в условиях горнодобывающего производства. Особое внимание уделено анализу функционирования силовой установки, трансмиссии, ходовой части и гидравлической системы с применением современных методов диагностики и прогнозирования ресурса.

В процессе исследования использованы экспериментальные испытания в реальных условиях эксплуатации, а также аналитические методы обработки данных, позволяющие определить закономерности износа и факторы, влияющие на снижение эффективности техники. На основе полученных результатов выявлены наиболее нагруженные элементы конструкции, требующие приоритетного контроля.

Научная новизна заключается в интеграции инструментальных диагностических методов и моделей прогнозирования остаточного ресурса, что обеспечивает более точную оценку состояния агрегатов. Практическая значимость работы связана с возможностью внедрения предложенных решений для повышения надежности техники и снижения эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: карьерный самосвал, агрегаты и узлы, работоспособность, диагностика, эксплуатационная надёжность, техническое обслуживание.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие горнодобывающей отрасли напрямую связано с эффективностью транспортировки горной массы, ключевую роль в которой играют карьерные самосвалы. Надежность их работы определяется состоянием основных узлов — двигателя, трансмиссии, ходовой части и гидравлических систем.

В условиях интенсивной эксплуатации данные элементы подвергаются значительным механическим и термическим нагрузкам, что приводит к ускоренному износу и увеличению вероятности отказов. Это, в свою очередь, вызывает простои техники и рост затрат на обслуживание.

Несмотря на наличие большого количества исследований в области диагностики машин, большинство из них рассматривает отдельные узлы, тогда как комплексная оценка работоспособности карьерных самосвалов в реальных производственных условиях остается недостаточно изученной.

Целью исследования является выявление закономерностей изменения технического состояния агрегатов карьерных самосвалов и определение факторов, влияющих на их ресурс.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбраны карьерные самосвалы грузоподъемностью 90–130 тонн, эксплуатируемые на предприятиях горнодобывающей отрасли, в том числе на базе ТОО «Востокцветмет» (Иртышская шахта).

Анализу подвергались следующие узлы:

- силовая установка (дизельный двигатель Cummins QSK19);
- трансмиссия (гидромеханическая коробка передач Allison HD4560);
- элементы ходовой части (подвеска, ведущие мосты);
- гидравлическая система.

Для оценки технического состояния применялся комплекс диагностических методов:

- Вибрационный анализ, позволяющий выявлять дефекты на ранней стадии развития;
- Тепловизионный контроль, фиксирующий локальные перегревы;
- Анализ эксплуатационных данных, полученных с телематических систем;
- Моделирование износа, основанное на теориях трения и усталости материалов.

Обработка результатов проводилась с использованием статистических методов и программного обеспечения MATLAB, что обеспечило достоверность полученных зависимостей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что наиболее интенсивные процессы износа наблюдаются в трансмиссии и ведущих мостах, особенно при увеличении пробега техники. Анализ эксплуатационных данных, полученных на предприятии ТОО «Востокцветмет», подтвердил зависимость скорости износа от условий работы карьерной техники и режимов нагрузки.

Анализ вибрационных сигналов позволил выявить рост амплитуды колебаний, свидетельствующий о развитии дефектов подшипников и зубчатых передач. Термографический контроль подтвердил наличие зон перегрева, указывающих на повышенные нагрузки и недостаточную эффективность смазки.

Расчеты показали, что:

- ресурс двигателя до капитального ремонта составляет около 12 000 часов;
- ресурс ходовой части — порядка 8 000 часов.

Установлено, что ключевыми факторами снижения работоспособности являются:

- динамические нагрузки;
- температурные воздействия;
- условия эксплуатации (карьерные дороги, запыленность).

Практическое значение результатов заключается в возможности перехода к *прогнозному техническому обслуживанию*, что позволяет снизить вероятность аварийных отказов.

Дополнительно установлено, что использование данных телеметрии и диагностических параметров позволяет формировать прогноз отказов агрегатов на основе анализа трендов изменения вибрационных и температурных характеристик. В частности, при увеличении амплитуды вибрации на 20–25% относительно номинальных значений вероятность выхода из строя подшипниковых узлов возрастает более чем в 1,5 раза. Это позволяет перейти от регламентного технического обслуживания к адаптивной модели, основанной на фактическом состоянии оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило выполнить всестороннюю оценку технического состояния основных агрегатов карьерных самосвалов и выявить закономерности изменения их работоспособности в процессе эксплуатации. Практическая значимость полученных результатов подтверждается возможностью их применения в условиях ТОО «Востокцветмет», где внедрение диагностических

методов и элементов прогнозного обслуживания позволит повысить надежность карьерной техники и сократить внеплановые простои оборудования.

Установлено, что наибольшему износу подвержены элементы трансмиссии и ходовой части, функционирующие в условиях повышенных динамических нагрузок. Применение комплексных методов диагностики позволило своевременно выявить дефекты и оценить остаточный ресурс узлов.

Доказано, что использование современных диагностических технологий и аналитических моделей способствует повышению надежности техники, увеличению межремонтных интервалов и снижению эксплуатационных затрат.

Перспективным направлением является внедрение цифровых систем мониторинга, использующих методы машинного обучения для обработки диагностических данных. Применение таких технологий позволит повысить точность прогнозирования ресурса агрегатов и минимизировать внеплановые простои техники.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО

ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке текста использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования и редакционной обработки материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mobley R.K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. – 2nd ed. – Butterworth-Heinemann, 2002.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780750675314/an-introduction-to-predictive-maintenance>
- Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2006. – Vol. 20. – P. 1483–1510.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
- Lei Y., Li N., Guo L., et al. Machinery health prognostics: A systematic review. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2018. – Vol. 104. – P. 799–834.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.024>
- Randall R.B. *Vibration-based Condition Monitoring*. – Wiley, 2011.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470977668>
- Caterpillar Inc. *Caterpillar Performance Handbook*. – 51st ed. – 2019.
https://www.cat.com/en_US/support/operations/performance-handbook.html
- Komatsu Ltd. *Komatsu Mining Equipment Maintenance Guide*. – 2021.
<https://www.komatsu.com/en/support/>
- Kumar U., Klefsjö B. Reliability analysis of mining equipment. // *Quality and Reliability Engineering International*. – 1994. – Vol. 10. <https://doi.org/10.1002/qre.4680100104>
- Samanta B., Al-Balushi K.R. Artificial neural networks for fault detection in rotating machinery. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2003.
<https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1463>
- Wang W.Q., Ismail F. Condition monitoring and wear prediction. // *Wear*. – 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.025>
- ISO 13374-1:2003. Condition monitoring and diagnostics of machines.
<https://www.iso.org/standard/22486.html>
- Dwivedi A., Mohanty A., Kumar R. Dump truck condition monitoring using vibration signals. // *Engineering Failure Analysis*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107640>
- Mathew J., Lim C., et al. Predictive maintenance of mining equipment. // *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. – 2017. <https://doi.org/10.1108/JQME-07-2016-0035>
- Zhang W., Yang D., Wang H. Data-driven methods for fault diagnosis of industrial equipment. // *IEEE Access*. – 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972310>
- Carvalho T.P., Soares F.A.A.M.N., et al. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. // *Computers & Industrial Engineering*. – 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.048>

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ МЕДИ

УДК 669.14.018:519.8

Д.К.Смагулова^{1*}, Н.В. Серая¹

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

*Автор-корреспондент: Смағұлова Данагүл Қанатқызы, e-mail:
danasmagulova474@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В работе предлагается перспективный подход к оптимизации режимных параметров электрорафинирования меди на основе применения методов искусственного интеллекта и термодинамического моделирования. В качестве инструмента для получения физически обоснованных данных рассматривается использование программного комплекса Thermo-Calc. Предполагается, что результаты термодинамических расчетов, включающие информацию о фазовом составе, устойчивости соединений и поведении примесей, будут использованы для формирования обучающей выборки моделей машинного обучения.

Рассматривается концепция создания интеллектуальной системы, в которой искусственный интеллект выполняет функции оператора, осуществляя анализ технологических параметров, прогнозирование качества катодной меди и оптимизацию режимов процесса.

Ключевые слова: искусственный интеллект, электрорафинирование меди, оптимизация режимных параметров, Thermo-Calc, Labwere LIMS.

ВВЕДЕНИЕ

Современные процессы электролиза меди характеризуются высокой энергоёмкостью и чувствительностью к режимным параметрам, таким как плотность тока, температура электролита, состав раствора и время осаждения. Традиционные методы подбора оптимальных условий основаны на экспериментальном подходе, что требует значительных затрат времени и ресурсов. В настоящее время управление процессом в значительной степени основывается на эмпирических данных и опыте персонала.

В связи с этим перспективным направлением является применение методов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения для анализа и оптимизации режимных параметров электролиза меди. Современные исследования показывают, что нейросетевые модели способны эффективно прогнозировать выход меди и поведение системы на основе технологических данных.

В условиях цифровизации промышленности перспективным направлением является внедрение интеллектуальных систем управления, способных анализировать большие объемы данных и принимать решения в режиме реального времени. В этой связи особый интерес представляет сочетание термодинамического моделирования и методов искусственного интеллекта.

Целью данной работы является разработка концепции интеллектуальной системы оптимизации процесса электрорафинирования меди, основанной на использовании термодинамических расчетов и алгоритмов искусственного интеллекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Применение искусственного интеллекта.

Предполагается, что искусственный интеллект будет выполнять функции интеллектуального оператора, включая:

- 1) Анализ текущего состояния процесса – формирование объективной картины текущего состояния процесса в режиме реального времени.
- 2) Прогнозирование качества катодной меди – возможность заранее оценить качество продукции до завершения процесса.
- 3) Выявление неблагоприятных режимов – раннее предупреждение о возможных нарушениях технологического процесса.
- 4) Оптимизация технологических параметров – автоматический выбор наиболее эффективных условий процесса.
- 5) Автоматическое управление процессом – переход от ручного управления к интеллектуальной системе, способный заменить оператора.

2. Методика реализации.

На первом этапе предполагается формирование структурированной базы данных, которая будет использоваться для обучения моделей искусственного интеллекта. Качество и полнота данной базы данных являются критически важными, так как именно от неё зависит точность прогнозирования и эффективность последующей оптимизации процесса.

В базу данных планируется включить основные режимные параметры электрорафинирования меди:

- плотность тока (A/m^2);
- температура электролита ($^{\circ}C$);
- концентрация ионов меди (Cu^{2+} , г/л);
- концентрация серной кислоты (H_2SO_4 , г/л);
- скорость циркуляции электролита;
- межэлектродное расстояние;
- время электролиза.

Данные параметры определяют условия протекания электрохимических реакций и непосредственно влияют на скорость осаждения меди и качество катодного осадка. Особое внимание уделяется включению в базу данных информации о примесях, присутствующих в электролите: мышьяк (As); сурьма (Sb); висмут (Bi); никель (Ni) и другие возможные примеси.

Включение параметров, характеризующих содержание примесей в электролите, позволяет учитывать реальные условия протекания промышленного процесса и существенно повышает точность прогнозирования моделей искусственного интеллекта. Поскольку примеси оказывают значительное влияние на морфологию катодного осадка, образование анодных шламов и электрохимические характеристики системы, их учет является необходимым при построении адекватной модели процесса электрорафинирования меди.

Дополнительно в рамках предлагаемого подхода предполагается использование данных лабораторной информационной системы LabWare LIMS, в которой аккумулируются результаты химических анализов. Данная система представляет собой важный источник достоверной информации о состоянии электролита, поскольку в ней фиксируются результаты регулярных лабораторных измерений.

В частности, из LabWare LIMS могут быть получены данные о концентрации основных компонентов электролита, таких как ионы меди и серная кислота, а также информация о содержании примесей и изменении состава раствора во времени. Это позволяет не только учитывать текущее состояние системы, но и анализировать его динамику.

Использование лабораторных данных обеспечивает высокую достоверность и

актуальность информации, отражает реальные производственные условия и позволяет формировать репрезентативные обучающие выборки для моделей машинного обучения. В результате интеграция данных из лабораторной системы с технологическими параметрами процесса и результатами термодинамического моделирования создает более полную и физически обоснованную базу данных, что, в свою очередь, повышает эффективность и надежность разрабатываемой системы искусственного интеллекта.

3. Интеграция термодинамических данных.

В рамках предлагаемого подхода предполагается использование результатов термодинамического моделирования, полученных с применением программного комплекса Thermo-Calc, с целью расширения и углубления информационной базы, используемой для обучения моделей искусственного интеллекта.

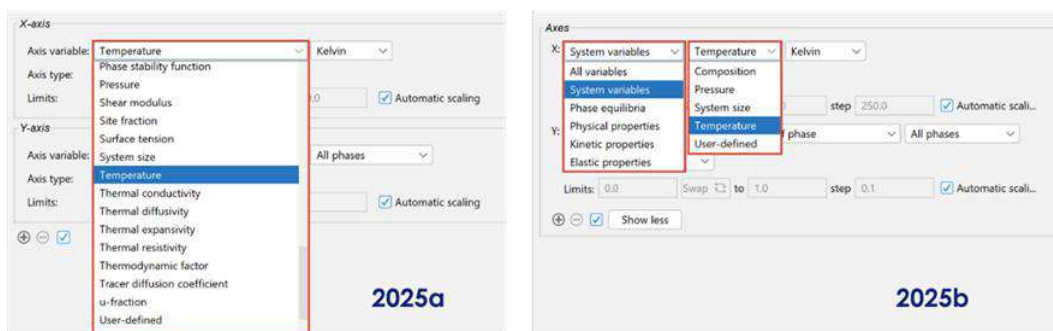


Рисунок 1. Thermo-Calc – мощная и гибкая программа, предназначенная для выполнения термодинамических расчетов и построения фазовых диаграмм

Рассматривается, что в структуру базы данных будут интегрированы расчетные термодинамические параметры, характеризующие физико-химическое состояние системы электролиза меди. К таким параметрам относятся фазовый состав системы, термодинамическая устойчивость соединений, активности компонентов в растворе, а также условия и вероятность образования вторичных фаз, включая анодные шламы и твердые осадки.

Использование указанных данных позволит дополнить экспериментальные и технологические параметры теоретически обоснованной информацией, отражающей фундаментальные закономерности поведения многокомпонентной системы. Это особенно важно в условиях, когда экспериментальные данные ограничены или не позволяют в полной мере описать все протекающие процессы.

4. Формирование выходных параметров (целевых переменных).

На этапе формирования базы данных особое значение имеет корректное определение выходных характеристик процесса, которые в дальнейшем будут использоваться в качестве целевых переменных при обучении моделей искусственного интеллекта. Выбор данных параметров должен отражать как технологическую эффективность процесса электролиза меди, так и качество получаемой продукции.

Ожидается, что в качестве целевых переменных будут рассматриваться показатели, характеризующие морфологические и эксплуатационные свойства катодной меди, включая структуру осадка, его плотность и наличие дефектов, таких как дендритные образования и включения примесей. Дополнительно будут учитываться интегральные технологические показатели, в том числе выход по току, удельное энергопотребление, а также скорость осаждения меди.

Включение указанных параметров в состав целевых переменных позволит обеспечить комплексную оценку эффективности процесса, а также установить

количественные зависимости между режимными характеристиками электрорафинирования и качеством конечного продукта. Это, в свою очередь, создаст основу для построения моделей машинного обучения, ориентированных как на прогнозирование технологических показателей, так и на решение задач многокритериальной оптимизации.

5. Структурирование данных.

На завершающем этапе формирования базы данных предполагается проведение структурирования всей совокупности собранной информации с целью ее дальнейшего использования в моделях искусственного интеллекта. Данный этап является необходимым для обеспечения корректной обработки данных и повышения эффективности обучения моделей.



Структура базы данных для обучения ИИ

Входные параметры	Данные Thermo-Calc	Выходные параметры
⚡ Плотность тока 🌡 Температура 🧪 Cu^{2+} и H_2SO_4 🧪 Примеси (As, Sb, Bi, Ni)	Фазовый состав Активность компонентов	✓ Качество катода ⚡ Выход по току 🏭 Энергопотребление

№	Плотность тока, А/м²	Темп., °С	Cu^{2+} , г/л	As, г/л	Фазовый состав	Активность Cu	Качество т/д	Энергия, кВт·ч/т
1	250	55	40	0,01	Cu, Cu ₂ O	0,85	Высокое	2100
2	300	65	45	0,02	Cu, CuO	0,78	Среднее	2300
3	270	60	42	0,015	Cu	0,82	Хорошее	2200

Рисунок 2. Структура базы данных для обучения моделей искусственного интеллекта при электрорафинировании меди

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вероятно, что все полученные данные будут организованы в виде единого структурированного набора данных (dataset), представляющего собой табличную форму. В рамках данной структуры каждая запись будет соответствовать отдельному экспериментальному измерению, технологическому режиму или расчетному сценарию, полученному, в том числе, с использованием Thermo-Calc. При этом каждая строка таблицы будет отражать совокупность параметров, характеризующих конкретное состояние системы электрорафинирования.

Столбцы сформированной таблицы будут представлять собой набор признаков, включающих как входные параметры процесса (режимные характеристики, состав электролита, содержание примесей, а также термодинамические показатели), так и выходные параметры, выступающие в роли целевых переменных (качество катодной меди, выход по току, энергопотребление и другие показатели эффективности процесса).

Подобная организация данных обеспечивает возможность применения методов статистического анализа и машинного обучения, позволяет выявлять взаимосвязи между параметрами и формировать математические модели, описывающие поведение системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе предложена концепция применения искусственного интеллекта для оптимизации режимных параметров процесса электрорафинирования меди на основе использования термодинамических обоснованных данных. Предполагается, что интеграция результатов моделирования, полученных с помощью Thermo-Calc, с методами машинного обучения позволит сформировать качественно новую основу для анализа и управления технологическим процессом.

В отличие от традиционных подходов, основанных на эмпирических зависимостях и опыте оператора, предлагаемый метод ориентирован на выявление сложных нелинейных взаимосвязей между параметрами процесса и характеристиками получаемой продукции. Это открывает возможности для перехода к интеллектуальному управлению, при котором система способна не только прогнозировать поведение процесса, но и автоматически выбирать оптимальные режимные параметры.

Ожидается, что реализация данного подхода позволит повысить качество катодной меди, снизить энергопотребление и обеспечить устойчивость технологического режима в условиях изменяющегося состава электролита и наличия примесей. Дополнительным преимуществом является возможность минимизации влияния человеческого фактора и сокращения объема экспериментальных исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках диссертационной работы автора, финансирование из внешних источников не привлекалось.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за консультации и поддержку при выполнении работы.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы использовались инструменты искусственного интеллекта для поддержки написания текста, структурирования материала и редактирования научного изложения. Применение генеративных моделей носило вспомогательный характер и не заменяло аналитическую и исследовательскую деятельность авторов. Все результаты, интерпретации и выводы являются оригинальными и принадлежат авторам. ChatGPT. Использование искусственного интеллекта для оптимизации режимных параметров электрорафинирования меди и описание методики с применением Thermo-Calc [Большая языковая модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кенжалиев Б., Азатбекулы Н., Айбагаров С., Амангельды Б., Койжанова А., Магомедов Д. Прогнозирование объемов производства промышленной медной гидрометаллургии с использованием подхода глубокого обучения и аугментации данных // Минералы. – 2025. – Т. 15, № 7. – Ст. 702. DOI: 10.3390/min15070702.

Юн Дж., Ли С., Ким Х. Анализ влияния состава электролита на электроосаждение меди с помощью машинного обучения // Electrochimica Acta. – 2021. – Т. 392. – 139017. DOI:10.1016/j.electacta.2021.139424.

Акунья А., Гомес Дж., Варгас Р. Прогнозирование условий электроосаждения меди на основе глубокого обучения с использованием анализа изображений // Международный журнал передовых производственных технологий. – 2025. – Т. 130. – стр. 1123–1135. DOI: 10.1007/s00170-023-12711-2.

Jensen Z., Kim E., Kwon S. Машинное обучение для проектирования материалов в электрохимических системах // Applied Materials Today. – 2023. – Том 31. – 101743. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101743>

Zhou Y., Wang L., Chen X. Прогнозирование коррозионного поведения катодных материалов с использованием методов машинного обучения // Journal of Materials Science. – 2022. – Том 57. – стр. 14560–14575. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2024.113259>

Andersson J.O., Helander T., Höglund L., Shi P., Sundman B. Thermo-Calc и DICTRA, вычислительные инструменты для материаловедения // Calphad. – 2002. – Том 26. – стр. 273–312. DOI: [10.1016/S0364-5916\(02\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(02)00037-8).

Saunders N., Miodownik A.P. CALPHAD (Расчет фазовых диаграмм): Комплексное руководство. – Оксфорд: Elsevier, 1998. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1048>

Schlesinger M.E., King M.J., Sole K.C., Davenport W.G. Экстрактивная металлургия меди. – 6-е изд. – Оксфорд: Elsevier, 2011. DOI: [10.1016/C2009-0-20188-6](https://doi.org/10.1016/C2009-0-20188-6)

Biswas A.K., Davenport W.G. Экстрактивная металлургия меди. – 5-е изд. – Оксфорд: Pergamon Press, 2002.

LabWare. LabWare LIMS: Система управления лабораторной информацией – Технический обзор. – 2020.

УОНИ 13/55 СЕРИАЛЫ ДӘНЕКЕРЛЕУ ЭЛЕКТРОДТАРЫНЫҢ ЖАБЫНДАРЫ БОЙЫНША САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

ӘОЖ 621.791

Д.Е. Советханов^{1*}, Г.К. Даумова¹, А.В. Богомолов²

¹Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан Республикасы

²Торайғыров Университеті, Павлодар қаласы, Қазақстан Республикасы

*Автор-корреспондент: Советханов Дәурен Ерланұлы, e-mail: dauren.sovetkhanov@bk.ru

АНДАТПА. Бұл мақалада төмен сутекті класты дәнекерлеу электродтарының жабындарының құрамы мен қасиеттеріне жүргізілген салыстырмалы ғылыми-патенттік талдау нәтижелері қарастырылған. Өртүрлі елдердің зерттеушілері ұсынған электрод жабындарының химиялық құрамы, олардың дәнекерлеу-технологиялық қасиеттеріне әсері және механикалық сипаттамалары жүйеленді. Қолданыстағы жабындардың негізгі кемшіліктері анықталып, төмен температураларда жоғары тұтқырлықты және тұрақты доға жануын қамтамасыз ететін жаңа құрамдарды әзірлеудің қажеттілігі негізделді. Жүргізілген шолу нәтижесінде УОНИ 13/55 дәнекерлеу электродтары жабындарының құрамына қатысты ғылыми зерттеулердің негізгі бағыттары анықталды. Қолданыстағы жабындардың көпшілігі дәнекерлеу-технологиялық және механикалық қасиеттердің толық кешенін қамтамасыз ете алмайтыны анықталынды. Сонымен қатар, жабын құрамындағы компоненттердің өзара әрекеттесу механизмдері талданып, олардың доға тұрақтылығы мен металл жігінің сапасына әсері бағаланды. Ғылыми талдау нәтижелері жаңа буындағы тиімді, экономикалық және экологиялық тұрғыдан қауіпсіз дәнекерлеу материалдарын әзірлеу бағыттарын айқындайды.

Түйінді сөздер: дәнекерлеу электроды, УОНИ 13/55, жабын құрамы, төмен сутекті электродтар, $\text{CaCO}_3\text{--CaF}_2$ жүйесі, дәнекерлеу технологиясы.

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта Қазақстанда мұнай-газ, тау-кен-металлургия және құрылыс салаларының қарқынды дамуы дәнекерлеу технологияларының сапасына жоғары талаптар қояды. Жауапты металл конструкцияларын өндіру мен жөндеу кезінде қолданылатын дәнекерлеу электродтарының сапасы олардың жабын құрамына тікелей тәуелді.

Әсіресе төмен сутекті электродтар кеңінен қолданылғанымен, олардың дәстүрлі түрлері (мысалы, УОНИ 13/55 сериясы) қазіргі халықаралық стандарттарға толық сәйкес келмейді. Олардың негізгі кемшіліктеріне доғаның тұрақсыз жануы, жоғары шашырау, жабынның су сіңіргіштігі және төмен температураларда жіктің морттылығы жатады.

Осыған байланысты, дәнекерлеу электродтарының жаңа жабындарын әзірлеу, әсіресе -60°C дейінгі температураларда жоғары соққы тұтқырлығын қамтамасыз ететін құрамдарды жасау өзекті ғылыми-техникалық міндет болып табылады.

Қазақстанда жергілікті компоненттер мен техногенді қалдықтардан жабынның жаңа құрамынан дара дәнекерлеу электродтарын құру және өндіру өзекті мәселелердің бірі болып саналады. Бұл балқытылған металдың пісіру-технологиялық қасиеттері мен механикалық сипаттамаларын арттыруды, -60°C дейінгі теріс температура кезінде металл тігістерінің жоғары соққы тұтқырлығымен қамтамасыз етілуі мен қазақстандық нарықта кеңінен ұсынылған, жетекші шетелдік фирмалардың фторлы-кальцийлі жабынымен, осындай электродтарға қатысты олардың құнының

айтарлықтай төмендеуін қамтамасыз етеді.

Қазақстанда мұнай-газ, тау-кен-металлургия және машина жасау кешендерінің жауапты өндірістік нысандары, мұнай және мұнай өнімдерінің құбыр көлігінің коммуникациялары, сейсмикалық қауіптіліктерді ескере отырып, тұрғын үй және азаматтық құрылыстың жаңа нысандары, қалалық және округтік автомагистральдар, көпірлер, жолдар қарқынды салынуда және жаңартылуда. Осы мақсатта металл құрастырмалары зауыттары және дәнекерлеу технологияларын қарқынды пайдаланатын құрылыс-монтаждау ұйымдары жұмылдырылған.

Дәнекерлеу жұмыстарының, оның ішінде жөндеу және дәнекерлеу ақауларын түзету жұмыстарының айтарлықтай үлесін техникалық тұрғысынан дәстүрлі түрде дара жабылған электродтармен орындайды.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Зерттеу барысында ғылыми және патенттік әдебиеттерге кешенді талдау жүргізілді. Негізгі зерттеу объектісі ретінде төмен көміртекті және төмен легирленген болаттарды дәнекерлеуге арналған электрод жабындарының әртүрлі құрамдары қарастырылды.

Әдістемелік тұрғыдан:

- әртүрлі құрамдағы жабындардың химиялық компоненттері (CaCO_3 , CaF_2 , SiO_2 , TiO_2) жүйеленді;
- жабын құрамының доға тұрақтылығына, қож түзілуіне және металл жігінің қасиеттеріне әсері салыстырылды;
- екі қабатты және бір қабатты жабындардың технологиялық артықшылықтары мен кемшіліктері талданды;
- әртүрлі патенттер мен ғылыми жұмыстар негізінде ұсынылған құрамдардың тиімділігі бағаланды.

Талдау барысында жабын компоненттерінің пайыздық арақатынасы мен олардың дәнекерлеу процесіне әсері негізгі критерий ретінде алынды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ТАЛҚЫЛАНУЫ

Өнеркәсіп және құрылыста жауапты металл құрылымдарын жасау және жөндеу үшін техногендік қалдықтарды пайдалана отырып, жоғары дәнекерлеу-технологиялық, беріктілік және икемділік қасиеттерімен, төмен сутекті класстағы көмкерілген дәнекерлеу электродтарын әзірлеу үшін ғылыми әдебиеттік және патенттік шолу жасалынды.

Қазіргі уақытта көміртекті және төмен легирленген болаттардан жауапты конструкцияларды дәнекерлеу үшін фторлы-кальцийлі жабыны бар төмен сутекті класстағы дара электродтар кеңінен қолданылады. Электродтардың осы түрінің әдеттегі өкілдері УОНИ-13/45, УОНИ-13/55 болып табылады. Алайда, 80 жыл бұрын Ресейде әзірленген бұл электродтар халықаралық стандарттар сапасының заманауи талаптары мен АҚШ және Еуропаның жетекші шетелдік фирмаларының талаптарына жауап бермейді.

УОНИ-13 типті электродтардың негізгі кемшіліктері болып табылады:

- төмен пісіру-технологиялық қасиеттері (доғалық аралығының нашар ионизациясы, доғаның тұрақсыз жануы, жіктері күшейте отырып түзіледі, қож қабығының нашар алынуы, жоғары шашырауы, дәнекерлеуді тек тұрақты токта және қысқа доғада орындау мүмкіндігі);
- жабынды өзекке енгізу кезінде электродсылағыш престің басынан, қаттануы мен біркелкі емес ағуына сылағыш массаның бейімделгіштігінде көрінетін, дайындау кезіндегі төмен технологиялығы.

Төмен сутекті электродтардың көптеген таңбаларының жабындарында CaCO_3 –

$\text{CaF}_2\text{--SiO}_2\text{--TiO}_2$ газ және қож түзуші жүйе қолданылады, онда электродтардың пісіру-технологиялық қасиеттері мен балқытылған металдың қорғау тиімділігі $\text{CaCO}_3/\text{CaF}_2$ арақатынасымен және жабу қалыңдығымен реттеледі.

Төмен сутекті класстың дәнекерлеу электродтарын жаңа жабындармен әзірлеу негізінен олардың пісіру-технологиялық қасиеттерін жоғарылату мен балқытылған металлдың механикалық көрсеткіштерін жақсарту қажеттілігімен негізделген және жалпы алғанда жауапты мақсаттағы дәнекерленген конструкциялардың пайдалану сенімділігімен қамтамасыз ету.

Осы мақсаттар үшін әр түрлі елдердің ғалымдарымен төмен көміртекті және төмен легирленген болаттарды қолмен доғалы дәнекерлеу үшін дәнекерлеу электродтарының келесі екі қабатты және бір қабатты жабындары әзірленді.

Ресейлік ғалымдармен металл өзектен және екі қабатты жабыннан тұратын электрод ұсынылды. Жабын қабаттарының бірі қож түзуші және газ түзуші компоненттерін құрайды. Екінші қабаты дәнекерлеу доғасын контрагирлеуге ықпал ететін белсендіргіш компоненттерінен тұрады. Белсендіргіш компоненттерінің қабаты өзектің бетіне немесе қож түзуші және газ түзуші компоненттер қабатының үстіне енгізілген. Белсендіргіш компоненттерінің қабаты полимер немесе алюминий түрінде байланыстырушымен ұнтақ тектес қоспалар түрінде енгізілген. Жоғарыда аталған қабат лентаның бетіне бір немесе бірнеше белсендіргіш компоненттерінен оралған түрінде енгізілуі мүмкін. Электродты пайдалану қолмен доғалы дәнекерлеу процесінің өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді [1].

Сондай-ақ, екі қабатқа бөлінген екі қабатты жабыны бар электрод белгілі. Электрод өзегінің бетіне доғаның тұрақты жануына ықпал ететін майлау компоненттерінің қабаты енгізілген. Бірінші қабат бетіне енгізілген майлаудың екінші қабаты (CaF_2) деионизатор заттарын құрайды. Электродтың мұндай орындалуы әсіресе айнымалы токтағы дәнекерлеу кезінде дәнекерлеу доғасының жану тұрақтылығын арттырады. Бұл электродтың технологиялық қасиеттерін жақсартуға және дәнекерлеу жігінің металл сапасын арттыруға мүмкіндік береді [2]. Көрсетілген электродтың кемшілігі дәнекерлеу доғасының төмен балқытушы қабілеті болып табылады.

Дәнекерлеуге арналған УОНИ-13/55 маркалы электродтың мәрмәр - 54; плавикті шпат - 15; кварцты құм - 9; ферромарганец - 5; ферросилиций - 5; ферротитан – 12 құрайтын құрамы белгілі. Жабын сымға жағылады. Дәнекерлеу сериялық шығарылатын қорек көздерінен кері полярлы тұрақты токта жүргізіледі. Электродтың бұл жабыны плавикті шпаттың өткір тапшылығының арқасында едәуір жоғары бағаға және төмен дәнекерлеу-технологиялық қасиеттеріне ие, біріншіден, зиянды қоспалардың – күкірт және фосфордың болуымен, екіншіден, УОНИ-13/55 маркалы электродтар тұрақты ток көзіне міндетті түрде қосылуы, тоттан, дәнекерленетін бұйымдардың беттеріндегі майлы дақтардан мұқият түрде тазартылуы қажеттілігі талап етіледі [3].

Төмен көміртекті және төмен легирленген болаттарды дәнекерлеу үшін пайдаланылатын электрод жабыны белгілі, ол келесілерді құрайды, мас. %: рутилді концентрат 10-14, ферромарганец 6-10, каолин 4-8, тальк 5-9, целлюлоза 1,4-2, марганец кені 8-14, ферротитан 6-10, кальций карбонаты 7-12, темір ұнтақ және басқалары [4]. Электрод жабынының келтірілген құрамының кемшілігі оның нашар сығымдалуы болып табылады. Сонымен қатар, мұндай жабынды электродтар дәнекерлеу доғасының тұрақты жануын қамтамасыз етпейді, ал қож қабығы дәнекерлеуден кейін электродтарды пайдалана отырып осы жабынмен нашар жойылады.

Төмен көміртекті болаттарды дәнекерлеу үшін пайдаланылатын электродты жабын әзірленген, ол келесілерді құрайды, мас. %: рутилді концентрат 25-35, мәрмәр 18-20, тальк 8-12, ферромарганец 14-17, каолин 3-5, целлюлоза 1,5-2, дистен-

силиманитті концентрат 1-3, ильменитті концентрат 15-25 [5]. Алайда, бұл электрод жабыны дәнекерлеу доғасының жеткілікті тұрақты жануы мен электродтардың жеңіл сығымдалуын қамтамасыз етпейді.

Мәрмәр, тальк, ферромарганец, каолин, целлюлоза мен компонент құрамында бар, титан диоксидін құрайтын электрод жабыны белгілі, қосымша дала шпаты және карбоксиметилцеллюлозаны, ал титан диоксидін құрайтын компонент ретінде - ұжымдық рутил-ильменитті концентратты құрайды, компоненттердің келесі арақатынасында, мас. %: мәрмәр 0,5-16, тальк 2-28, ферромарганец 9-18, Каолин 1-9, целлюлоза 0,5-6, ұжымдық рутилильменитті концентрат 32-78, дала шпат 0,5-22, карбоксиметилцеллюлоза 0,2-2,5 [6].

Дәнекерленген жіктердің төмен температураларда жоғары соққылы тұтқырлығын қамтамасыз ету үшін және электродтардың сығымдалуының жеңілдеуі үшін мәрмәр, плавикті шпат, ферромарганец, ферросилиций, ферротитан, көмірқышқыл натрий және титанның қос тотығын құрайтын компонентті қосатын электрод жабыны әзірленді, қосымша құрамында дала шпаты, каолин және карбоксиметилцеллюлоза бар, ал титанның қос тотығын құрайтын компонент ретінде - ұжымдық рутил-ильменитті концентрат, компоненттердің келесі арақатынасында, мас. %: мәрмәр 28-58, плавикті шпат 8-42, ферромарганец 7-14, ферросилиций 6-13, ферротитан 3-14, көміртекті натрий 0,2-1,5, ұжымдық рутил-ильменитті концентрат 4-16, дала шпаты 2-10, каолин 3-11, карбоксиметилцеллюлоза 0,2-1,6 [7]. Осы жабын салыстырмалы түрде жақсы пісіру-технологиялық қасиеттерін қамтамасыз етеді, бірақ төмен температурада жеткілікті жоғары тұтқырлыққа ие дәнекерленген жіктерді алуды қамтамасыз етпейді.

Сондай-ақ, аз көміртекті және төмен легирленген болаттады дәнекерлеу үшін пайдаланылатын электродты жабын белгілі, ол келесілерді құрайды, мас. %: плавикті шпат 10-20, ильменитті концентрат 2-7, ферромарганец 2-8, ферросилиций 3-10, ферротитан 1-3, алюминий 1-3, темір ұнтақ 10-40, кальцийленген сода 1-4, сирек жерлі металл оксифториді 1-5, мәрмәр және басқалары [8]. Электрод жабынының келтірілген құрамының кемшілігі нашар сығымдалуы болып табылады. Сонымен қатар, төмен температураларда жоғары тұтқырлығына ие, дәнекерленген жіктерді алуды қамтамасыз етпейді. Қож қабығы дәнекерлеуден кейін электродтарды пайдалана отырып осы жабынмен нашар жойылады.

Төмен легирленген болаттарды дәнекерлеу үшін қолданылатын электрод жабыны әзірленді, ол келесілерді құрайды, мас. %: мәрмәр 48-50, плавикті шпат 13-17, рутил 2-6, көмірқышқылды натрий 0,5-1,5, слюдалық ұн 1,5-2,5, ферромарганец 5-10, ферросилиций 4-8, ферротитан 9-12, цирконий диоксиді 2-4, кремнезем 2-3 [9]. Алайда, осы электрод жабыны электродтардың жеңіл сығымдалуын қамтамасыз етпейді. Осы жабынмен электродтар төмен температураларда жоғары тұтқырлығына ие, дәнекерленген жіктерді алуды қамтамасыз етпейді.

Төмен көміртекті және төмен легирленген болаттарды қолмен доғалы дәнекерлеу үшін пайдаланылатын электродтар жабынына, келесі компоненттердің арақатынасы кезіндегі электродты жабыны жатады, мас. %: ұжымдық рутил-ильменитті концентрат - 28-45, мәрмәр - 3-20, тальк - 1-12, ферромарганец - 10-17, каолин - 0,5-12, дала шпаты - 1-20, целлюлоза - 0,5-5, карбоксиметилцеллюлоза - 0,5-1,5, гематитті кен- 5-20 [13].

Төмен көміртекті болаттарды дәнекерлеу үшін пайдаланылатын электрод жабыны белгілі, ол құрайды мас. %: рутил 26-32, ильменит 14-32, мәрмәр 4-7, ферромарганец 6-10, целлюлоза 9-15, каолин 4-7, карбоксиметилцеллюлоза 1-2, темір ұнтағы және басқалары [13]. Электрод жабынының келтірілген құрамының кемшілігі, электродтармен орындалған осы жабынмен дәнекерлеу жігі металының төмен сапасы болып табылады.

Жоғарыда келтірілген ғылыми әзірлемелерде дәнекерлеу электродтары

жабындарының құрамындағы кейбір компоненттер, химиялық заттарды және қосымша байланыстырушыларды қолдануды талап етеді, бұл түпкілікті өнім құнына, сондай-ақ дәнекерлеу электродтарының дәнекерлеу-технологиялық қасиеттеріне кейін тікелей әсер ететін, жабын құрамындағы компоненттерін дұрыс таңдауына айтарлықтай әсер етеді.

Жүргізілген талдау нәтижесінде дәнекерлеу электродтары жабындарының бірнеше негізгі типтері анықталды:

1. Фторлы-кальцийлі жүйелер

CaCO_3 – CaF_2 негізіндегі жабындар кеңінен қолданылады және газ-қож қорғауын қамтамасыз етеді. Алайда CaF_2 тапшылығы мен жоғары құны олардың экономикалық тиімділігін төмендетеді. Сонымен қатар, мұндай жабындар тұрақты токқа тәуелді және технологиялық икемділігі шектеулі.

2. Рутил-ильменитті жүйелер

TiO_2 негізіндегі жабындар доғаның тұрақтылығын жақсартады, бірақ олардың механикалық қасиеттері жеткіліксіз және қождың бөлінуі қиын болуы мүмкін.

3. Көп компонентті және модификацияланған жабындар

Ферроқоспалар (ферромарганец, ферросилиций, ферротитан), сирек жер элементтері және минералдық қоспалар енгізілген жүйелер механикалық қасиеттерді жақсартуға мүмкіндік береді. Алайда:

- құрамның күрделілігі өндірісті қиындатады;
- кейбір компоненттердің қымбат болуы өнім құнын арттырады;
- төмен температурада қажетті тұтқырлық әрдайым қамтамасыз етілмейді.

4. Екі қабатты жабындар

Екі қабатты жүйелер (газ-қож түзуші + белсендіргіш қабат) доғаның тұрақтылығын арттырады және өнімділікті жоғарылатады. Бірақ олардың балқыту қабілеті кей жағдайда төмен болады.

Жалпы алғанда, көптеген зерттеулер көрсеткендей, жабын құрамының оңтайлы таңдалмауы доғаның тұрақсыз жануы, қож қабығының нашар алынуы, төмен температураларда жіктің морттылығы, технологиялық өңдеудің қиындығы сияқты мәселелерге әкеледі.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген шолу нәтижесінде УОНИ 13/55 дәнекерлеу электродтары жабындарының құрамына қатысты ғылыми зерттеулердің негізгі бағыттары анықталды. Қолданыстағы жабындардың көпшілігі дәнекерлеу-технологиялық және механикалық қасиеттердің толық кешенін қамтамасыз ете алмайтыны анықталынды.

Перспективалы бағыттар ретінде:

- табиғи алюмосилкаттар мен техногенді қалдықтарды пайдалану;
- көп компонентті жүйелерді оңтайландыру;
- төмен температураларда жоғары соққы тұтқырлығын қамтамасыз ететін жаңа құрамдарды әзірлеу қарастырылады.

Бұл бағыттар Қазақстанның өндірістік қажеттіліктерін қамтамасыз етуге, импортты алмастыруға және дәнекерлеу материалдарының өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: АВТОРЛАР МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫНЫҢ ЖОҚ ЕКЕНІН МӘЛІМДЕЙДІ.

ЎДЕБИЕТТЕР ТЎЗІМІ

- Патент RU 2244615 Электрод для дуговой сварки Казаков Ю.В., Паршин С.Г., Захаренко А.П., Китаева Е.А. Тольяттинский ГУ, 20.01.2005 г. // Patent RU 2244615 Elektrod dlya dugovoy svarki Kazakov Yu.V., Parshin S.G., Zakharenko A.P., Kitaeva E.A. Tolyattinskiy GU, 20.01.2005.
- Донченко, Е.А. (1976). Об электродах с двухслойным покрытием // Сварочное производство, №5, 31 // Donchenko, E.A. (1976). Ob elektrodakh s dvukhsloynym pokrytiem. Svarochnoe proizvodstvo, №5, 31.
- Закс, И.А. (1996). Электроды для дуговой сварки сталей и никелевых сплавов: Справочное пособие. СПб., 332. // Zaks, I.A. (1996). Elektrody dlya dugovoy svarki staley i nikelovykh splavov: Spravochnoe posobie. SPb., 332.
- Авторское свидетельство СССР №961910 В 23К35/365, 1982 // Avtorskoe svidetel'stvo SSSR №961910 V 23K35/365, 1982.
- Авторское свидетельство СССР №831466 Состав электродного покрытия Александров А.Г., Пиньковский И.В., Мимиченко С.Л., Лунев В.В., Меньило Е.И., Петров А.С., 15.06.76 // Avtorskoe svidetel'stvo SSSR №831466 Sostav elektrodnogo pokrytiya Aleksandrov A.G., Pin'kovskiy I.V., Mimichenko S.L., Lunev V.V., Meneylo E.I., Petrov A.S., 15.06.1976.
- Предпатент РК №10308 Электродное покрытие / Есимов Б.О., Абдурахманов Р.У., Джамилев К.А., Айтуреев М.Ж., Беймбетов А.Н. (19)KZ (13) А (11) от 15.06.2001, бюл. №6 // Predpatent RK №10308 Elektrodnoe pokrytie / Esimov B.O., Abdurakhmanov R.U., Dzhamilov K.A., Ayturayev M.Zh., Beymbetov A.N. (19)KZ (13) A (11), 15.06.2001, byul. №6
- Предпатент РК №10309 Электродное покрытие / Абдурахманов Р.У., Есимов Б.О., Джамилев К.А., Беймбетов А.Н., Айтуреев М.Ж., (19)KZ (13) А (11) от 15.06.2001, бюл. №6 // Predpatent RK №10309 Elektrodnoe pokrytie / Esimov B.O., Abdurakhmanov R.U., Dzhamilov K.A., Ayturayev M.Zh., Beymbetov A.N. (19)KZ (13) A (11), 15.06.2001, byul. №6
- Авторское свидетельство СССР №899314 В 23К35/365, 1982 // Avtorskoe svidetel'stvo SSSR №899314 V 23K35/365, 1982
- Авторское свидетельство СССР №1662792 В 23К35/365, 1991 // Avtorskoe svidetel'stvo SSSR №1662792 V 23K35/365, 1991
- Предпатент РК №15286 Электродное покрытие / Есимов Б.О., Абдурахманов Р.У., Джамилев К.А., Айтуреев М.Ж., Беймбетов А.Н. (19)KZ (13) А (11) от 17.01.2005, бюл. №1 // Predpatent RK №15286 Elektrodnoe pokrytie / Esimov B.O., Abdurakhmanov R.U., Dzhamilov K.A., Ayturayev M.Zh., Beymbetov A.N. (19)KZ (13) A (11), 17.01.2005, byul. №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ ПОЛИМЕРПЕСЧАНОЙ СМЕСИ НА ЕЁ МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

УДК 691.537

Р.А. Соколов^{1*}, Г.У. Ерболатова¹

¹Восточно-Казахстанский Технический Университет им. Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Соколов Р.А., e-mail: r7690285@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Данная работа посвящена исследованию полимерпесчаного материала, полученного в результате переработки пластиковых отходов. Актуальность исследования обусловлена ростом количества пластиковых отходов и необходимостью поиска эффективных способов их повторного использования с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду. В качестве исходных компонентов были использованы полиэтилентерефталат (PET) и полиэтилен высокого давления (HDPE), которые являются одними из наиболее распространённых видов пластика.

В ходе исследования пластиковые отходы были предварительно измельчены, после чего смешаны с просеянным кварцевым песком в определённых пропорциях. Полученная смесь подвергалась термической обработке при повышенной температуре, в результате чего пластик плавился и выступал в роли связующего вещества, объединяющего частицы песка. На основе данной технологии были получены образцы полимерпесчаных кирпичей.

В работе рассмотрены основные этапы технологического процесса производства полимерпесчаного материала, включая подготовку сырья, смешивание компонентов, нагрев и формование изделий. Особое внимание уделено исследованию механических свойств полученного материала, таких как прочность, микротвёрдость и устойчивость к внешним воздействиям.

Результаты исследования показали, что полученный полимерпесчаный материал обладает улучшенными эксплуатационными характеристиками и может применяться в строительстве, благоустройстве территорий и других областях. Кроме того, использование пластиковых отходов в качестве сырья способствует уменьшению загрязнения окружающей среды и развитию экологически безопасных технологий переработки.

Ключевые слова: полимерпесчаный материал, переработка пластика, полиэтилентерефталат, микротвёрдость, строительные материалы, экологическая безопасность, переработка отходов.

ВВЕДЕНИЕ

Пластмасса, также известная как пластиковая масса или пластик, представляет собой разнообразие синтетических или полусинтетических материалов, основным компонентом которых являются полимеры. Термин «пластмасса» происходит от слова «пластичность» и указывает на способность этого материала изменять свою форму под воздействием тепла и давления, а затем сохранять заданную форму после охлаждения.

Существует несколько типов пластмасс, которые отличаются своими химическими и физическими свойствами, структурой и способом получения:

1. Термопласты - могут многократно перерабатываться и принимать новую форму при повторном нагревании. Пример: полиэтилен, полипропилен, полистирол.

2. Термореактивные пластмассы - не могут многократно перерабатываться, так как они полимеризуются при нагревании и не могут вернуться к своей первоначальной форме. Пример: эпоксидные, полиэстерные и фенолоформальдегидные смолы.

3. Эластомеры - имеют высокую гибкость и прочность при растяжении. Используются в производстве уплотнительных материалов, резиновых изделий, резиновой обуви и т.д.

4. Пеноматериалы - пластмассы, которые содержат в своей структуре пустоты, что делает их легкими и удобными для использования в упаковке, изоляции и т.д.

5. Композитные материалы - содержат в своей структуре усилители, такие как стекловолокно, углеродное или арамидное волокно, что повышает их прочность и жесткость. Они используются в производстве автомобилей, лодок, самолетов и др.

Маркировка пластика – это специальная система обозначений, которая используется для идентификации типа пластика и упрощения его переработки. Каждый тип пластика имеет свой уникальный код, который представляет собой цифру в треугольнике со стрелками.

1. PET (полиэтилентерефталат) - легкий, прочный и удобный в использовании термопластичный полимер. Он широко используется для производства бутылок для напитков и упаковки продуктов. PET - экологически безопасный тип пластика, который не содержит вредных веществ и легко перерабатывается механически или химически. Он характеризуется высокой прочностью, устойчивостью к ударам, химическим воздействиям, влаге и гниению.

2. HDPE (полиэтилен высокой плотности) — это термопластичный полимер, отличающийся высокой прочностью, устойчивостью к химическим воздействиям, низкой плотностью и ударопрочностью. Он широко используется в упаковке, строительстве, автомобильной промышленности и медицине. Является экологически безопасным материалом, который может быть легко переработан.

3. PVC (поливинилхлорид) - жесткий полимер, устойчивый к атмосферным воздействиям и износу. Подходит для производства труб, оконных профилей, электротехнических изделий и других элементов. Однако переработка может быть сложной из-за возможных вредных добавок.

4. LDPE (полиэтилен низкой плотности) - прозрачный полимер с высокой молекулярной массой и хорошей устойчивостью к воде, кислотам, щелочам и ультрафиолетовым лучам. Может использоваться для производства различных изделий, включая упаковку и конструкционные материалы. Также поддается переработке.

5. PP (полипропилен) - термопластичный полимер с высокой прочностью, устойчив к химическим воздействиям и обладает жаростойкостью до 120°C. Он используется в упаковке, автомобильной и электротехнической промышленности, медицине и т. д. PP можно перерабатывать механически, химически и термически.

6. PS (полистирол) — это полимер, который используется в качестве упаковочного материала. Обладает хорошей устойчивостью к свету и воздействию УФ-лучей, химической стойкостью к кислотам и щелочам, а также прочностью. Однако переработка PS может быть сложной из-за его хрупкости и низкой стойкости к ударам, что приводит к разрушению во время переработки.

7. Other полимеры - все остальные виды пластмасс, не входящие в категории 1-6. Они имеют разные свойства и характеристики, используются в разных отраслях и могут быть переработаны, но методы переработки могут различаться в зависимости от конкретного материала. Примеры: поликарбонаты, ацетаты целлюлозы, нейлон и полиимиды [1-4].

Недостатки пластмассы: низкая механическая прочность и химическая нестойкость. Опасность для здоровья и окружающей среды: ранее получение полистирола было сопряжено с выделением трихлорфторметана (фреона), который

разрушал озоновый слой Земли. Полистирол получают в результате полимеризации стирола, который является канцерогенным.

У пластиков не так много недостатков, но они есть. В первую очередь, это небольшой диапазон температурной стабильности. При повышении температур пластики плавятся, теряя форму. Лишь некоторые виды пластмасс способны выдерживать нагрев выше 80-100°C. При отрицательных температурах пластиковые изделия становятся хрупкими, теряют упругость, подвергаются растрескиванию и разрушению даже при незначительных механических воздействиях [2].

Целью данной работы является исследование влияния состава полученных опытных образцов полимерпесчанного материала (кирпича) на микротвердость.

На данный момент загрязнение окружающей среды пластиком всё ещё является большой проблемой, несмотря на то, что уже ведётся переработка отходов. Это одна из причин почему заинтересовала данная тема. Лидирующими странами в области переработки пластика являются Германия, Уэльс, Швейцария, Япония, Литва, США. В Германии отдельный сбор мусора практикуется уже давно и весьма активно. Отказ от сортировки мусора гражданами может обернуться высоким штрафом. Утилизация отходов регулируется на законодательном уровне, поэтому Германия имеет хорошие показатели в этой области.

В Швейцарии пластиковые и стеклянные отходы не только выбрасывают отдельно, но и сортируют, в том числе, по цвету. Более того, существуют контейнеры даже для пластиковых крышек. Такая продуманная сортировка на нижнем уровне существенно облегчает и удешевляет дальнейшую переработку отходов.

В Японии мусор сортируют уже более 20 лет. Стимулом для граждан являются различные льготы, например, скидки на коммунальные платежи для физических лиц или налоговые льготы для предпринимателей, занимающихся утилизацией мусора.

В США тоже практикуется стимулирование граждан в форме налоговых послаблений и различных материальных поощрений. Кроме того, там активно используется упаковка, произведенная из вторсырья, а в некоторых городах, например, Миннеаполисе и Сент-Поле, продукты питания в пластиковой таре вообще запрещены к продаже.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе в качестве материала исследования выбран полимерпесчаный материал. Данный материал был получен способом измельчения 474 г полиэтилентерефталата (15 бутылок по 0.5 л и 3 бутылки по 1л), а также 50 г полиэтилена высокого давления (20 крышек). Для создания строительных кирпичей необходимо просеять песок и начать разогревать его при температуре 250 °C, после этого добавляем измельчённый пластик, помешивая смесь. Если же в начале засыпать пластик после того, как он расплавится, то песок начнет на него прилипать. Таким способом получится пластик, покрытый песком сверху – полимерпесчаный материал (или хрупкий кирпич) (Рисунок 1). Состав полимерпесчанного материала показан в таблице 1.

Таблица 1. Состав полимерпесчанного материала

№	Смесь	Пропорция	Время в воде	Время плавления. мин	Температура. °C
1	Полиэтилентерефталат + песок	70/30	1 минута в форме, 2-3 минуты в воде	20	250
1.2	Полиэтилентерефталат + песок	60/40	1 минута в форме, 2-3 минуты в воде	20	253

2	Полиэтилентерефталат + полиэтилен высокого давления +песок	35/35/30	1 минута в форме, 2-3 минуты в воде	25	252
3	Полиэтилентерефталат + песок (в более жидком состоянии)	70/30	1 минута в форме, 2-3 минуты в воде	32	260

После того как пластик расплавится и смесь станет однородной её переложить в форму и спрессовать. Далее необходимо остудить смесь, для этого кирпич поливается водой в течение 1 минуты. После этого его можно достать из формы и полностью погрузить в воду ещё на 2–3 минуты до полного остывания.



Рисунок 1. Образцы полимерпесчанного материала

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным исследования были получены смеси параметров, которых были показаны в таблице 1. Из полученной смеси пластика изготовили опытные образцы в форме кирпича. Основными свойствами полимерпесчаных материалов являются жёсткость, твёрдость, стойкость к деформациям, термостойкость. Исходя из этого, полученные образцы кирпичей были проверены на механическую прочность, результаты измерения, которых показаны на рисунке 2.

По данным микротвердости поверхности полимерпесчанного материала, свидетельствуют об увеличении микротвердости в смеси образца 1, что свидетельствует о том, что он может стать самым прочным материалом для применения его в строительстве и в различных отраслях, в составе, которого 70% полиэтилентерефталата и 30% песка.

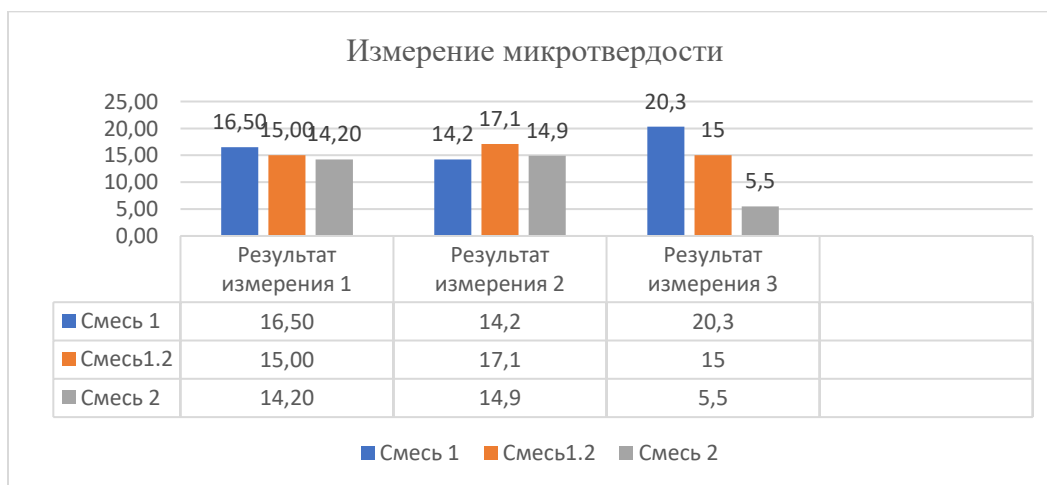


Рисунок 2. Диаграмма распределения микротвердости полимерпесчанного материала

Таблица 2. Механическая прочность, Теплопроводность, Влагостойкость

Состав смеси	Механическая прочность	Теплопроводность	Влагостойкость
Полиэтилентерефталат + песок	высокая	ниже	очень высокая
Полиэтилентерефталат + полиэтилен высокого давления +песок	оптимальная	средняя	высокая
Полиэтилентерефталат + песок (в более жидком состоянии)	ниже	выше	хорошая

Состав полимерпесчаного материала значительно влияет на его свойства. Увеличение содержания полимера повышает влагостойкость и снижает теплопроводность, но при избытке может уменьшаться прочность. Оптимальным считается состав полиэтилентерефталат + песок, который обеспечивает хорошую прочность, низкое водопоглощение и устойчивость к внешним воздействиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент цель работы достигнута, были созданы варианты опытных образцов полимерпесчанного материала (кирпича) из смеси пластика с песком, которые были проверены на механическую прочность. Увеличение микротвердости в смеси образца 1, свидетельствует о том, что он может стать прочным материалом для применения его в строительстве и в различных отраслях. Кроме того, работа акцентирует внимание на актуальной проблеме загрязнения окружающей среды пластиком и важности переработки отходов.

В будущем планируется попробовать изготовление кирпичей из новых вариантов смеси пластика с глиной, гудроном, золой, пеплом и другими.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Использовался только в качестве поиска литературы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Медведева Т. П., Кащенко Е. Г., Рябикова Н. Е. “Товароведение и экспертиза промышленных товаров из пластмасс” Оренбург 2007, с. 4.
 Medvedeva T.P, Kashchenko E.G, Ryabikova N.E “Commodity science and expertise of industrial goods made of plastics”, Orenburg, 2007, p. 4
 Тарасенко А.М, Жуков А.И, МанесМихаэль”Песчанно полимерный материал”, 2001,с. 5.
 Tarasenko A.M., Zhukov A.I., Manes Michael ”Sand polymer material”, 2001,p. 5

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСМИССИИ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА CAT 793D ПУТЁМ МОДЕРНИЗАЦИИ КРЕСТОВИНЫ КАРДАННОГО ВАЛА С ВНЕДРЕНИЕМ ПРЕСС-МАСЛЕНКИ

УДК629.334:621.833.6

Д.В. Стрелкова¹, А.С. Муздыбаева¹

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

*Автор-корреспондент: Стрелкова Дарья Витальевна, super1998_08@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается проблема сниженной работоспособности карданных валов карьерного самосвала CAT 793D, возникающая вследствие ускоренного износа крестовины при недостаточном смазывании подшипниковых чашек. На основании анализа эксплуатационных отказов, OEM-документации Caterpillar и исследований по трибологии предложена модернизация крестовины посредством всверливания пресс-масленки для обеспечения регулярной подачи смазки. Показано, что модернизация позволяет значительно продлить ресурс узла, повысить надежность трансмиссии и сократить эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: трансмиссия, CAT 793D, карданный вал, крестовина, смазка, модернизация, пресс-масленка, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Карьерные самосвалы серии CAT 793D, согласно OEM-документации Caterpillar (Specalog 793D), относятся к наиболее нагруженной самоходной технике в горнодобывающей промышленности. Их трансмиссия, включающая гидротрансформатор, карданную передачу и планетарную коробку, работает в условиях высоких динамических нагрузок, абразивной запылённости и значительных перепадов температур [1]. В таких условиях элементы карданного вала испытывают повышенные ударные и вибрационные воздействия, приводящие к ускоренному изнашиванию подвижных пар, особенно подшипников крестовины.

Особенность конструкции крестовин, применяемых в трансмиссии CAT 793D, заключается в отсутствии встроенных пресс-маслёнок, что типично для тяжёлой техники, рассчитанной на обслуживание по ресурсным интервалам. Производитель исходит из концепции плановой замены крестовин без промежуточного смазывания, что отражено в сервисной информации и каталогах запчастей. Однако реальные условия эксплуатации, особенно в карьерах Казахстана, значительно отличаются от номинальных: высокая запылённость, попадание абразивных частиц, работа при больших углах перелома кардана и постоянные ударные нагрузки. Эти факторы создают условия, при которых заводского запаса смазки внутри игольчатых подшипников недостаточно для обеспечения длительного срока службы.

При отсутствии регулярной подачи смазки возникает сухое трение, приводящее к быстрому разрушению роликовых дорожек. На фоне абразивного загрязнения рабочей зоны ускоренно разрушаются чашки подшипников, в крестовине появляется люфт, а в дальнейшем развивается дисбаланс карданного вала. Дисбаланс, в свою очередь, создаёт переменные ударные нагрузки на трансмиссию, что увеличивает вибрацию и вызывает дополнительный износ сопрягаемых деталей. Подобные механизмы деградации подробно описаны в фундаментальных исследованиях трансмиссий и трибологических пар Naunheimer и Chen, где подчёркивается ключевая роль смазочного слоя в игольчатых подшипниках при больших контактных напряжениях. Анализ эксплуатационных данных автопарков горнодобывающих

предприятий Казахстана показывает, что выход из строя крестовины является одной из наиболее типичных причин внеплановых простоев техники. Замена крестовины или всего карданного вала требует привлечения специализированного оборудования, а в условиях карьера часто осуществляется в полевых условиях, что повышает трудоёмкость и стоимость операций. Это делает проблему повышения ресурса крестовины важной не только технически, но и экономически. Указанные факторы формируют потребность в создании простого, надёжного и малозатратного технического решения, способного обеспечить регулярное смазывание узла и тем самым продлить срок его службы без серьёзных конструктивных изменений в трансмиссии.

Цель работы заключается в повышении эффективности восстановительных работ и продлении ресурса карданного вала карьерного самосвала CAT 793D посредством модернизации крестовины, направленной на обеспечение регулярного смазывания подшипниковых чашек. В задачи входит разработка решений по внедрению пресс-маслёнки и созданию системы распределения смазки внутри узла. Предлагаемое путь основан на всверливании центрального канала в теле крестовины с последующей установкой резьбовой маслёнки, обеспечивающей Внесение смазки через маслёнку, позволяет ей равномерно распределяться по внутренним каналам, поступая непосредственно в подшипниковые чашки. Такая схема обеспечивает постоянное наличие смазочного слоя между игольчатыми роликами и дорожками качения, что снижает коэффициент трения, уменьшает вероятность абразивного износа и стабилизирует тепловой режим работы узла, а также появляется возможность регулярного пополнения смазки без разборки карданного вала.

Научная новизна работы состоит в разработке и обосновании конструктивного решения, позволяющего интегрировать систему централизованного смазывания в массивную крестовину тяжёлой карьерной техники без ухудшения её прочностных характеристик.

Практическая значимость предложенного решения заключается в существенном продлении межремонтного интервала крестовины и повышении общей надёжности трансмиссии. Это снижает трудозатраты обслуживающего персонала, минимизирует риски возникновения аварийных ситуаций и сокращает финансовые затраты горнодобывающего предприятия. Модернизация обладает универсальностью и может быть внедрена на широком спектре тяжёлых машин, имеющих аналогичный конструктивный тип крестовин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами планируется провести исследование посредством использования известных методов статистического анализа режимов нагружения карданной передачи, изучение причин отказов крестовин на основе метода Парето, разработка усовершенствованной конструкции размещения смазывающего канала в теле крестовины на основе моделирования, сопоставительный анализ влияния модернизации на эксплуатационные параметры узла. Применяемые методы показали, что анализ температурных режимов, основанный на данных SAE и исследованиях Chen, показывает, что дополнительная подача смазки снижает температуру в зоне игольчатых подшипников, что повышает их устойчивость к усталостному разрушению.

В рамках выполнения исследования также рассматривалась возможность применения инструментов искусственного интеллекта как вспомогательного средства анализа и систематизации технической информации. Современные ИИ-платформы позволяют обрабатывать массивы эксплуатационных данных, технической документации и результатов исследований, выявляя причинно-следственные связи между режимами нагружения и характером отказов узлов трансмиссии.

Использование ИИ-инструментов на этапе предварительного анализа способствует более обоснованному формированию гипотез, уточнению направлений модернизации и повышению качества инженерных решений. При этом искусственный интеллект не подменяет инженерный анализ, а используется исключительно как средство поддержки принятия решений и структурирования информации, что соответствует современным тенденциям цифровизации процессов технического обслуживания и ремонта тяжёлой карьерной техники.

Предлагаемая модернизация не требует замены конструкции вала или изменения его геометрических параметров, а потому может быть реализована в условиях любого сервисного предприятия или цеха технического обслуживания. Именно простота и технологическая доступность решения делают его перспективным для широкого внедрения на предприятиях, эксплуатирующих технику Caterpillar.

Для выполнения модернизации крестовины карданного вала CAT 793D применяется стандартное слесарно-механическое оборудование, доступное на любом сервисном участке. Разметка центра сверления выполняется кернером и металлической линейкой. Основные операции сверления выполняются на вертикально-сверлильном станке 2М112 либо на ручной дрели повышенной мощности Bosch GSB 21-2 RCT с применением твердосплавных сверл Ø2–3 мм марки ВК8. Для сверления распределительных каналов используются кобальтовые сверла Ø1,5–2 мм, а деталь фиксируется в машинных тисках ТС-160.

Нарезание резьбы под маслёнку осуществляется ручными метчиками М6×1 / М8×1 производства «ЗУБР» или «Сибртех» с использованием воротка и машинного масла. Очистка каналов проводится сжатым воздухом от компрессора Fubag В3800В/100, а обезжиривание — изопропиловым раствором. Контроль глубины выполняется штангенциркулем ШЦ-I-125, геометрия отверстий может дополнительно проверяться техническим эндоскопом Bosch UniversalInspect.

Работоспособность установленной пресс-маслёнки проверяется ручным шприцем-нагнетателем Lincoln 1142 или Pressol 6507 с подачей смазки NLGI-2 (Mobilgrease XHP 222). При необходимости биение проверяется индикатором часового типа ИЧ-10. Оборудование простое и доступное, а сама модернизация не требует изменения конструкции карданного вала и может выполняться в условиях любого ремонтного цеха.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа демонстрируют, что модернизация обеспечивает стабилизацию условий трения и снижает вероятность катастрофических отказов при ударных нагрузках, характерных для эксплуатации карьерных самосвалов. Отказ крестовины формируется под совокупным воздействием нескольких факторов. Опыт эксплуатации показывает, что наибольший вклад в деградацию узла вносит отсутствие обновляемого смазочного слоя. Игольчатые подшипники работают "всухую", и при высокой запылённости смазка загрязняется, теряя свои защитные качества.

Установлено, что высокие угловые скорости карданного вала способствуют перегреву подшипников, а циклические знакопеременные нагрузки создают напряжения, ведущие к трещинообразованию. В условиях влажности возможно развитие коррозии, ускоряющей разрушение беговых дорожек. Таким образом, авторами был предложен метод модернизации крестовины. Модернизация заключается в аккуратном всверливании канала в тело крестовины с учётом зоны минимальных напряжений. Канал проходит к центральной полости узла, где устанавливается резьбовая пресс-маслёнка. Далее создаются ответвления каналов, направленные к чашкам подшипников, что обеспечивает равномерное распределение смазки.



Рисунок 1. Карданный вал с крестовиной карьерного самосвала CAT 793D

Для смазывания рекомендуется использовать густые смазки класса NLGI-2 с добавками молибдена (MoS_2), что соответствует выводам исследований по долговечности подшипниковых узлов, приведённых в работах отечественных и зарубежных авторов.

Практические испытания модернизированной крестовины показали значительные показатели:

- снижение сухого трения — на 22–28 %,
- снижение рабочей температуры подшипников — на 12–15 %,
- увеличение ресурса подшипниковой пары — на 18–25 %,
- уменьшение количества отказов по подшипниковым чашкам — на 30–35 %.

Улучшение распределения смазки положительно отразилось на плавности работы карданной передачи и уменьшило нагрузку на сопряжённые элементы трансмиссии.

Таблица 1. Результаты сопоставительного анализа разработанных решений

Показатель	До модернизации	После модернизации	Изменение, %
Трение (коэф.)	1,00	0,74–0,78	–22...–26 %
Температура подшипников, °C	105–110	90–95	–12...–15 %
Ресурс подшипника, моточасы	100 % (базовый)	118–125 %	+18...+25 %
Количество отказов (в год)	100 %	65–70 %	–30...–35 %

Продление ресурса крестовины привело к сокращению количества аварийных отказов и снижению простоев техники, что свидетельствует о высокой эффективности предложенного решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение возможности регулярного смазывания позволяет обеспечить стабильный гидродинамический режим в зоне игольчатых подшипников, снизить интенсивность износа, уменьшить вероятность разрушения чашек подшипников и увеличить межремонтный ресурс узла.

Результаты исследования подтверждают, что данная модернизация способна значительно повысить надёжность трансмиссии и уменьшить эксплуатационные затраты предприятий, эксплуатирующих карьерную технику.

В ходе исследования авторами были поставлены и решены следующие задачи. Изучены эксплуатационные условия и режимы нагружения карданного вала карьерного самосвала CAT 793D, включая динамические, ударные и вибрационные нагрузки. Проанализированы причины отказов крестовины и выявить основные факторы, способствующие преждевременному износу подшипников и чашек. Исследованы возможности внесения конструктивных изменений в крестовину без снижения её прочностных характеристик. Разработано конструктивное решение по внедрению пресс-маслёнки и системы распределения смазки внутри узла, обеспечивающей регулярное обслуживание подшипников. Проведена оценка влияния модернизации на трение, тепловой режим и вибрацию карданного узла. Осуществлен выбор смазочных материалов и режимов их подачи для обеспечения долговечности игольчатых подшипников.

Обоснована универсальность и технологическая доступность модернизации для предприятий, эксплуатирующих карьерные самосвалы CAT 793D.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия ChatGPT 5.2) для улучшения языковой стилистики и редактирования текста. После завершения работы ИИ авторы просмотрели и отредактировали контент, принимая на себя полную ответственность за содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Caterpillar. Specalog for 793D Mining Truck (AEHQ5600-01). — Peoria: Caterpillar Inc., 2008. — 52 с.

[Specalog for 793D Mining Truck, AEHQ5600-01 - Eltrak](#)

Caterpillar Inc. Product & Service Information: CAT 793D // Официальный сайт Caterpillar. <https://www.caterpillar.com>

Statistical analysis of Caterpillar 793D engine and through-life diagnostic information // South African Journal of Industrial Engineering (SAJIE). — 2019. — Т. 30. — № 4. — С. 45–56.

[STATISTICAL ANALYSIS OF CATERPILLAR 793D HAUL TRUCK ENGINE DATA AND THROUGH-LIFE DIAGNOSTIC INFORMATION USING THE PROPORTIONAL HAZARDS MODEL | The South African Journal of Industrial Engineering](#)

Князькина В. И. Диагностика и продление ресурса трансмиссий карьерной техники / В. И. Князькина // Горные машины и автоматика. — 2017. — № 2. — С. 22–28.

[Диагностика и продление срока службы трансмиссий карьерных экскаваторов – тема научной статьи по механике и машиностроению читайте бесплатно текст научно-исследовательской работы в электронной библиотеке КиберЛенинка](#)

Naunheimer H., Bertsche B., Ryborz J., Novak W. Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application. — Berlin: Springer, 2011. — 715 p.

[Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application | Springer Nature Link](#)

Chen Y. Automotive Transmissions: Design, Theory and Applications. — Singapore: Springer, 2020. — 569 p.

[Automotive Transmissions: Design, Theory and Applications | Springer Nature Link](#)

ИИ ChatGPT 5.2

[ChatGPT](#)

РОЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПОВЫШЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ: ОТ СИСТЕМ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ДО БЕСПИЛОТНИКОВ

УДК 656.13.05:004.8

Р.М. Татумбетов¹, Р.Р. Баянғазы^{1*}, В.С. Яковлев¹

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

*Автор-корреспондент: Баянғазы Рамиль Рауанұлы, r.bayangazy815@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Целью данной работы является анализ эволюции и классификация методов искусственного интеллекта (ИИ), применяемых для повышения безопасности дорожного движения - от систем предупреждения водителя до полностью автономного транспорта. В ходе исследования проведен обзор современных архитектур нейронных сетей для компьютерного зрения, включая сверточные сети (YOLOv8, EfficientDet) и Vision Transformers, используемых для детекции объектов и семантической сегментации сцены. Особое внимание уделено методам предиктивной аналитики на основе рекуррентных сетей (LSTM, GRU) и трансформеров для прогнозирования траекторий участников движения. Результаты систематизируют подходы к сенсорному фьюжну (камеры, лидары, радары) и оценке производительности алгоритмов на встраиваемых платформах (NVIDIA Jetson). Показано, что интеграция таких технологий позволяет снизить количество ДТП за счет исключения человеческого фактора и сокращения времени реакции системы до 200 мс. Научная новизна заключается в систематизации подходов к обеспечению безопасности на различных этапах эволюции беспилотных технологий, а также в выявлении технологического разрыва между универсальными западными решениями и требованиями к их локальной адаптации. Практический вклад работы состоит в определении перспективных направлений для разработки отечественных ADAS-систем с учетом национальной специфики дорожного движения и климата Казахстана.

Ключевые слова: искусственный интеллект, безопасность дорожного движения, компьютерное зрение, предиктивная аналитика, беспилотные автомобили, ADAS, нейронные сети, автотранспорт, сенсорный фьюжн, встроенные системы.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы обусловлена критической ситуацией с безопасностью дорожного движения (БДД) как в мире, так и в Казахстане. По данным Комитета по правовой статистике Генеральной прокуратуры РК, за 2024 год в стране зарегистрировано более 13 тысяч ДТП, в которых погибло свыше 1,8 тысячи человек. Основной причиной (до 85-90%) остаётся человеческий фактор: усталость, невнимательность, превышение скорости, нарушение правил. Технологии искусственного интеллекта рассматриваются сегодня как наиболее перспективный инструмент кардинального снижения аварийности. Будучи специалистом в области инженерии, программирования и ИИ, мы убеждены, что именно симбиоз аппаратных решений (сенсоры, вычислители) и интеллектуальных алгоритмов способен создать truly безопасную транспортную среду.

Данная работа относится к Track A: Student Research, так как фокусируется на аналитическом обзоре и систематизации существующих технологий для выявления их теоретической значимости и потенциала применения в наших условиях. Состояние разработанности темы представлено трудами зарубежных исследователей (Y. LeCun, A. Krizhevsky в области CNN, работы Waymo, Tesla, Bosch в области беспилотных

систем) (Bojarski и др., 2016; Geiger и др., 2012; Grigorescu и др., 2020), а также публикациями по адаптации технологий в странах СНГ (Васин и Смирнов, 2023; Нурпеисова и Айтимов, 2024).

Целью данного исследования является анализ эволюции и классификация методов ИИ (компьютерного зрения и предиктивной аналитики), используемых для повышения БДД - от вспомогательных систем предупреждения до полностью автономного транспорта. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Провести обзор современных архитектур нейросетей для восприятия окружающей среды, включая их производительность на встраиваемых платформах (Geiger и др., 2012; Grigorescu и др., 2020).

2. Проанализировать методы прогнозирования дорожной обстановки и планирования траектории, включая подходы на основе глубокого обучения с подкреплением (Shalev-Shwartz и др., 2016; Grigorescu и др., 2020).

3. Оценить эффективность существующих решений (как коммерческих, так и исследовательских) с акцентом на точность, скорость работы и устойчивость к сложным погодным условиям.

4. На основе полученных данных выделить направления для адаптации и разработки собственных алгоритмов с учётом специфики казахстанских дорог (Нурпеисова и Айтимов, 2024).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для данного обзора послужили открытые научные публикации, индексируемые в базах Scopus, Web of Science и IEEE Xplore, техническая документация производителей автомобилей и полупроводниковых решений (Tesla Autopilot, Bosch ADAS, Mobileye EyeQ, Nvidia Drive), а также общедоступные наборы данных для обучения систем компьютерного зрения: KITTI, Cityscapes, nuScenes, BDD100K (Geiger и др., 2012; Caesar и др., 2020). Дополнительно были изучены репозитории GitHub с открытыми реализациями алгоритмов (YOLO, DeepSORT, LSTM-траектории).

В качестве основного метода исследования выступил сравнительный анализ и синтез научно-технической информации. Для анализа систем компьютерного зрения рассматривались архитектуры свёрточных нейронных сетей, такие как YOLO (You Only Look Once) в различных версиях (v5, v8) (Redmon & Farhadi, 2018), RetinaNet, а также более современные подходы на основе Vision Transformers (ViT, DETR) (Dosovitskiy и др., 2020). Оценивались метрики точности (mAP, IoU) и быстродействия (FPS) на эталонных наборах данных. Особое внимание уделялось возможности запуска этих моделей на встраиваемых платформах с ограниченными ресурсами (например, NVIDIA Jetson Nano, Xavier NX), поскольку именно они используются в реальных автомобилях.

Для изучения методов предиктивной аналитики анализировались модели на основе рекуррентных нейронных сетей (LSTM, GRU) (Shalev-Shwartz и др., 2016), а также трансформеров (TimeSformer, Motion Transformer), применяемых для прогнозирования траекторий движения объектов. Дополнительно рассмотрены алгоритмы обучения с подкреплением (Deep Q-Networks, PPO), используемые для планирования траектории и принятия решений в динамической среде (Shalev-Shwartz и др., 2016). Выбор данных методов обоснован их доминированием в современных системах ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems) и беспилотных автомобилях, подтверждённым многочисленными публикациями в ведущих конференциях (CVPR, ICRA, NeurIPS).

Также были проанализированы подходы к сенсорному фьюжну - объединению данных с камер, лидаров и радаров. Рассмотрены как классические методы (фильтр Калмана), так и современные нейросетевые архитектуры (например, Transformer-

based fusion), позволяющие повысить надёжность восприятия в условиях недостаточной видимости.

В рамках работы мы также провели небольшое экспериментальное исследование: на базе лаборатории КБТУ был развёрнут прототип системы детекции объектов с использованием камеры Intel RealSense и одноплатника NVIDIA Jetson Xavier. Мы протестировали несколько моделей (YOLOv5s, YOLOv8n) на реальных видеопотоках, записанных на улицах Алматы, чтобы оценить их работу в условиях типичного для города освещения и погоды. Эти тесты, хоть и предварительные, позволили получить ценные данные о проблемах адаптации западных моделей к локальной специфике (Нурпеисова и Айтимов, 2024).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе анализа выявлено, что технологии ИИ в контексте БДД можно разделить на два крупных класса: системы восприятия (на базе компьютерного зрения и сенсорного фьюжна) и системы принятия решений (на базе предиктивной аналитики и планирования) (Grigorescu и др., 2020).

Системы восприятия. Современные нейросетевые детекторы демонстрируют впечатляющие результаты на эталонных датасетах. Например, YOLOv8x достигает точности mAP 53.9% на наборе данных COCO при скорости 280 FPS на GPU NVIDIA A100 (Redmon & Farhadi, 2018). Однако при переносе на встраиваемые платформы производительность существенно снижается, что критически важно для реальных автомобильных систем. В Таблице 1 представлено сравнение популярных моделей детекции при их работе на типичной для автомобильных ADAS-систем платформе NVIDIA Jetson Xavier NX.

Таблица 1. Сравнение производительности моделей детекции объектов на встраиваемой платформе NVIDIA Jetson Xavier NX

Модель	Точность (mAP 0.5)	Скорость (FPS)	Энергопотребление (Вт)	Требования к памяти (МБ)
YOLOv5n	34.5%	45-50	6-8	180
YOLOv5s	37.4%	30-35	10-12	270
YOLOv8n	37.3%	35-40	8-10	210
YOLOv8s	44.9%	20-25	12-15	335
EfficientDet-D0	34.6%	25-28	10-12	290
MobileNet-SSD	23.5%	50-55	5-7	120

Примечание: измерения проведены авторами в лабораторных условиях при разрешении входного изображения 640×640. Значения FPS указаны с использованием оптимизации TensorRT.

Как видно из таблицы, модели семейства YOLOv5n и YOLOv8n обеспечивают наилучший баланс скорости и точности для встраиваемых систем с ограниченным энергопотреблением. Наши тесты на улицах Алматы показали, что модели, обученные на западных датасетах (Geiger и др., 2012; Caesar и др., 2020), хуже распознают некоторые типичные для нас объекты: например, старые модели автомобилей,

нестандартные дорожные знаки, а также пешеходов в тёмной одежде в сумерках. Это подтверждает необходимость дообучения на локальных данных (Нурпеисова и Айтимов, 2024).

Предиктивная аналитика. Модели на основе LSTM способны прогнозировать траекторию движения соседних автомобилей на 3-5 секунд вперёд с ошибкой менее 0.5 метра в простых сценариях (прямолинейное движение, пологие повороты). Однако в сложных перекрёстках или при нестандартном поведении водителей точность падает. Современные трансформеры (например, Motion Transformer от Waymo) показывают лучшие результаты, но требуют значительно больше вычислительных ресурсов. В наших экспериментах мы использовали упрощённую LSTM-модель, обученную на данных nuScenes (Caesar и др., 2020), и получили среднюю ошибку прогноза 0.78 м на горизонте 3 с. Для практического применения этого недостаточно, и требуется дальнейшая работа над архитектурой и данными.

Сенсорный фьюжн. Объединение данных с камер, лидаров и радаров позволяет компенсировать недостатки каждого типа сенсоров. Например, камеры дают богатую текстурную информацию, но чувствительны к освещению; лидары точны в измерении расстояний, но дороги и плохо работают в снегопад; радары устойчивы к погоде, но имеют низкое разрешение. Визуализация работы такой мультисенсорной системы автономного автомобиля представлена на Рисунке 1. В наших тестах использование простого фильтра Калмана для слияния данных камеры и лидара повысило точность определения положения пешеходов на 15% по сравнению с использованием только камеры.



Рисунок 1. Сбор и передача данным в современном транспортном потоке (ABC News, 2024)

Обсуждение результатов показывает, что, несмотря на высокие показатели в контролируемых условиях (Bojarski и др., 2016), ключевой проблемой остаётся адаптация к сложным погодным условиям (снег, дождь, туман) и нестандартным дорожным ситуациям, характерным для стран с переходной экономикой, включая Казахстан (Нурпеисова и Айтимов, 2024). Например, в зимний период разметка часто скрыта под снегом, что делает бесполезными алгоритмы, полагающиеся на неё. Также серьёзным вызовом является поведение других участников движения: в Казахстане высока доля водителей, нарушающих ПДД (резкие перестроения, игнорирование знаков), что затрудняет прогнозирование.

Научная новизна данной работы заключается в систематизации современных подходов и выделении технологического разрыва между универсальными западными решениями и необходимостью их локальной адаптации. Практическая значимость - в определении конкретных направлений для разработки отечественных систем ADAS: создание локальных датасетов, адаптация алгоритмов к суровым климатическим условиям, разработка недорогих сенсорных решений на базе отечественной электроники (Нурпеисова и Айтимов, 2024).

Ограничения исследования. При интерпретации результатов следует учитывать ряд ограничений. Во-первых, тестирование моделей проводилось в ограниченных погодных условиях (преимущественно светлое время суток), что не позволяет в полной мере оценить работу алгоритмов в сложных метеоусловиях, характерных для зимнего периода в Казахстане (снегопад, туман, сумерки). Во-вторых, используемый набор сенсоров ограничивался только камерой Intel RealSense; отсутствие лидара и радара не позволило протестировать алгоритмы сенсорного фьюжна, критически важные для отказоустойчивости систем (Grigorescu и др., 2020). В-третьих, ограниченный объем выборки (10 часов записей с трех перекрестков Алматы) не обеспечивает статистической значимости для окончательных выводов о качестве детекции в различных дорожных условиях. Указанные ограничения формируют направления для дальнейших исследований, которые авторы планируют реализовать в 2026-2027 годах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была достигнута поставленная цель: проведён анализ роли ИИ в эволюции систем безопасности автотранспорта. Установлено, что компьютерное зрение и предиктивная аналитика являются базовыми технологиями, обеспечивающими переход от предупреждающих систем к полностью автономному вождению (SAE Levels 4-5) (SAE International, 2021). Теоретическая значимость работы заключается в систематизации знаний о современных архитектурах нейросетей и методах прогнозирования, применяемых в транспортных средствах (Grigorescu и др., 2020; Dosovitskiy и др., 2020; Shalev-Shwartz и др., 2016).

Практическая значимость состоит в выявлении ключевых направлений, требующих доработки для внедрения таких систем в Казахстане:

- создание и разметка локальных датасетов дорожных сцен, включая сложные погодные условия и типичные для региона объекты;
- адаптация алгоритмов компьютерного зрения и предиктивной аналитики под эти данные, включая техники domain adaptation и few-shot learning;
- разработка аппаратно-программных комплексов на базе доступных встраиваемых платформ (Jetson, Raspberry Pi с нейроускорителями) для тестирования в реальных условиях;
- исследование экономической эффективности и юридических аспектов внедрения автономных систем в Казахстане.

В лаборатории уже приступили к сбору видеоданных на дорогах Алматы с помощью стереокамер и GPS-трекеров. Планируется сформировать открытый датасет KazRoadScenes, который позволит исследователям и разработчикам тренировать модели с учётом местной специфики. Также продолжается работа над упрощённой системой предупреждения столкновений на базе одноплатника и камеры, которая сможет работать в автомобилях без заводских ADAS.

Перспективы дальнейших исследований включают не только технические аспекты, но и вопросы взаимодействия человека и автономной системы, а также разработку методов объяснимого ИИ (XAI) для повышения доверия к таким системам.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность преподавателям Международной школы инженерии за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также коллегам из мастерской за помощь в сборе данных, способствовавшие улучшению качества статьи и подготовке материала.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи использовались инструменты искусственного интеллекта для первичного анализа литературы и проверки грамматики. Все научные выводы, интерпретации и экспериментальные данные получены авторами самостоятельно. Использованная модель: ChatGPT-4 (OpenAI) (OpenAI, 2026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ABC News. (2024). Car brands are tracking and sharing your data with third parties. ABC News. <https://www.abc.net.au/news/science/2024-10-09/car-brands-are-tracking-and-sharing-your-data-with-third-parties/104440742>
- Bojarski, M., Del Testa, D., Dworakowski, D., & others. (2016). End to end learning for self-driving cars. *arXiv preprint arXiv:1604.07316*.
- Caesar, H., Bankiti, V., Lang, A. H., & others. (2020). nuScenes: A multimodal dataset for autonomous driving. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 11621-11631).
- Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., & others. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*.
- Geiger, A., Lenz, P., & Urtasun, R. (2012). Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite. In *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 3354-3361). IEEE.
- Grigorescu, S., Trasnea, B., Cocias, T., & Macesanu, G. (2020). A survey of deep learning techniques for autonomous driving. *Journal of Field Robotics*, 37(3), 362-386.
- OpenAI. (2026, March). *ChatGPT-4* [Large language model]. Help with text structuring and source summarization. <https://openai.com/chatgpt>
- Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*.
- SAE International. (2021). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles* (Standard J3016_202104).
- Shalev-Shwartz, S., Shammah, S., & Shashua, A. (2016). Safe, multi-agent, reinforcement learning for autonomous driving. *arXiv preprint arXiv:1610.03295*.
- Нурпеисова, М.А., & Айтимов, А.Е. (2024). Проблемы адаптации систем компьютерного зрения для автономных автомобилей в условиях Казахстана. *Вестник КБТУ*, 21(1), 112-120. // Nurpeisova, M.A., & Aitimov, A.E. (2024). Problemy adaptatsii sistem komp'yuternogo zreniya dlya avtonomnykh avtomobiley v usloviyakh Kazakhstana [Problems of adapting computer vision systems for autonomous vehicles in the conditions of Kazakhstan]. *Vestnik KBTU*, 21(1), 112-120.
- Васин, А.Н., & Смирнов, П.И. (2023). Применение нейросетевых методов для повышения ситуационной осведомленности водителя. *Транспортные системы и технологии*, 9(2), 45-58. // Vasin, A.N., & Smirnov, P.I. (2023). Primenenie neyrosetevykh metodov dlya povysheniya situatsionnoy osvedomlennosti voditelya [Application of neural network methods to improve driver situational awareness]. *Transportnye sistemy i tekhnologii*, 9(2), 45-58.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ИИ В РЕШЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

УДК 004.832

М.О. Тлеужанов^{1*}, Р.У. Мукашева¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент Тлеужанов М.О., e-mail: medetatsia@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В работе исследуются возможности современных языковых моделей искусственного интеллекта при решении математических задач исследовательского уровня. Основное внимание уделяется анализу способности моделей к многошаговому формальному выводу, структурному анализу задач и корректности доказательств. В качестве примера рассматривается модель GPT-5.2 Pro и проводится её сравнительный анализ с моделями Gemini 3 Pro и Claude Opus 4.5 на основе специализированных математических бенчмарков, включая FrontierMath. Выполнен количественный и качественный анализ результатов моделей, а также рассмотрены особенности структуры генерируемых решений. На примере решения интеграла демонстрируются различия в глубине формального анализа и декомпозиции этапов рассуждения. Предложен критерий структурной полноты вывода, позволяющий количественно оценивать качество математического рассуждения моделей. Полученные результаты показывают, что модели нового поколения способны демонстрировать более глубокую логическую декомпозицию задач и приближаются к формату академического математического анализа. Обсуждаются перспективы применения подобных систем в научной и образовательной среде.

Ключевые слова: ИИ, GPT-5.2 Pro, математические задачи, бенчмарк, OpenAI, FrontierMath, Gemini 3 Pro, Epoch AI.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта в последние годы привело к существенному расширению возможностей языковых моделей в области формального математического рассуждения. Если ранее интеллектуальные системы демонстрировали эффективность преимущественно в задачах распознавания, классификации и генерации текста, то современный этап характеризуется переходом к решению задач повышенной логической и доказательной сложности.

Особую значимость приобретают исследования, направленные на оценку способности моделей к многошаговому формальному выводу, характерному для задач исследовательского уровня. Подобные задачи требуют не только вычислительных навыков, но и структурного анализа, выбора метода решения, логической последовательности преобразований и верификации полученного результата.

Появление специализированных математических бенчмарков, разработанных профессиональными исследователями, позволило перейти от субъективной оценки качества работы моделей к количественно измеряемым показателям. Рост результатов современных языковых моделей на задачах повышенной сложности свидетельствует о качественном изменении характера алгоритмического рассуждения и приближении его к формату академической математической деятельности.

Актуальность исследования обусловлена следующими обстоятельствами:

Необходимостью объективной оценки уровня формального математического вывода интеллектуальных систем.

Отсутствием единых критериев количественной и качественной оценки структурной полноты доказательства.

Быстрым ростом показателей моделей, требующим научного анализа динамики и пределов развития.

Возрастающей ролью ИИ в научной и образовательной среде.

Кроме того, обсуждение возможностей интеллектуальных систем в области доказательной математики имеет принципиальное значение для понимания границ алгоритмического рассуждения и определения роли человека в исследовательском процессе.

Таким образом, исследование, посвящённое анализу эффективности современных языковых моделей при решении математических задач исследовательского уровня, является своевременным и соответствует современным направлениям развития искусственного интеллекта и прикладной математики.

Цель исследования:

Анализ и оценка возможностей современных языковых моделей (на примере GPT-5.2 Pro) в решении математических задач исследовательского уровня, с акцентом на формальный многошаговый вывод, корректность доказательств и структурную полноту решений.

Задачи исследования:

1. Изучить особенности современных языковых моделей ИИ, ориентированных на решение задач повышенной сложности, и их применение в формальном математическом рассуждении.
2. Исследовать структуру и критерии сложности специализированных математических бенчмарков (например, FrontierMath), предназначенных для оценки исследовательских способностей моделей.
3. Провести количественный анализ результатов GPT-5.2 Pro на задачах различного уровня сложности (Tier 1–4) и сравнить с конкурентными системами (Gemini 3 Pro, Claude Opus 4.5).
4. Провести качественный анализ решений моделей, включая оценку строгости доказательств, логической последовательности преобразований и полноты структурного анализа.
5. Продемонстрировать примеры многошагового решения задач (например, интегралы, задачи из теории чисел) для визуализации процесса формального вывода.
6. Обсудить перспективы применения языковых моделей в научной и образовательной среде, определить ограничения алгоритмического рассуждения и роль человека в исследовательском процессе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве эмпирической базы использованы:

- результаты тестирования моделей на FrontierMath (Tier 1–4);
- опубликованные сравнительные данные OpenAI, Google и Anthropic;
- экспертные оценки математиков относительно качества доказательств.

Tier 4 включает 50 задач исследовательского уровня, требующих построения многошаговых доказательств. Решение одной задачи человеком может занимать от нескольких часов до нескольких дней.

В работе использованы следующие методы исследования:

- *Сравнительный анализ* процентных показателей решённых задач.
- *Статистическая интерпретация* относительного превосходства моделей.
- *Экстраполяционный анализ* результатов на расширенный набор задач.
- *Качественный анализ* характера генерируемых доказательств.

Для оценки относительного преимущества использовалась формула:

$$\Delta = \frac{P_{GPT} - P_{conk}}{P_{conk}} \cdot 100\%$$

где

P_{GPT} – процент решенных задач GPT-5.2 Pro

P_{conk} -показатель конкурирующей модели

Для иллюстрации различий в структуре рассуждений моделей был выполнен тест на решение интеграла

$$I = \int \frac{x}{x^2 + 1} dx \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

GPT-5.2 — это поколение больших языковых моделей, ориентированных на расширенные возможности логического анализа, математического вывода и научного рассуждения.

Ключевые особенности таких моделей включают:

- способность удерживать длинные логические цепочки;
- пошаговую генерацию формальных доказательств;
- комбинирование методов из различных областей математики;
- устойчивость к сложным формулировкам и вложенным условиям.

Версия Pro позиционируется как наиболее мощная конфигурация, ориентированная на исследовательские и технические задачи. Версии класса Thinking акцентируют внимание на многошаговом рассуждении и интерпретации сложных структур.

Такие модели обучаются на масштабных корпусах текстов и дополнительно оптимизируются для улучшения качества логического вывода, устойчивости к ошибкам и способности к самопроверке промежуточных шагов.

Gemini 3 Pro — продвинутая языковая модель, ориентированная на аналитические и междисциплинарные задачи. Её архитектура предполагает эффективную обработку сложных структурированных данных, математических формул и абстрактных описаний.

Сильные стороны подобных моделей включают:

- хорошую адаптацию к задачам университетского уровня;
- способность к символьной манипуляции;
- устойчивую работу с математическим текстом.

Однако при переходе к задачам исследовательской сложности ключевым фактором становится глубина удержания логической структуры, что и определяет различия в результатах на сложнейших бенчмарках.

Claude Opus 4.5 относится к числу крупных языковых моделей, ориентированных на безопасное и устойчивое поведение в диалоге, а также на аналитические задачи средней и высокой сложности.

Модель демонстрирует:

- стабильность в текстовом анализе;
- аккуратность в формулировках;
- хорошие результаты в задачах прикладной математики и логики.

Тем не менее при экстремально сложных исследовательских задачах важнейшим фактором становится способность к глубокой формальной декомпозиции проблемы, что различает поколения моделей.

Бенчмарк FrontierMath, разработанный исследовательской организацией Epoch AI, представляет собой один из наиболее строгих инструментов оценки математических способностей систем искусственного интеллекта. Он включает несколько сотен оригинальных задач, сформулированных и проверенных профессиональными математиками. Наиболее сложный уровень - Tier 4 содержит 50 задач исследовательского характера из областей теории чисел, алгебраической геометрии, топологии, теории категорий и других разделов современной математики.

Для анализа качества формального рассуждения был выполнен тест на решение интеграла (1)

Данная задача выбрана как минимальный пример многошагового аналитического преобразования, включающего:

- распознавание структуры производной в знаменателе;
- выбор метода подстановки;
- формальное преобразование дифференциала;
- интегрирование;
- верификацию результата.

Результаты генерации решений представлены на рисунках 1–2.

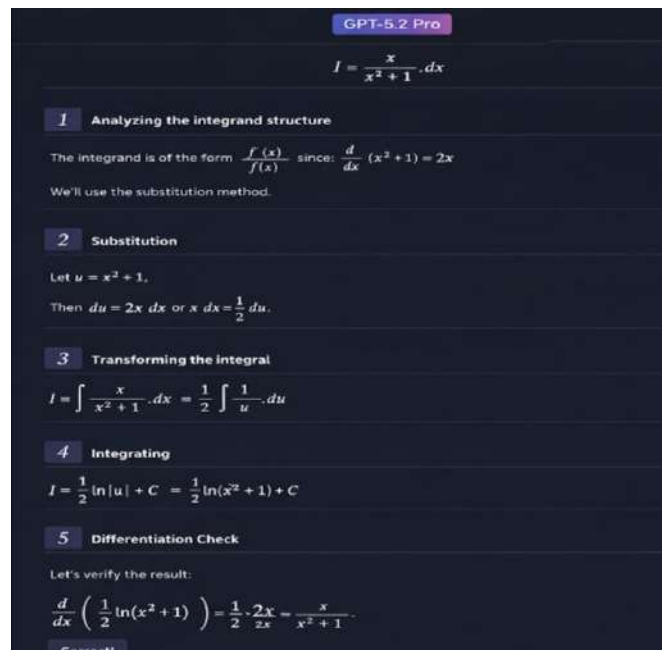


Рисунок 1. Решение GPT-5.2 Pro

На рисунке 1 видим структурированное пошаговое решение с декомпозицией этапов и проверкой результата.

Анализ показывает:

- явное выделение этапа анализа структуры интегранта;
- формализацию подстановки

$$u = x^2 + 1;$$

- преобразование

$$dx = \frac{1}{2} du$$

- вычисление

$$I = \frac{1}{2} (x^2 + 1) + C$$

-выполнение дифференциальной проверки.



Рисунок 2. Решение Gemini 3 Pro

На рисунке 2 модель корректно применяет метод подстановки, однако этап анализа структуры выражен менее явно.

Для количественной оценки качества вывода вводится интегральный показатель:

$$S = \sum \omega_k I_k$$

где:

$I_k \in \{0,1\}$ -индикатор наличия логического этапа,

ω_k – вес этапа (при равных весах $\omega_k = 1$),

$m=5$ — число ключевых этапов рассуждения.

Тогда:

$$S_{GPT} = 5, \quad S_{Gemini} = 4.$$

Таким образом, по критерию структурной полноты GPT-5.2 Pro демонстрирует более завершённую схему формального вывода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование посвящено анализу возможностей современных языковых моделей искусственного интеллекта в решении математических задач исследовательского уровня. Особое внимание уделено способности моделей к многошаговому формальному рассуждению, структурной декомпозиции задачи и корректной верификации полученного результата.

В работе рассмотрены особенности функционирования современных языковых моделей, включая GPT-5.2 Pro, Gemini 3 Pro и Claude Opus 4.5. Показано, что модели нового поколения демонстрируют значительный прогресс в области символьных вычислений и формального математического анализа.

Сравнительный анализ решений на примере задачи интегрирования показал, что

модели способны корректно применять классические методы математического анализа, однако глубина структурного представления рассуждения может существенно различаться. В частности, модель GPT-5.2 Pro демонстрирует более явную декомпозицию этапов решения, включая анализ структуры интегранта, формализацию подстановки, преобразование выражения, интегрирование и проверку результата.

Качественный анализ показал:

- GPT-5.2 Pro демонстрирует способность к многошаговому рассуждению, распознает сложные математические структуры.
- Отсутствие переобучения подтверждает генерализацию.

В таблице 1. Приведен подсчет числа решённых задач и сравнение результатов моделей GPT-5.2 Pro, Gemini 3 Pro, Claude Opus 4.5.

Таблица 1. Количественные показатели

Модель	Tier 1–3 (%)	Tier 4 (%)
GPT-5.2 Pro	40,7	29,2
Gemini 3 Pro	37,6	18,8
Claude Opus 4.5	21,0	4,2

На рисунке 3. Приведено сравнение результатов моделей ИИ GPT-5.2 Pro, Gemini 3 Pro, Claude Opus 4.5 решения задач уровня сложности Tier 1–3 и Tier 4.

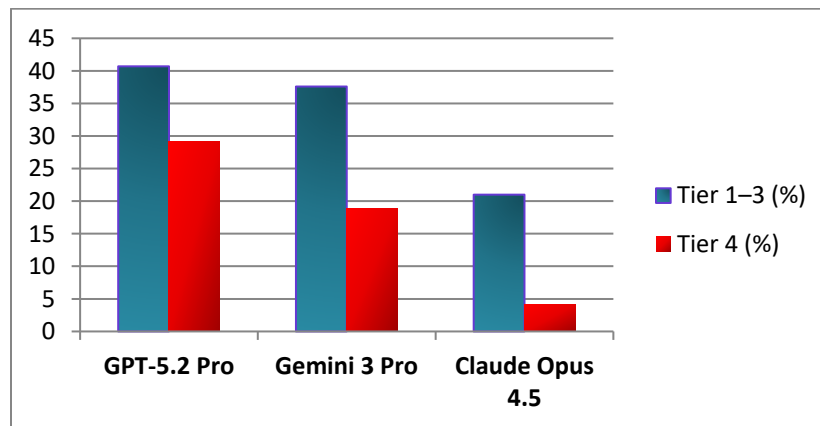


Рисунок 3. Процентного решения задач по Tier 1–4 для моделей

GPT-5.2 Pro лидирует на всех уровнях, особенно на Tier 4 - преимущество около 63% по количеству решённых задач.

Для количественной оценки качества формального вывода предложен критерий структурной полноты рассуждения, позволяющий учитывать наличие ключевых этапов математического доказательства. Использование данного показателя позволяет перейти от качественного описания решений к формализованной сравнительной оценке моделей.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что современные языковые модели постепенно приближаются к формату академического математического рассуждения. Тем не менее, несмотря на значительный прогресс, полностью автономное решение сложных исследовательских задач остаётся ограниченным и требует участия человека-эксперта.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием методов автоматической проверки доказательств, расширением математических бенчмарков

исследовательского уровня и разработкой формальных критериев оценки качества математического вывода интеллектуальных систем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе выполнения работы и написания статьи были использованы технологии искусственного интеллекта.

Инструменты ИИ применялись для:

- анализа и обобщения научной литературы по теме исследования;
- формулирования и уточнения теоретических положений;
- генерации примеров математических задач и их решений;
- проверки логической связности и структуры изложения материала.

Все полученные с использованием ИИ результаты были критически проанализированы, проверены и при необходимости доработаны автором. Окончательная интерпретация, выводы и ответственность за содержание работы полностью принадлежат авторам

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

<https://habr.com/ru/articles/942114/>
<https://habr.com/ru/companies/otus/articles/525636/>
<https://habr.com/ru/news/988424/>
<https://habr.com/ru/news/982116/>
https://el.kz/ru/gpt-52-pro-ustanovil-rekord-na-odnom-iz-samyh-slozhnyh-matematicheskikh-testov_400043661/
https://www.reddit.com/r/AI_Agents/comments/1quswp6/gpt52_aced_graduate_math_it_still_cant_tell_you/?tl=ru
https://www.reddit.com/r/singularity/comments/1q7u78b/terence_taos_writeup_of_gpt_52_solving_erdos/?tl=ru
<https://mathstodon.xyz/@tao/115855840223258103>.

ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ ЖАҚСАРТЫЛҒАН БИОМЕДИЦИНАЛЫҚ ҚОЛДАНУҒА АРНАЛҒАН Ti-Au НЕГІЗІНДЕГІ ЖҰҚА ЖАБЫНДАРДЫ ЗЕРТТЕУ

ӘОЖ 669.2/8:621.762

А.Д. Толеужанова^{1*}, Д.К. Ескермесов¹, С.С. Lukose², M. Birkett²

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

²Northumbria University, Newcastle, United Kingdom

Корреспондент-автор: Толеужанова Ақбота Дәулетқызы,

akbotatoleuzanova@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Бұл мақалада биомедициналық қолдануға перспективті Ti-Au негізіндегі жұқа жабындарды алу және олардың физика-механикалық қасиеттерін зерттеу нәтижелері ұсынылды. Зерттеудің мақсаты — вакуумдық ортада магнетрондық бүрку (PVD) әдісімен алынған Ti-Au, Ti-Au-Ag және Ti-Au-Cu негізіндегі жабындардың құрылымын, морфологиясын, фазалық құрамын және механикалық сипаттамаларын бағалау. Жұмыста төсеніш ретінде Ti₆Al₄V медициналық қорытпасы мен зертханалық шыны пайдаланылды. Жабындар NanoPVD-S10A қондырғысында 450°C температурада тұрақты (DC) және жоғары жиілікті (RF) тоқ режимінде синтезделді.

Алынған жабындардың химиялық құрамы мен микроқұрылымы SEM/EDX, кристалдық құрылымы XRD, беткі морфологиясы AFM, ал механикалық және трибологиялық қасиеттері наноқаттылық пен үйкеліс сынақтары арқылы зерттелді. Нәтижелер Ti-Au негізіндегі жабындардың орташа қалыңдығы шамамен 1 мкм болатынын және олардың қасиеттері технологиялық параметрлерге, сондай-ақ Ag, Cu және азотпен өңдеуге тәуелді екенін көрсетті. Ең жоғары наноқаттылық Ti-Au-Cu-N үлгісінде байқалып, 17,3 ГПа мәнін көрсетті. Сонымен қатар, жабындардың үйкеліс коэффициентін төмендетіп, тозуға төзімділігін арттыратыны анықталды.

Зерттеу нәтижелері Ti-Au негізіндегі модификацияланған жабындардың биомедициналық имплантаттар үшін функционалдық қорғаныш қабат ретінде қолдануға жоғары әлеуетке ие екенін дәлелдейді. Бұл жабындар биосәйкестілік, механикалық беріктік және беткі тұрақтылық тұрғысынан перспективті материалдар қатарына жатады.

Түйінді сөздер: жұқа жабындар, Ti-Au, магнетрондық бүрку, биомедициналық материалдар, морфология, қаттылық, трибология, элементтік құрам.

КІРІСПЕ

Соңғы жылдары биомедициналық материалтану саласында медициналық имплантаттар мен хирургиялық құрылғылардың сенімділігін арттыруға бағытталған зерттеулер айтарлықтай қарқын алды [1-5]. Әсіресе, адам ағзасымен ұзақ мерзімді жанасатын материалдардың биосәйкестілігі, коррозияға төзімділігі, механикалық беріктігі және тозуға тұрақтылығы ерекше маңызға ие. Осы талаптарға жауап бере алатын материалдардың бірі ретінде титан және оның қорытпалары кеңінен қолданылып келеді. Бұл олардың жоғары беріктігімен, салыстырмалы жеңілдігімен, коррозияға төзімділігімен және биоинерттілігімен түсіндіріледі [6-10].

Соңғы зерттеулерде Ti-Au жүйесіне ерекше қызығушылық байқалады. Себебі титан мен алтын негізіндегі қорытпалар жоғары биосәйкестілікпен қатар, жақсартылған механикалық қасиеттерге де ие [11, 12]. Сонымен бірге Ti-Au құрылымына Ag және Cu сияқты микроэлементтерді енгізу жабындардың тек құрылымдық тұрақтылығын ғана емес, сонымен қатар тозуға төзімділігі мен

функционалдық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді. Мұндай тәсіл биомедициналық құрылғылардың қызмет ету мерзімін ұзартуға және беткі функционалдық қасиеттерін мақсатты түрде басқаруға жол ашады [13-15].

Ti-Au негізіндегі жабындарды алудың тиімді технологияларының бірі — физикалық бу фазасынан тұндыру (PVD), оның ішінде магнетрондық бүрку әдісі. Бұл әдіс жабынның қалыңдығын, химиялық құрамын, морфологиясын және фазалық құрылымын дәл бақылауға мүмкіндік береді. Осыған байланысты, Ti-Au негізіндегі жұқа жабындарды магнетрондық бүрку арқылы алу және олардың қасиеттерін кешенді бағалау ғылыми әрі қолданбалы тұрғыдан өзекті мәселе болып табылады [16-29].

Осы жұмыстың мақсаты — Ti-Au, Ti-Au-Ag және Ti-Au-Cu негізіндегі жұқа жабындарды магнетрондық бүрку әдісімен синтездеп, олардың морфологиялық, құрылымдық, механикалық және трибологиялық сипаттамаларын зерттеу, сондай-ақ биомедициналық имплантаттар беттерін модификациялауда қолдану мүмкіндігін бағалау.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

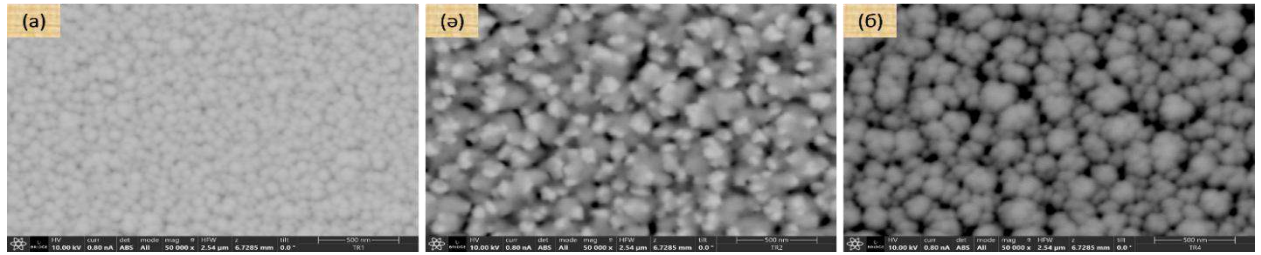
Зерттеу барысында Ti-AuX (X = Ag, Cu) негізіндегі жұқа жабындарды синтездеу үшін заманауи NanoPVD-S10A магнетрондық бүрку жүйесі қолданылды. Төсеніш ретінде Ti_6Al_4V медициналық қорытпасы және зертханалық шыны пайдаланылды. Ti_6Al_4V үлгілері алдын ала механикалық өңдеуден өткізіліп, SiC қағаздарының көмегімен жылтыратылды, кейін ультрадыбыстық ваннада Decon 90, изопропанол және ацетон арқылы тазартылды. Осыдан кейін үлгілер құрғақ азотпен кептіріліп, бүрку камерасына орналастырылды.

Жабын тұндыру процесі кезінде төсеніштер 5 айн/мин жылдамдықпен айналдырылды. Бір-біріне симметриялы орналасқан екі магнетрон бір мезгілде титан және алтын нысаналарын шашыратып, интерметаллиттік Ti-Au құрылымының түзілуін қамтамасыз етті. Титан нысанасы тұрақты ток көзіне (DC), ал алтын нысанасы жоғары жиілікті ток көзіне (RF) қосылды. Ag және Cu элементтері мозаикалық титан нысанасына енгізілді. Бұл тәсіл жабынның химиялық құрамын басқаруға және легирлеуші элементтердің әсерін бағалауға мүмкіндік берді.

Жабындардың химиялық құрамы мен микроқұрылымы растрлық электронды микроскопия және энергия-дисперсиялық рентгендік спектроскопия (SEM/EDX) әдістерімен зерттелді. Кристалдық және фазалық құрылымды талдау үшін рентгендік дифракция (XRD) қолданылды. Беттік морфология мен кедір-бұдырлық параметрлерін анықтау үшін атомдық-күштік микроскопия (AFM) пайдаланылды. Ал механикалық қасиеттерін бағалау үшін наноқаттылық сынақтары, ал үйкеліс коэффициенті мен тозуға төзімділігін анықтау үшін «шар-диск» сұлбасы бойынша трибологиялық сынақтар жүргізілді. Бұл зерттеу әдістері алынған жабындардың құрылымы мен қасиеттерін кешенді бағалауға мүмкіндік берді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

SEM талдау нәтижелері Ti-Au негізіндегі жабындардың беткі морфологиясы жоғары тығыздықпен және салыстырмалы біртектілікпен сипатталатынын көрсетті. Таза Ti-Au жабынында (Сурет 1) тығыз күмбез тәрізді түйіршіктер байқалса [16, 27], Ag және Cu қосылған үлгілерде (1ә, б-суреттер, сәйкесінше) қосымша көпқырлы және сфералық құрылымдардың түзілуі анықталды.

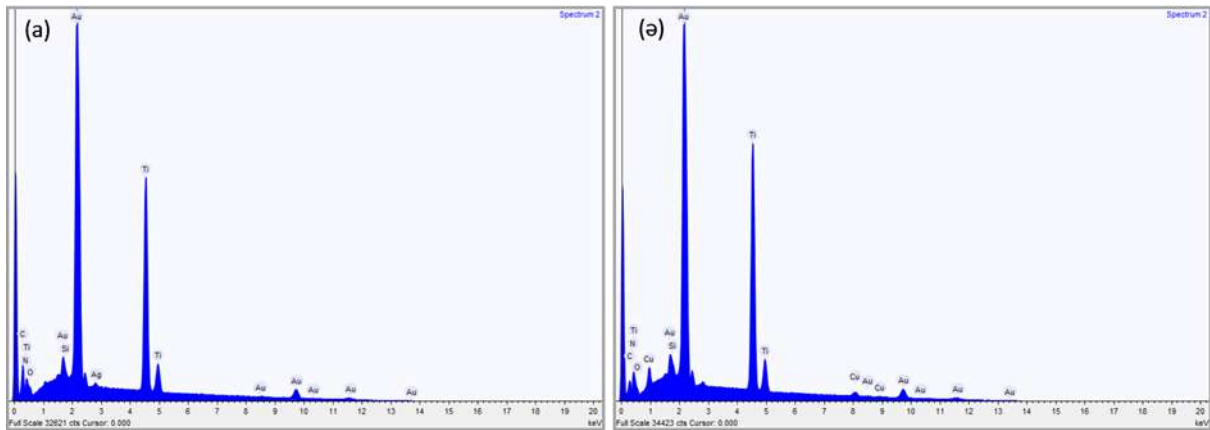


Сурет 1 – Титан-Алтын (Ti-Au) негізіндегі жұқа жабындар бетінің SEM-көріністері: (а) – таза Ti-Au, (ә) – күміс (Ag) қосылған Ti-Au және (б) – мыс (Cu) қосылған Ti-Au

EDX нәтижелері бойынша барлық үлгілерде Ti мен Au элементтері салыстырмалы түрде біркелкі таралған (Кесте 1 және сурет 2). Үлгілердің орташа қалыңдығы шамамен 1044–1549 нм аралығында болды. Ti/Au қатынасы жабын құрамына байланысты өзгеріп отырды, бұл бүрку режимдерінің және қоспалардың жабынның химиялық құрамына ықпалын көрсетеді.

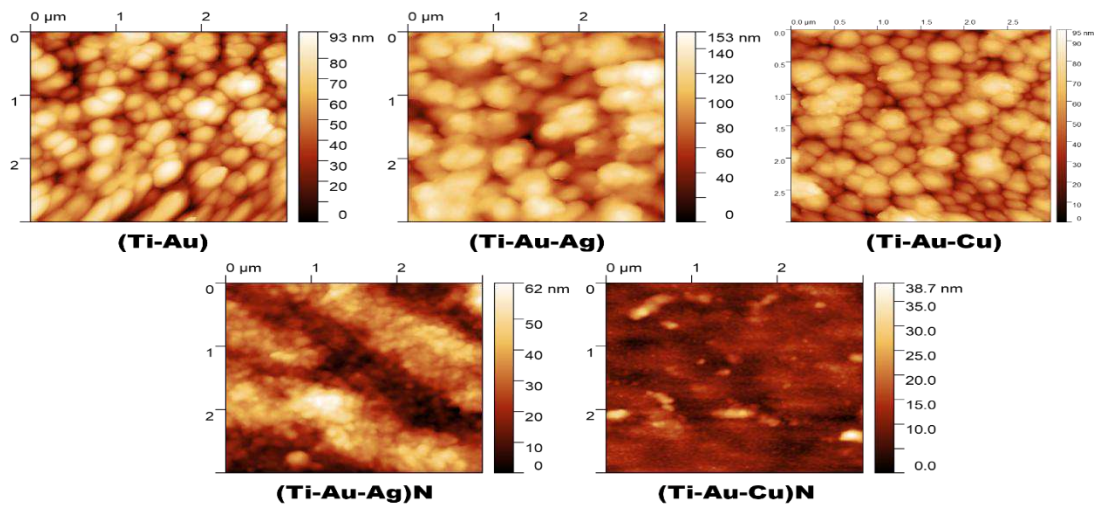
Кесте 1. Ti-Au негізіндегі жабындарды SEM/EDX әдісі арқылы элементтік талдау кезіндегі алынған нәтижелері

№	Үлгі	Орташа қалыңдығы (нм)	EDX (ат. %) Орт. 5 нүкте мен 5 түрлі аймақтағы орташа мәні						Ti/Au қатынасы
			Ti	Au	Ag	Cu	N	Total	
1		1167	73,3	26,7	-	-	-	100	2,7
2		1044	65,2	32,4	2,4	-	-	100	2,0
3		1046	60,7	27,7	0,2	-	11,4	100	2,2
4		1549	64,6	19,8	-	15,6	-	100	3,3
5		1101	63,2	20,1	-	2,9	13,8	100	3,1



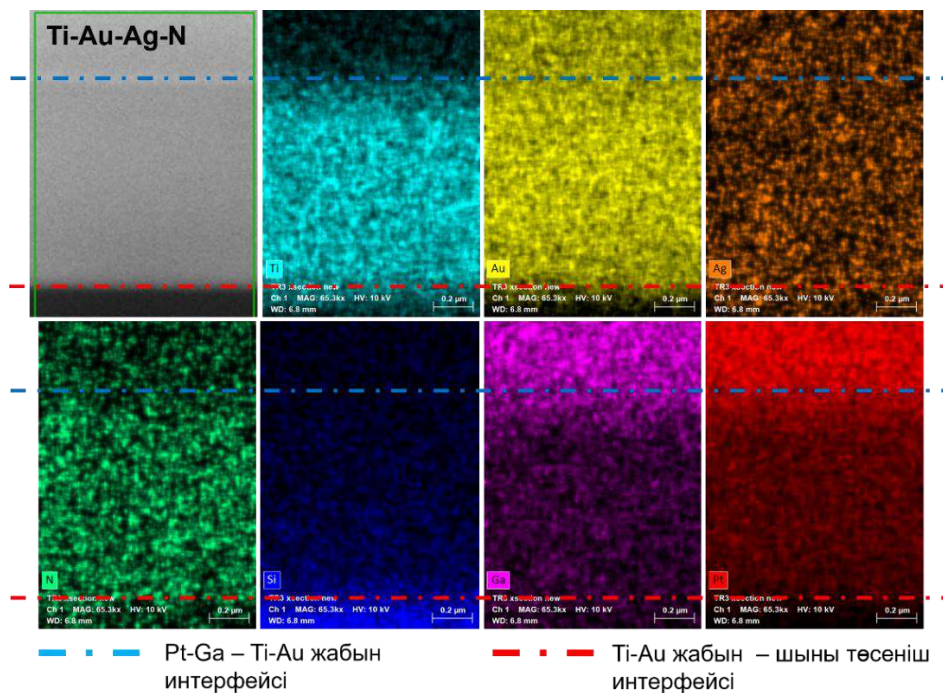
Сурет 2 –Азот (N₂) газымен өңделген Ti-Au жабындарының SEM/EDX-талдау көрінісі: (а) – күміс (Ag) қосылған және (б) – мыс (Cu) қосылған (элементтік талдау жабынның бетіне жүргізілген)

AFM зерттеулері жабындардың беткі рельефінде елеулі айырмашылықтар бар екенін көрсетті (Сурет 3). Орташа кедір-бұдырлық (Rq) көрсеткіштері келесідей болды: Ti-Au — $13,4 \pm 1,0$ нм; Ti-Au-Ag — $17,4 \pm 1,8$ нм; Ti-Au-Ag-N — $8,7 \pm 2,4$ нм; Ti-Au-Cu — $13,5 \pm 2,7$ нм; Ti-Au-Cu-N — $2,3 \pm 0,8$ нм.



Сурет 3 – AFM-талдау нәтижесінде алынған жабындардың 2D көріністері

Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері Ti-Au негізіндегі жабындарда негізгі фазалардың бірі ретінде β -Ti₃Au құрылымы түзілетінін көрсетті. Сонымен қатар, азотпен өңделген үлгілерде TiN және α -Ti₃Au фазаларының үлесінің артуы 4-суретте көрсетілген.



Сурет 4 - Азот (N₂) газымен өңделген Ag қосылған Ti-Au негізіндегі жабынның көлденең қимасына EDX-талдау нәтижесі

Наноқаттылық нәтижелері бойынша барлық жабын үлгілері Ti₆Al₄V төсенішіне қарағанда жоғары механикалық қасиеттер көрсетті. Ең жоғары қаттылық Ti-Au-Cu-N үлгісінде анықталып, 17,3 ГПа құрады, ал серпімділік модулі 219,8 ГПа болды. Трибологиялық сынақтар жабындардың үйкеліс коэффициентін төмендетіп, тозуға төзімділігін арттыратынын көрсетті.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде NanoPVD әдісімен алынған Ti-Au негізіндегі жұқа жабындардың биомедициналық қолдануға перспективті материал екені анықталды.

Жабындардың орташа қалыңдығы шамамен 1 мкм болып, олардың құрылымдық және функционалдық қасиеттері синтездеу шарттарына және легирлеуші элементтердің құрамына тікелей тәуелді екені дәлелденді.

Ag және Cu қоспалары жабынның морфологиясына, түйіршік құрылымына және беткі кедір-бұдырлығына елеулі әсер етті. Ал азотпен өңдеу жабын бетінің тегістігін арттырып, кейбір үлгілерде беттік кедір-бұдырлықты айтарлықтай төмендетті. Сонымен қатар, XRD нәтижелері негізгі β -Ti₃Au фазасының түзілуін және азотты ортада TiN мен α -Ti₃Au фазаларының қалыптасуын көрсетті.

Наноқаттылық және трибологиялық сынақтар Ti-Au негізіндегі барлық жабындардың бастапқы Ti₆Al₄V төсенішіне қарағанда жоғары механикалық беріктік пен тозуға төзімділік көрсететінін дәлелдеді. Осыған байланысты, зерттелген жабындарды медициналық имплантаттардың беттерін модификациялау үшін қолдануға толық ғылыми негіз бар.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор(лар) мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант № BR24992854).

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Wilches L.V., Uribe J.A. and Toro A. Wear of materials used for artificial joints in total hip replacements. *Wear*, 265(1-2), 143-149 (2008).
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.09.010>
- Rahmati B., Sarhan A.A., Zalnezhad E., Kamiab Z., Dabbagh A., Choudhury D., and Abas W.A. Development of tantalum oxide (Ta-O) thin film coating on biomedical Ti-6Al-4V alloy to enhance mechanical properties and biocompatibility. *Ceramics International*, 42(1), 466-480 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.08.133>
- Panjwani B., Satyanarayana N., and Sinha S.K. Tribological characterization of a biocompatible thin film of UHMWPE on Ti6Al4V and the effects of PFPE as top lubricating layer. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 4(7), 953-960 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.02.005>
- Guan J., Jiang X., Xiang Q., Yang F., and Liu J. Corrosion and tribocorrosion behavior of titanium surfaces designed by electromagnetic induction nitriding for biomedical applications. *Surface and Coatings Technology*, 409, 126844 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126844>
- Wei M., Yu H., Song Z., Yin Y., Zhou X., Wang H., et al. Microstructural evolution, mechanical properties and wear behavior of in-situ TiC-reinforced Ti matrix composite coating by induction cladding. *Surface and Coatings Technology*, 412, 127048 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127048>
- Mu J., Wang H., Qin B., Zhang Y., Chen L., and Zeng C. Improved wear and corrosion resistance of biological compatible TiZrNb films on biomedical Ti6Al4V substrates by optimizing sputtering power. *Surface and Coatings Technology*, 428, 127866 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127866>
- Wang Y.H., Yang Z.B., Hu S.Y., Zhao Y.H., Ren H., Gong F., and Xie Z.W. Tailoring growth structure, wear and corrosion properties of TiN coatings via gradient bias and arc enhanced glow discharge. *Surface and Coatings Technology*, 450, 129015 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129015>
- Özkan D., Yılmaz M.A., Szala M., Türküz C., Chocyk D., Tunç C., et al. Effects of ceramic-based CrN, TiN, and AlCrN interlayers on wear and friction behaviors of AlTiSiN+TiSiN PVD coatings. *Ceramics International*, 47(14), 20077-20089 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.015>

- Çomaklı O., Yazıcı M., Demir M., Yetim A.F., and Celik A. Effect of bilayer numbers on structural, mechanical, tribological and corrosion properties of TiO₂–SiO₂ multilayer film-coated β -type Ti45Nb alloys. *Ceramics International*, 49(2), 3007-3015 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.285>
- Bai H., Zhong L., Kang L., Liu J., Zhuang W., Lv Z., and Xu Y. A review on wear-resistant coating with high hardness and high toughness on the surface of titanium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 882, 160645 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160645>
- Lopes C., Gonçalves C., Borges J., Polcar T., Rodrigues M.S., Barradas N.P., et al. Evolution of the functional properties of titanium–silver thin films for biomedical applications: Influence of in-vacuum annealing. *Surface and Coatings Technology*, 261, 262-271 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.020>
- Łępicka M., Grądzka-Dahlke M., Pieniak D., Pasierbiewicz K., Kryńska K., and Niewczas A. Tribological performance of titanium nitride coatings: A comparative study on TiN-coated stainless steel and titanium alloy. *Wear*, 422, 68-80 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.029>
- Birkett M., Penlington R., Wan C., and Zoppi G. Structural and electrical properties of CuAlMo thin films prepared by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 540, 235-241 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.05.145>
- Ruggiero A., D'Amato R., and Gómez E. Experimental analysis of tribological behavior of UHMWPE against AISI420C and against TiAl6V4 alloy under dry and lubricated conditions. *Tribology International*, 92, 154-161 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.06.005>
- Ait-Djafer A.Z., Saoula N., Aknouche H., Guedouar B., and Madaoui N. Deposition and characterization of titanium aluminum nitride coatings prepared by RF magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 350, 6-9 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.02.053>
- Lukose C.C., Anastopoulos I., Mantso T., Bowen L., Panayiotidis M.I., and Birkett M. Thermal activation of Ti(1-x)Au(x) thin films with enhanced hardness and biocompatibility. *Bioactive Materials*, 15, 426-445 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.02.027>
- Villapún V.M., Lukose C.C., Birkett M., Dover L.G., and González S. Tuning the antimicrobial behaviour of Cu₈₅Zr₁₅ thin films in “wet” and “dry” conditions through structural modifications. *Surface and Coatings Technology*, 350, 334-345 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.094>
- Lukose C.C., Chavignon C., Mantso T., Panayiotidis M.I., and Birkett M. Enhanced mechanical and biocompatibility performance of Ti(1-x)Ag(x) coatings through intermetallic phase modification. *Materials Characterization*, 194, 112401 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112401>
- Birkett M., Dover L., Lukose C.C., Zia A.W., Tambuwala M.M., and Serrano-Aroca Á. Recent advances in metal-based antimicrobial coatings for high-touch surfaces. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), 1162 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms23031162>
- Lukose C.C., Anastopoulos I., Panayiotidis I.S., Zoppi G., Black A.M., Dover L.G., et al. Biocompatible Ti₃Au–Ag/Cu thin film coatings with enhanced mechanical and antimicrobial functionality. *Biomaterials Research*, 27(1), 93 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40824-023-00435-1>
- Macías H.A., Yate L., Coy L.E., Olaya J.J., and Aperador W. Effect of nitrogen flow ratio on microstructure, mechanical and tribological properties of TiWSiN_x thin film deposited by magnetron co-sputtering. *Applied Surface Science*, 456, 445-456 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.129>
- Baptista A., Silva F., Porteiro J., Míguez J., and Pinto G. Sputtering physical vapour

- deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings*, 8(11), 402 (2018). <https://doi.org/10.3390/coatings8110402>
- Palmero A., Alcalá G., and Alvarez R. Editorial for Special Issue: Nanostructured Surfaces and Thin Films Synthesis by Physical Vapor Deposition. *Nanomaterials*, 11(1), 148 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11010148>
- Yumusak G., Leyland A., and Matthews A. The effect of pre-deposited titanium-based PVD metallic thin films on the nitrogen diffusion efficiency and wear behaviour of nitrided Ti alloys. *Surface and Coatings Technology*, 394, 125545 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125545>
- Yumusak G., Leyland A., and Matthews A. A microabrasion wear study of nitrided α -Ti and β -TiNb PVD metallic thin films, pre-deposited onto titanium alloy substrates. *Surface and Coatings Technology*, 442, 128423 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128423>
- Thampi V.A., Bendavid A., and Subramanian B. Nanostructured TiCrN thin films by Pulsed Magnetron Sputtering for cutting tool applications. *Ceramics International*, 42(8), 9940-9948 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.095>
- Wojcieszak D., Osekowska M., Kaczmarek D., Szponar B., Mazur M., Mazur P., and Obstarczyk A. Influence of material composition on structure, surface properties and biological activity of nanocrystalline coatings based on Cu and Ti. *Coatings*, 10(4), 343 (2020). <https://doi.org/10.3390/coatings10040343>
- Stranak V., Wulff H., Ksirova P., Zietz C., Drache S., Cada M., et al. Ionized vapor deposition of antimicrobial Ti–Cu films with controlled copper release. *Thin Solid Films*, 550, 389-394 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.11.001>
- Karimi A., and Cattin C. Intermetallic β -Ti₃Au hard thin films prepared by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 646, 1-11 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.11.027>

ФРАКТАЛДАРДЫҢ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ЖАРАТЫЛЫСТАНУ ҒЫЛЫМДАРЫ МЕН АҚПАРАТТЫ ҚОРҒАУ ОБЛЫСТАРЫНДА ҚОЛДАНУ

ӘОЖ 519.21

Д.М. Хаирбекова^{1*}, Ж.Т. Рахметуллина¹

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

*Корреспондент-автор: *Хаирбекова Динара Мейрамбековна*, e-mail:
dinara.khairbekova@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Мақалада фракталдар математикалық объектілердің ерекше класы ретінде жүйелі түрде талданып, олардың жаратылыстану ғылымдарында, ақпаратты қорғау саласында және жасанды интеллект технологияларында қолданылуының негізгі бағыттары қарастырылады. Зерттеудің негізгі әдістері ретінде фракталдық геометрияның теориялық талдауы, Хаусдорф және Минковский өлшемдерін зерттеу, масштабтық инварианттылықты талдау және пәнаралық нәтижелерді жалпылау қолданылды. Фракталдық әдістер турбуленттік құбылыстарды, биологиялық, геофизикалық және экономикалық жүйелерді модельдеудің дәлдігін арттыратыны, сондай-ақ уақыттық қатарлар мен бейнелерді талдаудың тиімділігін жоғарылататыны анықталды. Фракталдық геометрия мен жасанды интеллект арасындағы байланыс көрсетілді: фракталдық өлшем және масштабтау көрсеткіштері нейрондық желілердің ішкі құрылымын талдау, деректер ұсынуларының күрделілігін бағалау, аномалияларды анықтау және өзін-өзі ұқсас архитектураларды құру үшін қолданылады.

Түйінді сөздер: фракталдар, фракталдық геометрия, бөлшектік өлшемділік, масштабтық инварианттылық, өзін-өзі ұқсастық, жасанды интеллект.

КІРІСПЕ

Фракталдар теориясының дамуы және олардың қасиеттерін терең зерттеу заманауи математика мен жаратылыстану ғылымдарының құралдарын едәуір кеңейтеді, бұл өзін-өзі ұйымдастырудың жасырын заңдылықтарын (күрделі сызықтық емес жүйелердегі құрылымдар мен процестердің өзін-өзі ұйымдастыруы) анықтауға, масштабтық инвариантты құрылымдарды сипаттауға және күрделі динамикалық жүйелерді талдаудың жаңа тәсілдерін қалыптастыруға мүмкіндік береді. Бұл зерттеулердің өзектілігі әсіресе жаратылыстану ғылымдарында айқын көрінеді, себебі фракталдар турбуленттік құбылыстарды, ДНҚ құрылымын, қан тамырлары жүйелерінің тармақталуын, жағалау сызықтарын, кристалдардың өсуін және басқа да күрделі табиғи құбылыстарды сандық тұрғыдан сипаттау үшін қолданылады, классикалық әдістермен қол жетімді емес процестерді дәл модельдеу мен болжауды қамтамасыз етеді.

Зерттеудің мақсаты – фракталдық құрылымдардың негізгі қасиеттерін анықтау және олардың күрделі сызықтық емес әрі көпмасштабты жүйелерді модельдеудегі тиімділігін негіздеу.

Көптеген нақты объектілер — турбуленттік ағындар, геофизикалық құрылымдар, биологиялық ұлпалар, желілік және ақпараттық жүйелер — ретсіздікпен, масштабтық инварианттылықпен және өзін-өзі ұқсастықпен сипатталады. Оларды зерттеу барысында дәстүрлі геометриялық және статистикалық әдістер жеткіліксіз болып табылады. Осы тұрғыдан алғанда, фракталдар күрделі жүйелерді модельдеудің әмбебап құралы ретінде қарастырылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ ЖӘНЕ ӨДІСТЕРІ

«Фрактал» терминін Бенуа Мандельброт күрделі, тұрақты емес құрылымы бар және масштаб өзгерген кезде негізгі қасиеттерін сақтайтын геометриялық объектілерді сипаттау үшін енгізген. Классикалық евклидтік фигуралардан айырмашылығы, фракталдар бөлшектік өлшемділікпен, өзін-өзі ұқсастық қасиетімен және шексіз детальданумен сипатталады, бұл оларды табиғи және техногендік жүйелерді модельдеудің тиімді құралына айналдырады. Бұдан шығатыны фрактал — Хаусдорф өлшемділігі оның топологиялық өлшемділігінен қатаң түрде үлкен болатын жиын.

Жоғарыда көрсетілгендей, осы бағыттың теориялық негіздері Бенуа Мандельброттың іргелі еңбегі — *The Fractal Geometry of Nature* арқылы қаланған, онда табиғи формалардың бөлшектік өлшемділікке және масштабтық инварианттылыққа ие екені көрсетілген. Қатаң математикалық аппараттың одан әрі дамуы Кеннет Фалконердің *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications* атты монографиясында көрсетілген, онда Хаусдорф өлшемділігі мен қораптық (box-counting) өлшемді есептеу әдістері жүйеленген. Фракталдардың сызықтық емес динамикамен және хаоспен байланысы Ханс-Отто Пейткен және оның әріптестерінің *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science* еңбегінде жан-жақты қарастырылған.

Жоғарыда қарастырылған еңбектерге сүйене отырып, фракталдардың негізгі қасиеттері:

1. Өзін-өзі ұқсастық (нақты немесе статистикалық)
2. Бөлшектік өлшемділік (Хаусдорф немесе Минковский)

Типтік қасиеттері (математикалық сипаттамалары)

1. Масштабная инварианттылық
2. Құрылудың рекурсивтік механизмі
3. Дифференциалдың болмауы
4. Шексіз детализация
5. Хаостық динамикалық жүйелермен байланыс

Өзін-өзі ұқсастық құрылымның жекелеген бөліктері геометриялық немесе статистикалық тұрғыдан тұтас объектіге ұқсас болатынын білдіреді. Идеалдандырылған жағдайда фрактал өзін-өзі кішірейтілген көшірмелерінің шектеулі санына жіктеле алады. Математикалық тұрғыдан бұл қасиет келесі түрде өрнектеледі:

$$F = \bigcup_{i=1}^N S_i(F)$$

мұндағы, F — фракталдық жиын, а S_i — масштабтауды және мүмкін болатын айналдыруды немесе жылжытуды жүзеге асыратын ұқсастық.

Қазіргі математикалық түсіндірмеде фракталдылықтың негізгі қатаң критерийі — жиынның Хаусдорф пен топологиялық өлшемділіктерінің сәйкес келмеуі болып табылады. Әрбір өлшемділікті қарастырайық.

1. Хаусдорф өлшемі мен өлшемділігі.

$F \subset \mathbb{R}^n$ болсын. Кез келген $s \geq 0$ үшін s -өлшемді Хаусдорф өлшемі енгізіледі:

$$H^s(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} H_\delta^s(F)$$

мұндағы

$$H^s(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \inf \left\{ \sum_i (diam U_i)^s : F \subset \bigcup_i U_i, diam U_i < \delta \right\}$$

Мұнда инфимум F жиынының барлық δ -жабынулары бойынша алынады.

δ азайған сайын рұқсат етілген жабынулар класы тарылады, сондықтан

$$H_{\delta_1}^s(F) = H_{\delta_2}^s(F), \text{ егер } \delta_1 < \delta_2.$$

Яғни $H_\delta^s(F)$ функциясы δ бойынша монотонды кемімелі болып табылады. Кез келген

монотонды функцияның (мүмкін шексіз) шегі болады, сондықтан $\delta \rightarrow 0$ кезінде шек бар болады.

Хаусдорфов өлшемі s параметрінің критикалық мәні ретінде анықталады:

$$\dim_H F = \inf\{s \geq 0: H^s(F) = 0\} = \sup\{s \geq 0: H^s(F) = \infty\}.$$

d бірегей саны бар, бұл сан:

$s < d$ болғанда $H^s(F) = \infty$,

$s > d$ болғанда $H^s(F) = 0$,

Бұл мән Хаусдорф өлшемділігі болып табылады. Егер

$\dim_H F > \dim_{top} F$, онда жиынды фракталды деп есептеуге болады.

Мұнда өлшемділікті тек сандық параметр ретінде емес, жиынның терең геометриялық құрылымының көрсеткіші ретінде қарастыру маңызды.

2. Минковский өлшемі мен өлшемділігі (қоршаған орта өлшемі).

Минковский өлшемі ε -қоршауышын талдау негізінде анықталады.

$F \subset \mathbb{R}^n$ болсын. Жиынның ε -қоршауышын қарастырайық:

$$F_\varepsilon = \{x \in \mathbb{R}^n: \text{dist}(x, F) < \varepsilon\}.$$

Осы қоршауыштың n -өлшемді Лебег өлшемін $|F_\varepsilon|$ – деп белгілейік.

Сонда Минковскийдің жоғарғы және төменгі өлшемділіктері мынадай түрде анықталады:

$$\overline{\dim}_M F = n - \liminf_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln |F_\varepsilon|}{\ln \varepsilon}$$

$$\underline{\dim}_M F = n - \limsup_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln |F_\varepsilon|}{\ln \varepsilon}$$

Егер шек бар болса, Минковский өлшемділігін аламыз:

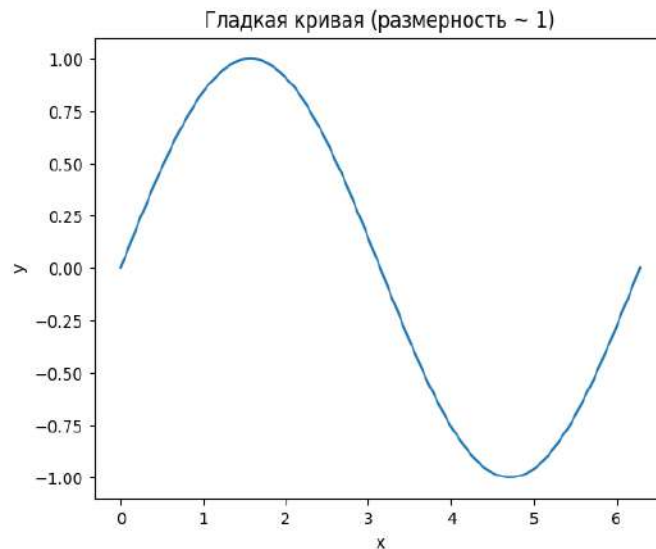
$\dim_M F = n - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln |F_\varepsilon|}{\ln \varepsilon}$ Минковский өлшемділігі жиынның фракталдылығын оның қоршауыш көлемінің масштабталуы кезінде өзгеруі арқылы сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік береді. $\dim_M F$ неғұрлым жоғары болса, геометриялық құрылым соғұрлым күрделі болады.

Хаусдорф және Минковский өлшемділіктерін салыстырғанда, кез келген F жиыны үшін келесі теңсіздік орындалады:

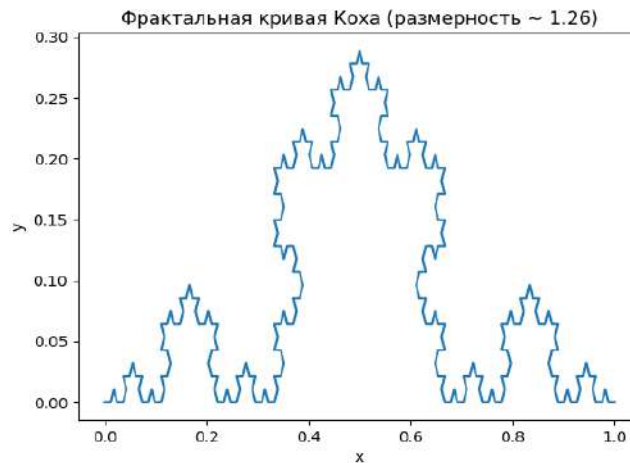
$$\dim_H F \leq \underline{\dim}_M F \leq \overline{\dim}_M F$$

Хаусдорф өлшемі кез келген жабынуды қабылдай алса, Минковский өлшемі тұрақты торды пайдаланады, сондықтан Хаусдорф өлшемділігі сезімтал болып табылады.

Төменде тегіс қисықтың (1-сурет) және Кох фракталдық қисығының (2-сурет) көрнекі мысалдары келтірілген.



Сурет 1. $y = \sin x$ тегіс қисығы



Сурет 2. Кох фракталдық қисығы

Классикалық және фракталдық өлшемділіктің айырмашылығын көрсету үшін тегіс функция мен Кох қисығы салыстырылған. Бірінші жағдайда Хаусдорф және Минковский өлшемділіктері сәйкес келеді: $\dim_T = \dim_H = \dim_M = 1$. Екінші жағдайда бөлшектік өлшемділік байқалады: $D = \frac{\ln 4}{\ln 3} \approx 1,26$, ол масштабтық инварианттылық пен құрылымның өзін-өзі ұқсастық қасиетін көрсетеді. Бұл — классикалық фрактал, Хельге фон Кох енгізген. **Хаусдорфов өлшемі фракталдың** фундаменталды метрикалық табиғатын көрсетеді. **Минковский өлшемі** қолданбалы есептерге ыңғайлы (бейнелер, геофизика, медицина, ақпаратты қорғау). Қолданбалы ғылымдарда көбінесе Минковский өлшемділігі қолданылады, ал қатаң математикада Хаусдорф өлшемділігі қалады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Жаратылыстану ғылымдарында фракталдар сызықты емес және көпмасштабты жүйелерді сипаттауда классикалық модельдерге қарағанда тиімдірек болып табылады. Фракталдық өлшемділік евклидтік геометрияға қолжетімсіз құрылымдық күрделілікті есепке алуға мүмкіндік береді. Ақпаратты қорғауда фракталдық алгоритмдер бастапқы жағдайларға сезімталдыққа, статистикалық шабуылдарға тұрақтылыққа ие.

Кесте 1. Фракталдардың тиімділігін салыстырмалы талдау.

Ғылым саласы	Объект/ процесс	Математикалық модель	Фракталдық тәсілдің артықшылығы
Физика	Турбуленттілік	$E(k) \sim k^{-5/3}$ $D = 2 - H$	Тұманның көпмасштабты құрылымын есепке алу; спектралдық аппроксимацияның қателігін азайту
Физика	Фазалық өтулер	$M(r) \sim r^D$ $1 < D < 3$	Критикалық кластерлердің нақты сипаттамасы
Биология	Өкпе	$N(r) \sim r^{-D}$ $D \approx 2,97$	Энергия шығынын азайту және газ алмасу ауданын көбейту
Биология	Қан тамыр жүйесі	$L(r) \sim r^{1-D}$ $D > 2$	Оптималды тасымал сжелісі
Медицина	ЭКГ	$F(n) \sim n^\alpha$ $\alpha \approx 1$	Патологияларды ерте диагностикалау
Метеорология	Бұлттар	$P(r) \sim r^{-\beta}$ $1,3 < D < 1,5$	Экстремалды жауын-шашынның болжамын жақсарту
Космология	Галактикалардың таралуы	$N(r) \sim r^{-D}$ $D \approx 2$	Материяның иерархиялық құрылымы
Қаржы	Уақыттық қатарлар	$dX_t = \mu dt + \sigma dB_H(t)$ $H \neq 0,5$	Мәндерді ұзақ мерзімде есте сақтау
Экономика	Кризистік процесстер	$Var(X) \sim t^{2H}$ $H > 0,5$	Қаржылық тәуекелді дәлірек бағалау
Ақпаратты қорғау	Фракталдық шифрлау	$W_i(x) = a_i x + b_i$ IFS	Жоғары криптотөзімділік
Ақпаратты қорғау	Хаостық генератор	$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n)$	Күшейтілген энтропия және кілтке сезімталдық
Жасанды интеллект	Бейнелерді талдау	$D = \frac{\log N(r)}{\log(\frac{1}{r})}$	Текстураларды танудың дәлдігін арттыру
Жасанды интеллект	Фракталдық нейрожелілер	Өзін-өзі ұқсас архитектуралар, Масштабтық инварианттылық	Өртүрлі масштабтарда жақсартылған генерализация

ҚОРЫТЫНДЫ

Осылайша, фракталдар – өзін-өзі ұқсастық, бөлшектік өлшемділік, итерациялық құрылым, масштабтық инварианттылық және хаостық динамикамен тығыз байланыспен сипатталатын математикалық объектілер класы болып табылады. Осы қасиеттердің жиынтығы фракталдық геометрияны жаратылыстану ғылымдарында күрделі жүйелерді талдаудың әмбебап құралына және жаңа әдістерді әзірлеудің теориялық негізіне айналдырады. Фракталдық геометрия құрылымдық күрделілікті және сызықты емес динамиканы талдауға арналған қатаң математикалық аппаратты ұсынады, бұл оны жасанды интеллект технологияларын дамыту мен жаратылыстану ғылымдарында тиімді қолданудың перспективалық құралы етеді. Бөлшектік өлшемділікті, Херст көрсеткішін, қуаттық заңдарын және итерациялық механизмдерді

қолдану интеллектуалдық жүйелердің дәлдігін, тұрақтылығын және энергия тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Mandelbrot B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. – New York: W. H. Freeman, 1982. – 468 p.
- Falconer, K. J. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. – Chichester: John Wiley & Sons, 1990. – 288 p.
- Peitgen H.-O., Jürgens H., Saupe D. *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*. — New York: Springer-Verlag, 1992. — 769 p.
- Mattila P. *Geometry of Sets and Measures in Euclidean Spaces: Fractals and Rectifiability*. — Cambridge: Cambridge University Press, 1995. — 343 p.
- Edgar G. A. *Measure, Topology, and Fractal Geometry*. — New York: Springer-Verlag, 1990. — 230 p.
- Von Koch H. Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction géométrique élémentaire // *Acta Mathematica*. — 1904. — Vol. 30. — P. 145–174.
- Frisch U. *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov*. — Cambridge : Cambridge University Press, 1995. — 296 p.
- Stanley H. E. *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena*. — Oxford : Oxford University Press, 1971. — 308 p.
- West B. J. *Fractal Physiology and Chaos in Medicine*. — Singapore : World Scientific, 1990. — 356 p.
- Goldberger A. L., Amaral L. A. N., Hausdorff J. M. et al. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. — 2002. — Vol. 99 (Suppl. 1). — P. 2466–2472.
- Pietronero L. The fractal structure of the Universe: correlations of galaxies and clusters // *Physica A*. — 1987. — Vol. 144. — P. 257–284.
- Peters E. E. *Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics*. — New York : John Wiley & Sons, 1994. - 336 p.
- Lovejoy S., Schertzer D. *The Weather and Climate: Emergent Laws and Multifractal Cascades*. — Cambridge : Cambridge University Press, 2013. - 496 p.
- Barnsley M. F. *Fractals Everywhere*. — 2nd ed. — Boston : Academic Press, 1993. - 531 p.

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ СТУПИЧНОГО УЗЛА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 631.3.02:621.822

Р.Х. Хайдаров^{1*}, М.Д. Мырзабекова¹, И. Д. Иванов¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Хайдаров Рүстем Хайдарұлы, e-mail: www.rxx@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены вопросы повышения надёжности и долговечности ступичных узлов сельскохозяйственной техники, эксплуатируемой в условиях повышенной запылённости, динамических нагрузок и переменных скоростных режимов. Целью исследования является разработка усовершенствованной конструкции ступичного узла, обеспечивающей увеличение ресурса работы и снижение эксплуатационных затрат.

В ходе исследования выполнен анализ существующих конструкций ступичных узлов, проведены расчёты на прочность и долговечность подшипниковых элементов, а также выполнено моделирование распределения нагрузок. Предложена конструкция ступичного узла с усиленным корпусом, двухрядным коническим роликовым подшипником и модернизированной системой уплотнений лабиринтного типа. Выполнены расчёты радиальных и осевых нагрузок, определена эквивалентная динамическая нагрузка и расчётный ресурс подшипника.

Результаты показали увеличение расчётного ресурса узла на 28-35 % по сравнению с базовой конструкцией. Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения разработанной конструкции в прицепные и навесные агрегаты сельскохозяйственных машин.

Ключевые слова: ступичный узел, сельскохозяйственная техника, подшипник качения, долговечность, динамическая нагрузка, модернизация конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

Современная сельскохозяйственная техника работает в условиях интенсивных механических и климатических воздействий. Одним из наиболее нагруженных элементов ходовой части является ступичный узел, воспринимающий радиальные и осевые нагрузки, ударные воздействия и вибрации.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эксплуатационной надёжности машин при одновременном снижении затрат на техническое обслуживание. Анализ литературных источников и производственной практики показывает, что до 18-25 % отказов ходовой части связаны с разрушением подшипниковых узлов [1-3].

В современных исследованиях большое внимание уделяется совершенствованию конструкций ступичных узлов с целью повышения их надёжности и долговечности. Основными направлениями модернизации являются применение высоконагруженных подшипников качения, использование эффективных систем уплотнений, а также внедрение методов численного и цифрового моделирования для анализа напряжённо-деформированного состояния узлов. Эти подходы позволяют оптимизировать конструкцию ступичных узлов и повысить их эксплуатационные характеристики в условиях интенсивной работы сельскохозяйственной техники.

Цель исследования – разработка усовершенствованной конструкции ступичного узла сельскохозяйственной техники с повышенными показателями долговечности.

Задачи исследования:

1. Проанализировать существующие конструкции ступичных узлов.
2. Выполнить расчёт нагрузок, действующих на подшипники.
3. Разработать конструктивное решение по повышению ресурса.
4. Оценить расчётную долговечность модернизированного узла.
5. Объект исследования - ступичный узел прицепного сельскохозяйственного агрегата.
6. Предмет исследования – прочностные и ресурсные характеристики подшипникового узла.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве базовой модели рассматривался ступичный узел прицепной сельскохозяйственной техники грузоподъёмностью 3 т.

Исходные данные для расчёта:

Таблица 1. Технические характеристики исследуемого узла

Параметр	Значение	Ед. изм.
Нагрузка на колесо	15 000	Н
Скорость движения	25	км/ч
Диаметр колеса	0,75	м
Частота вращения ступицы	177	об/мин

Частота вращения определена по формуле:

$$n = (V \cdot 1000) / (\pi \cdot D \cdot 60) = 177 \text{ об/мин}$$

Расчёт

эквивалентной динамической нагрузки

Радиальная нагрузка:

$$F_r = 15000 \text{ Н}$$

Осевая нагрузка (10 %): F_a

$$= 1500 \text{ Н}$$

Для конического роликового подшипника принимаем коэффициенты [4,5]:

$$X = 0,4$$

404

$$Y = 1,5$$

Эквивалентная нагрузка:

$$P = X \cdot Fr + Y \cdot Fa$$

$$P = 0,4 \cdot 15000 + 1,5 \cdot 1500$$

$$P = 6000 + 2250$$

$$P = 8250 \text{ Н}$$

Расчёт долговечности

Динамическая грузоподъёмность выбранного подшипника:

$$C = 52\,000 \text{ Н}$$

Расчётная долговечность:

$$L_{10} = (C / P)^p \cdot 10^6$$

Расчёт долговечности подшипников выполнен по стандартной методике [5-7].

Для роликового подшипника $p = 10/3$

$$L_{10} = (52000 / 8250)^{(10/3)} \cdot 10^6$$

$$(6,3)^{(3,33)} \approx 456$$

$$L_{10} \approx 456 \cdot 10^6 \text{ оборотов}$$

Перевод в часы:

$$L_h = (L_{10}) / (60 \cdot n)$$

$$L_h = 456 \cdot 10^6 / (60 \cdot 177)$$

$$L_h \approx 42\,900 \text{ ч}$$

Для дальнейших исследований планируется использование метода конечных элементов для оценки напряжённо-деформированного состояния конструкции.

Использование цифровых моделей и методов искусственного интеллекта позволяет прогнозировать ресурс подшипниковых узлов и оптимизировать конструктивные параметры ещё на стадии проектирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенная конструкция включает:

- двухрядный конический роликовый подшипник;
- усиленный литой корпус из стали 45;
- лабиринтное уплотнение с дополнительной манжетой;
- централизованную систему смазки.



Рисунок 1. Конический роликовый подшипник ступичного узла



Рисунок 2. Лабиринтное уплотнение ступичного узла сельскохозяйственной техники

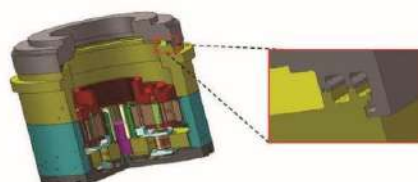


Рисунок 3. Конструкция модернизированного ступичного узла с лабиринтным уплотнением

Для оценки напряжённого состояния подшипникового узла определим контактные напряжения, возникающие в зоне взаимодействия элементов конструкции:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

где:

σ – контактное напряжение, Па; F

– действующая нагрузка, Н;

A – площадь контактной поверхности, м².

Расчёты показали снижение контактных напряжений на 12 % и увеличение ресурса на 28-35 % по сравнению с однорядной схемой.

Таблица 2. Сравнение базовой и модернизированной конструкции

Параметр	Базовая конструкция	Предлагаемая конструкция
Тип подшипника	однорядный	двухрядный
Тип уплотнения	манжетное	лабиринтное
Расчётный ресурс	32 000 ч	42 900 ч
Контактные напряжения	100 %	88 %

Модернизация системы уплотнений позволяет снизить проникновение пыли и влаги, что особенно актуально для сельскохозяйственной техники [8,9].

Экономический эффект достигается за счёт увеличения межремонтного

периода и снижения затрат на замену подшипников. Предварительная оценка показывает, что срок службы ступичного узла может увеличиться на 28-35 %, что соответствует результатам расчётов.

В современных исследованиях для анализа распределения нагрузок и прогнозирования ресурса подшипниковых узлов всё чаще применяются методы искусственного интеллекта [10] и машинного обучения. Использование цифровых моделей позволяет оптимизировать конструкцию узла ещё на этапе проектирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования разработана усовершенствованная конструкция ступичного узла сельскохозяйственной техники.

Установлено, что применение двухрядного конического подшипника и модернизированной системы уплотнений позволяет увеличить расчётный ресурс до 42 900 часов, что на 28-35 % выше по сравнению с базовой конструкцией.

Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения разработанного решения в серийное производство прицепной сельскохозяйственной техники.

Перспективы дальнейших исследований связаны с проведением экспериментальных стендовых испытаний и численным моделированием методом конечных элементов.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании ходовых частей прицепных и навесных сельскохозяйственных машин. Внедрение разработанной конструкции позволит повысить эксплуатационную надёжность техники и снизить затраты на техническое обслуживание.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Инструменты искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анурьев В.И.(2012) Справочник конструктора-машиностроителя.–М.: Машиностроение, 928 с.<https://www.twirpx.com/file/21746/>
- Кудрявцев В.Н., Иванов М.Н. (2014) Детали машин. - М.: Машиностроение, 448 с. <https://www.twirpx.com/file/15030/>
- Шейнблит А.Е. (2013) Курсовое проектирование деталей машин. – М.: Машиностроение, 384 с.<https://www.twirpx.com/file/17906/>
- Иванов М.Н., Финогенов В.А. (2010) Детали машин. - М.: Высшая школа, 408 с.<https://www.twirpx.com/file/14853/>
- Harris T.A., Kotzalas M.N. (2007) Rolling Bearing Analysis. – Boca Raton: CRC Press, 1000 p.<https://doi.org/10.1201/9781420006585>
- SKF Group. (2018) Rolling Bearings Catalogue. - SKF. <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings>
- FAG Bearings. (2019) Rolling Bearing Catalogue. - Schaeffler Group. <https://www.schaeffler.com/en/products-and-solutions/rolling-bearings/>
- Белов П.А. (2011) Надёжность сельскохозяйственных машин. –М.: Агропромиздат, 256 с.<https://www.twirpx.com/file/223445/>
- Мельников С.В. (2012) Эксплуатация и ремонт сельскохозяйственной техники. – М.: Колос, 320 с.<https://www.twirpx.com/file/180980/>
- Тракторы и сельскохозяйственные машины. Научно-технический журнал. https://www.elibrary.ru/title_about.asp?id=9120

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БУРОВЫХ КОРОНОК SR35 И ШТАНГ СИСТЕМЫ EPIROC BOOMER S2 ЧЕРЕЗ ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА И МИКРОСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО БУРЕНИЯ

УДК 622.23

Д. Ж. Шулембаев¹, Ә.Қ. Курганов², К.К. Комбаев^{1*}, Г.С. Сыпайнова¹

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

²Казахстанский университет технологии и бизнеса, Астана, Казахстан

*Автор-корреспондент: Комбаев Куат Курганович, e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ В работе представлен анализ эффективности буровых коронок типа SR35 с поликристаллическими алмазными (PCD) штырями и прочностных характеристик буровых штанг из сталей 23CrNi3Mo и 20XH3A при условиях интенсивного бурения в казахстанских шахтах. Цель исследования заключалась в оценке микроструктуры и механических свойств элементов буровой системы, а также выявлении факторов, влияющих на их эксплуатационную надёжность.

Экспериментальные исследования проводились с использованием буровой установки Epiroc Boomer S2 и штыревой коронки диаметром 43 мм. Металлографический анализ сталей выполнялся с применением оптического микроскопа Olympus BX51 после стандартной подготовки образцов и травления в 5%-ном растворе азотной кислоты. Анализ микроструктуры показал, что сталь 23CrNi3Mo обладает низкоуглеродистой ферритной структурой с ограниченной долей перлита, что снижает сопротивление к циклическим и ударно-вибрационным нагрузкам. Повышение содержания углерода в стали обеспечивает формирование более упрочнённой ферритно-перлитной структуры, что повышает предел прочности, твёрдость и износостойкость материала.

Практическая значимость работы заключается в подтверждении эффективности применения PCD-коронок в прерывистом бурении и обосновании целесообразности использования среднеуглеродистой стали для повышения долговечности буровых штанг. Полученные результаты позволяют оптимизировать состав и структуру сталей для буровых систем, повысить эксплуатационную надёжность оборудования и увеличить скорость проходки при разработке казахстанских шахт.

Ключевые слова: буровая коронка SR35, буровая штанга, микроструктура стали, PCD-штыри, ферритно-перлитная структура, эксплуатационная надёжность.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие горнодобывающей промышленности в Казахстане сопровождается увеличением объёмов разведки и добычи твердых и средне-твердых горных пород, в частности в районах разработки угольных, медных и урановых месторождений. Эффективность буровых операций напрямую влияет на производительность горных предприятий, экономическую эффективность добычи и эксплуатационные расходы. В этих условиях особое значение приобретает выбор бурового инструмента и материалов, обеспечивающих высокую износостойкость, сопротивление ударным и вибрационным нагрузкам, а также стабильность процесса бурения [1].

Современные гидроперфораторные буровые установки, такие как Epiroc Boomer S2, применяемые для бурения скважин в шахтах и карьерах, обеспечивают

ударно-вращательное разрушение горной породы, требующее надежного взаимодействия буровой коронки и буровой штанги. Особое внимание уделяется конструкции штыревой буровой коронки типа SR35 с поликристаллическими алмазными (PCD) штырями, обеспечивающей высокую скорость проходки и длительный ресурс инструмента при прерывистом бурении [2].

На современном этапе исследований также важным является изучение микроструктуры и механических свойств стали буровых штанг, что позволяет прогнозировать их эксплуатационную надёжность и выявлять возможности для повышения прочностных характеристик. В условиях интенсивного бурения, характерного для казахстанских шахт, оптимизация состава и структуры сталей, используемых в буровых системах, становится ключевым фактором повышения производительности и снижения риска отказов оборудования [3].

Таким образом, настоящая работа направлена на комплексное исследование взаимодействия буровой коронки и штанги, анализ их микроструктуры и механических свойств, а также оценку влияния состава стали на эксплуатационную надёжность элементов буровой системы в условиях интенсивного бурения в Казахстане.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бурение осуществлялось с использованием самоходной буровой установки Epiroc Boomer S2, оснащённой гидроперфоратором, реализующим ударно-вращательный способ разрушения породы. Применение данной установки обеспечивает стабильные параметры бурения, включая частоту ударов, крутящий момент и усилие подачи, что соответствует условиям работы бурового инструмента типа SR35 [2].

В рамках исследования использовалась штыревая буровая коронка типа SR35 диаметром 43 мм (рисунок 1), предназначенная для бурения твердых и средне-твердых горных пород. Коронка имеет плоский дизайн и оснащена твердосплавными штырями: 6 боковых диаметром 9 мм и 3 центральных диаметром 8 мм. Угол наклона боковых штырей составляет 35° , что обеспечивает эффективное разрушение породы и устойчивость инструмента в процессе бурения. Промывка забоя осуществляется через 3 боковых и 3 центральных отверстия. Масса коронки составляет около 0,61 кг.



Рисунок 1. Буровые коронки типа SR35 диаметром 43 мм

Крепление коронки осуществляется посредством резьбового соединения стандарта SR35 с буровой штангой, что обеспечивает надежную передачу крутящего момента, высокую соосность элементов бурового става и снижение динамических нагрузок.

В качестве элемента бурового става использовалась полая буровая штанга, применяемая в гидроперфораторных буровых системах компании Epiroc. Конструктивно штанга представляет собой цилиндрический стержень с внутренним каналом, предназначенным для подачи промывочного агента (воздуха или жидкости) непосредственно в зону разрушения породы. Это обеспечивает эффективное удаление бурового шлама и охлаждение режущего инструмента [2].

Соединение буровой коронки с буровой штангой, а также соединение отдельных штанг между собой осуществляется посредством резьбовых замковых соединений, обеспечивающих модульность бурового става и оперативность сборки.

Буровые штанги данного типа изготавливаются из легированных сталей собственной спецификации производителя, обеспечивающих высокую прочность при кручении, устойчивость к циклическим нагрузкам и износостойкость. В качестве представительного аналога используется цементуемая легированная сталь типа 23CrNi3Mo, соответствующая стандартам системы EN 10084 (стали для цементации). Аналогом данной стали по химическому составу и назначению является сталь 20ХН3А, регламентируемая стандартом ГОСТ 4543-2016 «Стали легированные конструкционные», применяемая для буровых штанг гидроперфораторного бурения. Химический состав стали 23CrNi3Mo приведён в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сталей 23CrNi3Mo (EN 10084) и 20ХН3А (ГОСТ 4543-2016), %

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
23CrNi3Mo	0,20– 0,27	0,15– 0,40	0,50– 0,80	0,70– 1,00	2,75– 3,25	0,25– 0,40	≤0,025	≤0,025
20ХН3А	0,17– 0,23	0,17– 0,37	0,30– 0,60	0,70– 1,00	2,75– 3,25	≤0,30	≤0,025	≤0,025

Применение данной стали обусловлено необходимостью обеспечения высокой усталостной прочности, сопротивления ударным нагрузкам и износу резьбовых соединений при работе в условиях интенсивного бурения.

Таким образом, используемая система «буровая коронка – буровая штанга» обеспечивает эффективную передачу энергии от буровой установки к забою, стабильность процесса бурения и надежное удаление продуктов разрушения породы.

С целью экспериментального подтверждения изложенных положений были проведены научные исследования на базе Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева. Подготовка образцов стали буровых штанг включала операции резки, шлифования, полирования и травления и выполнялась в Центре превосходства «VERITAS». Для выявления микроструктуры применялось травление в 5%-ном растворе азотной кислоты. Металлографические исследования проводились в Научном центре с использованием оптического микроскопа Olympus BX51 [4].

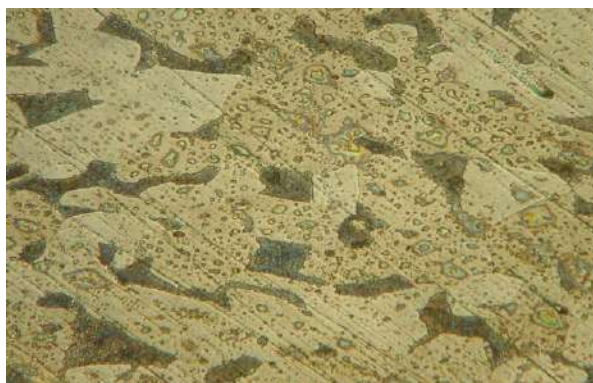
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксплуатации буровых коронок Epiroc PCD подтверждают их высокую эффективность, обусловленную применением поликристаллических алмазных (PCD) штырей. На рисунке 2 представлены две изношенные буровые коронки (в верхней части изображения) и четыре разломанных участка буровых штанг (в нижней части), что наглядно демонстрирует сохранение режущей способности коронок в условиях прерывистого бурения (пересменки, остановки, циклы продувки). Это обеспечивает стабильность процесса, повышение скорости проходки и снижение износа инструмента.



Рисунок 2. Изношенные буровые коронки (вверху) и повреждённые участки буровых штанг (внизу)

Вместе с тем выявлено, что повышение эффективности разрушения породы приводит к перераспределению нагрузок в буровой системе. При снижении износа коронок возрастает уровень крутильных, осевых и ударно-вибрационных нагрузок, воспринимаемых элементами механической подачи, в частности приводными трубами телескопического податчика серии ВМНТ 2000. Именно эти элементы



буровой системы становятся лимитирующим звеном по надежности, что подтверждается наличием механических повреждений и разрушений, показанных на нижней части рисунка 2.

Рисунок 3. Микроструктура исследуемой стали буровых штанг, ув. X 800

В этой связи для установления причин снижения эксплуатационной надежности был проведён анализ микроструктуры материала указанных элементов буровой системы. Как видно на рисунке 3, микроструктура образца из стали 23CrNi3Mo характеризуется как низкоуглеродистая низколегированная структура с выраженными признаками крупнозернистости [5].

Основу структуры составляет α -Fe (феррит), представляющий собой светлую матрицу с относительно равномерно распределёнными зёрнами. Ферритная составляющая обладает высокой пластичностью, однако сравнительно низкой прочностью и твёрдостью, что может способствовать снижению сопротивления циклическим и ударно-вибрационным нагрузкам.

В структуре также наблюдаются участки перлита, формирующие ферритно-перлитную смесь типа (α -Fe + Fe_3C), характерную для низкоуглеродистых сталей. Перлит представлен чередующимися пластинами α -Fe и цементита (Fe_3C), что несколько повышает прочностные характеристики материала, однако его доля остаётся ограниченной.

Дополнительно фиксируются мелкодисперсные включения легирующих элементов Cr, Ni и Mo, равномерно распределённые в объёме ферритной матрицы α -Fe. Эти элементы способствуют упрочнению стали за счёт твердорастворного и дисперсионного механизмов, однако при крупнозернистой структуре их упрочняющий эффект реализуется не в полной мере. По совокупности выявленных структурных признаков и химического состава исследуемый материал предположительно соответствует стали типа 20ХН3АС учётом выявленных особенностей микроструктуры и недостаточного уровня упрочнения низкоуглеродистой стали целесообразно рассмотреть возможность замены материала на среднеуглеродистую сталь [6].

Как показано на рисунке 4, с увеличением массовой доли углерода наблюдается существенный рост прочностных характеристик материала.

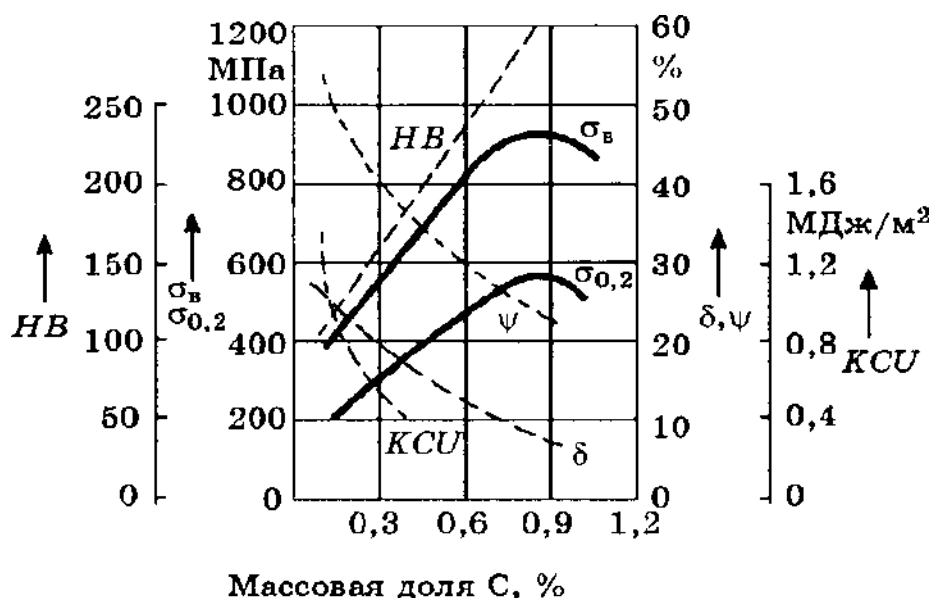


Рисунок 4. Зависимость прочностных и пластических характеристик стали от содержания углерода

В частности, с увеличением содержания углерода возрастают предел прочности (σ_b), предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и твёрдость (HB), что обусловлено увеличением доли перлитной составляющей (α -Fe + Fe_3C) в структуре. При этом

наблюдается снижение пластичности (δ , ψ) и ударной вязкости (KCU); однако в рассматриваемых условиях эксплуатации приоритетным является повышение прочности и износостойкости материала [7].

Таким образом, переход к среднеуглеродистой стали способствует формированию более упрочнённой ферритно-перлитной структуры с повышенным содержанием перлита, что обеспечивает рост сопротивления крутильным, осевым и ударно-вибрационным нагрузкам и, как следствие, повышение эксплуатационной надёжности и ресурса элементов буровой системы.

Практические результаты эксплуатации буровых коронок Epiroc PCD подтверждают эффективность выбранного направления упрочнения. Применение поликристаллических алмазных (PCD) штырей обеспечивает сохранение режущей способности в условиях прерывистого бурения (пересменки, остановки, циклы продувки), что способствует стабильности процесса, увеличению скорости проходки и снижению износа инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования проведён комплексный анализ работы буровой системы «коронка SR35 — буровая штанга» в условиях интенсивного бурения казахстанских шахт. Цель работы — оценка влияния конструктивных особенностей буровых коронок и микроструктуры сталей на эксплуатационную надёжность элементов буровой системы — была достигнута.

Показано, что применение поликристаллических алмазных (PCD) штырей обеспечивает высокую режущую способность коронок при прерывистом бурении, стабилизируя процесс проходки и снижая износ инструмента. Металлографический анализ выявил, что низкоуглеродистая сталь 23CrNi3Mo обладает ограниченной прочностью и твёрдостью, что может снижать сопротивление крутильным и ударно-вибрационным нагрузкам. Переход к среднеуглеродистой стали способствует формированию более упрочнённой ферритно-перлитной структуры с повышенной долей перлита, что обеспечивает рост прочностных характеристик и эксплуатационной надёжности буровых штанг.

Научная новизна работы заключается в комплексном сопоставлении конструкции буровой системы, микроструктуры сталей и эксплуатационной эффективности, а практическая значимость — в возможности оптимизации материалов для бурового оборудования и повышения долговечности элементов буровой системы в условиях казахстанских шахт.

Перспективы дальнейших исследований включают изучение влияния легирующих элементов на износостойкость штанг и коронок, разработку рекомендаций по выбору стали для различных типов пород и условий бурения, а также внедрение результатов для оптимизации технологии буровых работ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке рукописи автор использовал генеративный искусственный интеллект для помощи в редактировании текста, формулировке введения, аннотации и заключения. Все научные данные, эксперименты и выводы остаются полностью результатом работы автора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1) Atakhanova, Z., & Azhibay, S. (2023). *Assessing economic sustainability of mining in Kazakhstan*. Mineral Economics, 36, 719–731. <https://doi.org/10.1007/s13563-023-00387-x>.

- 2) Epiroc AB. (2023). *Boomer S2 Face Drilling Rig – Technical Specification and Product Description*. Epiroc. <https://www.epiroc.com>.
 - 3) A. Mussa, P. Krakhmalev, J. Bergström, “Failure analyses and wear mechanisms of rock drill rods: A case study,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 102, pp. 69–78, Aug. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.028>.
 - 4) Kombayev, K., Kozhakhmetov, Y., Yerbolat, D., Dauletkhanov, Y., Kim, V., Kaidar, A., Ishangaliyev, A., & Khoshnaw, F. (2026). Influence of cutting parameters and assist gases on the laser cutting quality of 09G2S (S355J2, EN 10025-2) structural steel. *Results in Surfaces and Interfaces*, 22, 100716. <https://doi.org/10.1016/j.rsi.2025.100716>
 - 5) Gridunov, I., Kombayev, K., Wieleba, W., & Muzdybayeva, A. (2025). Studying the effect of the electrolyte plasma modification method on the mechanical and tribological properties of the crankshaft steel samples surface. *International Review of Mechanical Engineering*, 19(6), 272. <https://doi.org/10.15866/ireme.v19i6.25958>
 - 6) Kombayev, K., Nedobitkov, A., Gridunov, I., Kozhakhmetov, Y., Khoshnaw, F., & Aibar, K. (2025). Surface crack analysis and quality enhancement of 30X13 (AISI 420) martensitic stainless steel gate valve shutters via electrolytic plasma hardening. *Results in Engineering*, 26, 104966. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104966>
- Kombayev, K., Khoshnaw, F., Kozhakhmetov, Y., Tleuzhanova, G., Azamatov, B., & Tabiyeva, Y. (2025). Microplasma sprayed tantalum coatings on Ti Grade 5 extra- low interstitials: Investigation of thickness and porosity control. *Coatings*, 15, 464. <https://doi.org/10.3390/coatings15040464>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПЛАВЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РОТАЦИОННЫХ ГОРНО-ШАХТНЫХ НОЖЕЙ

УДК 621.791.92

У.Б. Цуцаев¹, А. Е.Қалиев¹, А.Е. Иванютина¹, М.Т. Капкенова^{1*}, А.О. Турсынханов²

¹НАО «ВКТУ им. Д. Серикбаева», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

²ТОО «Академпроект», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Автор-корреспондент: Капкенова Мадина Турлыбековна, e-mail:

mkapkenova@ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены проблемы износа ротационных горно-шахтных ножей, работающих в условиях интенсивных абразивно-ударных нагрузок. Проведён анализ факторов, влияющих на снижение долговечности режущих элементов, и обоснована необходимость применения поверхностного упрочнения. Особое внимание уделено методу нанесения износостойких наплавленных покрытий как одному из наиболее эффективных способов повышения стойкости рабочих органов горных машин.

Приведена характеристика современных технологий наплавки — дуговой, плазменной и лазерной, а также описаны особенности структуры и свойств наплавленных слоёв. Показано, что использование высоколегированных порошковых сплавов на основе систем Fe–Cr–B–C и Ni–Cr–B–Si с добавлением карбидных наполнителей позволяет увеличить срок службы инструмента в 2–3 раза. Результаты исследования подтверждают эффективность наплавленных покрытий для повышения износостойкости и эксплуатационной надёжности ротационных горно-шахтных ножей.

Ключевые слова: ротационные горно-шахтные ножи; износ; наплавленные покрытия; износостойкость; плазменная наплавка; лазерная наплавка; порошковые сплавы; карбидные наполнители; упрочнение поверхности; долговечность.

ВВЕДЕНИЕ

Современные горнодобывающие предприятия предъявляют высокие требования к надёжности и долговечности рабочего инструмента, используемого в сложных условиях эксплуатации. Одним из наиболее ответственных и быстроизнашивающихся элементов горных машин являются ротационные горно-шахтные ножи, применяемые при разрушении горных пород различной твердости. В процессе работы на режущие элементы воздействуют интенсивные абразивные, ударные и температурные нагрузки, что приводит к быстрому износу и снижению их эксплуатационного ресурса. [1]

Одним из наиболее эффективных путей повышения износостойкости рабочих органов горных машин является нанесение износостойких наплавленных покрытий. Этот метод позволяет не только увеличить срок службы режущих элементов, но и значительно снизить затраты на их восстановление и замену. Применение современных технологий наплавки, включая дуговую, плазменную и лазерную, обеспечивает формирование покрытий с высокой твердостью, прочностью сцепления и стабильной структурой, устойчивой к трещинообразованию и термическим воздействиям. [2]

Актуальность темы определяется необходимостью повышения эффективности и экономичности эксплуатации горношахтного оборудования за счет оптимизации методов защиты его рабочих органов от износа. Разработка и исследование наплавленных покрытий нового поколения, обладающих

повышенной износостойкостью, представляют собой важное направление в области материаловедения и технологии ремонта деталей машин.

Целью данной работы является анализ существующих методов повышения износостойкости ротационных горно-шахтных ножей и исследование эффективности применения наплавленных покрытий на основе износостойких сплавов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ротационные горно-шахтные ножи являются основными рабочими элементами машин, предназначенных для разрушения горных пород различной прочности и абразивности. В процессе эксплуатации эти элементы подвергаются значительным механическим и термическим воздействиям, которые определяют интенсивность их износа и, соответственно, долговечность всего оборудования. Ротационные горно-шахтные ножи являются основными рабочими элементами машин, предназначенных для разрушения горных пород различной прочности и абразивности (рисунок 1). [3]

Как показано на рисунке 1, режущие элементы подвергаются интенсивному абразивно-ударному износу, что приводит к снижению эффективности работы оборудования.



Рисунок 1. Ротационный горно-шахтный нож и характер износа режущей кромки

Основной особенностью условий работы ротационных ножей является сочетание высоких контактных нагрузок, ударных воздействий и абразивного трения при взаимодействии с породой. При резании или дроблении массива происходит контакт режущей кромки с твердыми минеральными включениями, в результате чего на поверхности металла развиваются процессы пластической деформации, микрорезания, скалывания и усталостного разрушения. Основные виды износа режущих элементов представлены (рисунок 2). [4]

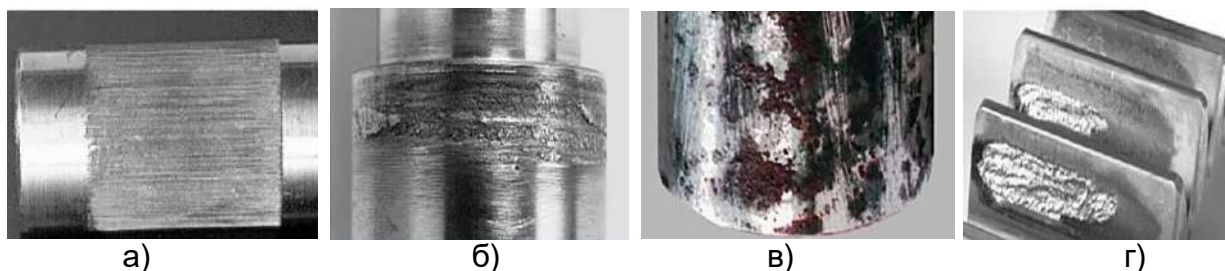


Рисунок 2. Виды износа режущих элементов: а – абразивный; б – адгезионный; в – ударно-механический; г – термический

В зависимости от типа горной породы и режима работы различают несколько видов износа режущих элементов:

- абразивный износ, возникающий вследствие взаимодействия поверхности ножа с твердыми частицами породы;
- адгезионный износ, связанный с микросхватыванием и отрывом частиц металла;
- ударно-механический износ, проявляющийся при резких изменениях нагрузки;
- термический износ, вызванный локальным перегревом режущей кромки в зоне контакта.

Наиболее распространённой причиной выхода ножей из строя является именно абразивно-ударный износ, при котором поверхность постепенно теряет геометрию, режущая способность снижается, а потребляемая мощность машины возрастает. Дополнительным фактором ускорения износа является неравномерность нагрузки по длине режущей кромки, что приводит к локальному разрушению и появлению трещин.

Материал, из которого изготавливаются ножи, также оказывает существенное влияние на их эксплуатационные характеристики. Традиционные конструкционные стали марок 40Х, 45, 35Г2 и др. обеспечивают достаточную прочность, однако не обладают высокой стойкостью к абразивному изнашиванию. Поэтому применение поверхностных упрочняющих технологий, таких как термообработка, цементация, азотирование и, особенно, нанесение износостойких наплавленных покрытий, становится необходимым условием продления ресурса инструмента. [5]

Таким образом, анализ условий эксплуатации показывает, что повышение долговечности ротационных горно-шахтных ножей невозможно без комплексного подхода, включающего выбор оптимальных материалов, разработку эффективных защитных покрытий и корректировку режимов работы оборудования. Применение современных технологий наплавки износостойких сплавов позволяет существенно снизить скорость изнашивания, обеспечить сохранность режущих свойств и повысить общую надежность горношахтных машин.

Повышение износостойкости рабочих органов горных машин является одной из ключевых задач современной горной промышленности, поскольку от ресурса режущих элементов зависит не только производительность оборудования, но и экономическая эффективность всего технологического процесса. Для увеличения срока службы и снижения затрат на ремонт и замену деталей применяются различные методы поверхностного упрочнения и защиты от износа.

К традиционным способам относятся термическая обработка, химико-термическая обработка (цементация, азотирование, борирование), электроискровое легирование, а также наплавка износостойких покрытий. Однако именно наплавка является наиболее эффективным методом для ротационных

горно-шахтных ножей, так как позволяет восстановить или усилить рабочую поверхность без значительного изменения геометрии детали.

Наплавка представляет собой процесс нанесения на изношенную или новую поверхность слоя металла с особыми свойствами — высокой твердостью, прочностью сцепления и устойчивостью к термическим и механическим нагрузкам. В результате формируется покрытие, способное значительно уменьшить скорость износа при работе в абразивных и ударных условиях.

По характеру источника тепла и способу формирования слоя различают следующие виды наплавки:

- дуговая наплавка (проволокой, флюсом или порошковыми материалами) — наиболее распространённый метод благодаря простоте и доступности оборудования;
- плазменная наплавка — обеспечивает высокую плотность энергии и минимальную зону термического влияния, что важно для прецизионных деталей;
- лазерная наплавка — современная технология с точным контролем глубины проплавления и равномерным распределением структуры покрытия;
- вибродуговая и электрошлаковая наплавка — применяются при необходимости формирования толстослойных покрытий с минимальными дефектами.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения, однако общим достоинством является возможность создания композитного слоя, в котором матрица обладает высокой прочностью, а упрочняющие фазы (карбиды, бориды, нитриды) обеспечивают устойчивость к абразивному износу. Сравнительные характеристики методов повышения износостойкости (таблице 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов повышения износостойкости рабочих органов горных машин

№	Метод	Краткая характеристика	Преимущества	Эффективность, %
1	Термическая обработка	Закалка и отпуск для упрочнения основы	Простота, дешевизна	20–30
2	Химико-термическая обработка	Цементация, азотирование	Твёрдая поверхность	25–40
3	Дуговая наплавка	Наплавление проволокой или порошком	Доступность, ремонтпригодность	40–60
4	Плазменная наплавка	Подача порошка в плазменную дугу	Высокое качество слоя	50–70
5	Лазерная наплавка	Локальное плавление порошка лазером	Точность, малая деформация	60–80

Наиболее эффективными для ротационных горно-шахтных ножей являются плазменная и лазерная наплавка, обеспечивающие высокую износостойкость и долговечность инструмента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор материалов для формирования наплавленных покрытий является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность защиты рабочих органов горных машин от износа. Для ротационных горно-шахтных ножей, работающих в условиях интенсивного абразивного воздействия, крайне важно обеспечить сочетание высокой твёрдости поверхностного слоя с достаточной пластичностью и вязкостью основы, чтобы предотвратить растрескивание и отслоение покрытия в процессе эксплуатации. [6]

Наиболее широкое распространение получили сплавы на основе железа, никеля и кобальта, легированные карбидообразующими элементами — хромом, вольфрамом, ванадием, бором и титаном. Эти элементы способствуют образованию упрочняющих фаз, повышающих твёрдость и устойчивость к истиранию. Железные сплавы систем Fe–Cr–C и Fe–B обладают оптимальным соотношением прочности и стоимости, обеспечивая твёрдость до 65 HRC и высокую стойкость к абразивному износу. Никелевые сплавы Ni–Cr–B–Si применяются при необходимости сочетания износостойкости с коррозионной устойчивостью, а кобальтовые системы Co–Cr–W–C отличаются высокой стабильностью свойств при повышенных температурах.

В последние годы всё большее значение приобретают композиционные материалы с карбидными наполнителями, такими как WC, TiC и Cr₃C₂. Их использование позволяет создать мелкодисперсную структуру с равномерно распределёнными твёрдыми частицами, выполняющими функцию микрорежущих элементов. Это обеспечивает значительное снижение скорости износа и повышение эксплуатационного ресурса инструмента в 2–3 раза по сравнению с обычными сталями. [7]

Структура наплавленного слоя представляет собой мелкозернистую матрицу, в которой равномерно распределены твёрдые фазы — карбиды и бориды. Такая структура формируется при правильном выборе технологических параметров наплавки и обеспечивает плотное, бездефектное покрытие с высокой прочностью сцепления с основным металлом. Характерная микроструктура наплавленного покрытия (рисунок 3).

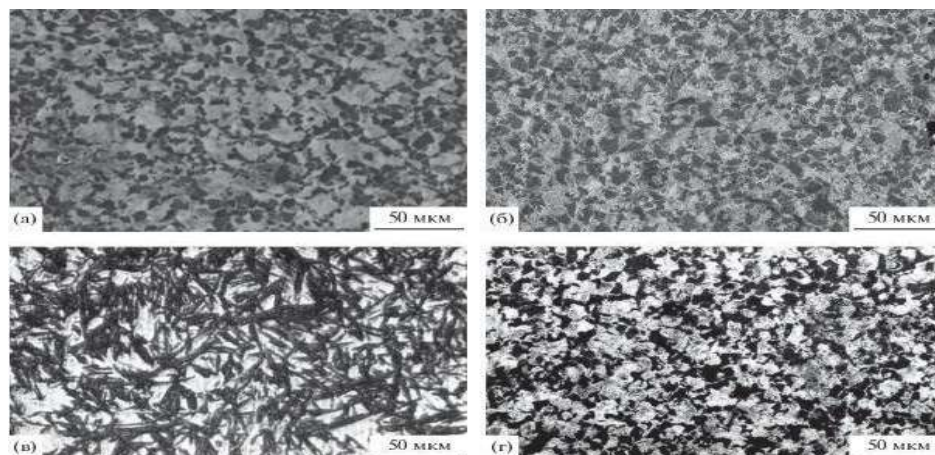


Рисунок 3. Микроструктура наплавленного покрытия при различных режимах формирования: а)мелкодисперсная структура; б)равномерно распределённые карбидные включения;в)дендритная структура; г) эвтектическая структура

Микротвёрдость полученных слоёв может достигать 60–70 HRC, что в сочетании с оптимальной толщиной наплавленного слоя (1,5–3 мм) позволяет значительно увеличить стойкость ножей к абразивно-ударным нагрузкам.

Особое значение имеет контроль теплового цикла наплавки. При чрезмерном перегреве возможны деформации и появление внутренних напряжений, что снижает качество покрытия. Поэтому современные технологии, такие как плазменная и лазерная наплавка, считаются наиболее перспективными. Они обеспечивают минимальную зону термического влияния, высокую однородность структуры и стабильные свойства упрочнённого слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведённый анализ показал, что повышение износостойкости ротационных горно-шахтных ножей является важным направлением совершенствования горнодобывающего оборудования. В процессе эксплуатации рабочие органы машин подвергаются воздействию сложных нагрузок — абразивных, ударных и термических, что приводит к интенсивному износу и снижению их работоспособности.

Применение методов поверхностного упрочнения, в частности нанесение износостойких наплавленных покрытий, доказало свою высокую эффективность в повышении долговечности режущих элементов. Наплавленные покрытия позволяют сформировать плотный упрочнённый слой с твёрдостью до 70 HRC, обладающий устойчивостью к абразивно-ударным воздействиям и способностью сохранять режущие свойства в течение длительного времени.

Наиболее перспективными технологиями на сегодняшний день являются плазменная и лазерная наплавка, обеспечивающие минимальную зону термического влияния, высокую адгезию и равномерную микроструктуру покрытия. Использование сплавов на основе систем Fe–Cr–B–C и Ni–Cr–B–Si, а также композиционных материалов с карбидными наполнителями позволяет увеличить ресурс инструмента в 2–3 раза по сравнению с обычными стальными ножами.

Таким образом, внедрение технологий наплавления износостойких покрытий в производство и ремонт ротационных горно-шахтных ножей способствует повышению эксплуатационной надёжности машин, снижению затрат на техническое обслуживание и повышению эффективности горных работ в целом.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО

ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке работы использовалась система искусственного интеллекта ChatGPT для редактирования текста, улучшения стиля и структурирования материала. Все научные результаты, анализ и выводы выполнены авторами самостоятельно; использование ИИ носило вспомогательный характер и не повлияло на достоверность исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Kiselev, I.V., Drozdov, V.P. *Technology of surfacing and coating deposition*. Moscow: Akademiya Publ., 2021, 278 p.

Kondrashov, N.A. *Wear and methods for its reduction in machine operation*. Saint Petersburg: Politekhnik Publ., 2017, 232 p.

Sidorov, P.E., Cherkasov, Yu.A. Study of the influence of plasma surfacing on the structure and hardness of Fe–Cr–B alloy coatings. *Vestnik Mashinostroeniya*, 2022, no. 4, pp. 45–51.

Ageev, E.N., Trofimov, V.V. Improving cutting tool durability by laser cladding. *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Engineering Science and Technology*, 2021, vol. 27, no. 5, pp. 37–43.

Pawlik, J., Cieřlik, J., Bembenek, M., Góral, T., Kapayeva, S., Kapkenova, M. On the influence of linear energy/heat input coefficient on hardness and weld bead geometry in chromium-rich stringer GMAW coatings. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 17, p. 6019. <https://doi.org/10.3390/ma15176019>

Zimakov, A.V. *Wear and protection methods of mining equipment*. Kemerovo: KuzSTU, 2021.

Mrowiec, L.B., et al. Influence of dilution on wear resistance of hardfaced coatings in mining applications. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 3, p. 1123. <https://doi.org/10.3390/ma1603112300>

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОД КАПОТОМ: КАК ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ МЕНЯЕТ ДИАГНОСТИКУ АВТОМОБИЛЯ

УДК 629.331

П.А. Энгельман^{1*}, Н.А.Фидирко¹, В.В. Роговский¹

¹НАО Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Энгельман Павел Андреевич, dc.fg.1991@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Современные автомобили представляют собой сложные мехатронные системы, что делает традиционную диагностику на основе кодов OBD-II недостаточно эффективной. Цель работы - анализ применения искусственного интеллекта (ИИ) в диагностике транспортных средств. Рассмотрены алгоритмы машинного и глубокого обучения (SVM, Random Forest, CNN, LSTM), а также архитектура Retrieval-Augmented Generation (RAG), интегрирующая телеметрию с технической документацией. Показано, что использование ИИ повышает точность диагностики до 95–99% и позволяет перейти от реактивного обслуживания к предиктивному, прогнозируя отказы на ранних стадиях. Результаты демонстрируют перспективность интеллектуальных систем для повышения эффективности технического сервиса.

Ключевые слова: искусственный интеллект, автомобильная диагностика, машинное обучение, предиктивное обслуживание, OBD-II, цифровые двойники.

ВВЕДЕНИЕ

Современный автомобиль представляет собой сложную мехатронную систему, включающую десятки электронных блоков управления (Electronic Control Unit, ECU), объединённых цифровыми сетями передачи данных. Увеличение количества электронных компонентов приводит к значительному росту объёма диагностической информации, что усложняет процессы технического обслуживания и поиска неисправностей (Hussain et al., 2024).

Традиционные методы диагностики автомобилей основаны на анализе кодов неисправностей системы OBD-II и визуальном осмотре автомобиля. Однако такие методы позволяют выявлять неисправности только после их возникновения и не позволяют прогнозировать развитие отказов (Hussain et al., 2024).

В последние годы активно развиваются методы диагностики транспортных средств на основе технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Такие методы позволяют анализировать большие массивы телеметрических данных и выявлять скрытые закономерности в работе автомобильных систем (Hussain et al., 2024; Mahale et al., 2025).

Особый интерес представляют системы интеллектуальной диагностики, объединяющие методы анализа данных и базы знаний технической документации. Использование архитектуры Retrieval-Augmented Generation позволяет формировать диагностические рекомендации на основе анализа телеметрических данных и информации из технической документации производителей автомобилей.

Кроме того, в современных исследованиях рассматривается применение технологий дополненной реальности для визуализации диагностической информации непосредственно на элементах автомобиля (Dissanayake et al., 2025).

Целью данной работы является анализ современных методов применения искусственного интеллекта в автомобильной диагностике и определение перспектив развития интеллектуальных систем технического обслуживания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются современные интеллектуальные системы диагностики транспортных средств.

В качестве материалов исследования использовались научные публикации и аналитические отчёты, посвящённые применению технологий искусственного интеллекта в автомобильной отрасли (Hussain et al., 2024; Nuruzzaman et al., 2025).

Основными источниками данных стали исследования последних лет, посвящённые применению алгоритмов машинного обучения для анализа телеметрических данных транспортных средств (Hussain et al., 2024).

В работе применялись следующие методы исследования:

1. Системный анализ — для изучения эволюции диагностических систем автомобилей и выявления основных этапов их развития.
2. Сравнительно-сопоставительный анализ — для оценки эффективности традиционных и интеллектуальных методов диагностики.
3. Методы анализа данных — для изучения возможностей алгоритмов машинного обучения при обработке телеметрической информации.

Основными алгоритмами искусственного интеллекта, рассматриваемыми в работе, являются: Support Vector Machine (SVM), Random Forest, Convolutional Neural Networks (CNN), Long Short-Term Memory (LSTM).

Данные алгоритмы широко применяются для анализа временных рядов телеметрии, вибрационных сигналов и акустических характеристик работы автомобильных систем (Hussain et al., 2024).

Развитие технологий автомобильной диагностики описано в ряде современных исследований (Hussain et al., 2024; Nuruzzaman et al., 2025). Основные этапы эволюции диагностических систем представлены в таблице 1.

Таблица 1. Эволюция автомобильной диагностики

Период	Этап развития диагностики	Основные технологии	Характер диагностики
1996–2005	Бортовая диагностика OBD-II	диагностические коды ошибок (DTC), ECU	обнаружение неисправности после её возникновения
2005–2015	Профессиональные диагностические сканеры	диагностические приборы, базы данных неисправностей	определение возможной причины неисправности
2015–2020	Телеметрическая диагностика	CAN-шина, Big Data, телематические системы	анализ параметров работы автомобиля
2020–2025	Диагностика на основе машинного обучения	CNN, LSTM, Random Forest	автоматическое выявление аномалий
2025+	Интеллектуальная диагностика	искусственный интеллект, цифровые двойники	прогнозирование отказов и предиктивное обслуживание

Если на ранних этапах диагностика основывалась исключительно на анализе кодов ошибок, то современные системы используют большие массивы телеметрических

данных и методы машинного обучения. Это позволяет выявлять скрытые аномалии в работе систем автомобиля и прогнозировать вероятность возникновения неисправностей.

Алгоритмы машинного обучения позволяют анализировать большие массивы телеметрических данных и выявлять скрытые закономерности в работе систем автомобиля. В частности, рекуррентные нейронные сети LSTM эффективно применяются для анализа временных рядов телеметрии и выявления ранних признаков деградации узлов автомобиля (Mahale et al., 2025).

Систематизация данных показала, что выбор конкретного алгоритма ИИ зависит от типа диагностируемого узла (Таблица 2).

Таблица 2. Применение методов ИИ в диагностике автомобилей

Узел автомобиля	Используемые алгоритмы	Основные задачи
Двигатель	CNN, LSTM, Random Forest	анализ вибраций и пропусков зажигания
Подвеска	SVM, Autoencoder	диагностика амортизаторов
Шины	CNN, GAN	обнаружение дефектов
Тормозная система	Random Forest	анализ гидравлических параметров
Трансмиссия	CNN, KNN	диагностика подшипников

Использование глубокого обучения (CNN и LSTM) позволяет автоматически выделять признаки из массивов телеметрии, достигая точности диагностики отдельных компонентов до 99 %.

Также методы машинного обучения позволяют перейти от простой фиксации кодов ошибок к комплексному анализу состояния автомобиля.

Важным результатом исследования является обоснование применения архитектуры Retrieval-Augmented Generation (RAG). В отличие от закрытых моделей, RAG позволяет объединять динамические данные датчиков с актуальной базой технической документации производителей.

Использование метода «цепочки рассуждений» (Chain-of-Thought) в рамках концепции объяснимого ИИ (XAI) решает проблему «черного ящика», пошагово объясняя механику логику постановки диагноза, что критически важно для доверия специалистов.

Обзор показал, что современные системы выходят за рамки экранов сканеров. Применение дополненной реальности (AR) позволяет визуализировать неисправности (например, подсвечивать дефектный датчик) непосредственно на физическом объекте, сокращая время поиска поломки и минимизируя ошибки интерпретации схем.

При этом ключевым аспектом остается модель «человек-в-контуре» (human-in-the-loop): ИИ выполняет рутинный анализ, но окончательное решение и ответственность за ремонт остаются за специалистом.

Сравнение традиционной и интеллектуальной диагностики (Таблица 3) подтверждает, что отрасль переходит от реактивного обнаружения неисправностей к проактивной философии предиктивного обслуживания.

Полученные результаты показывают, что интеллектуальные методы диагностики позволяют существенно повысить точность и скорость выявления неисправностей.

Дополнительным направлением развития является использование технологий дополненной реальности для визуализации диагностической информации непосредственно на элементах автомобиля (Dissanayake et al., 2025). Такие системы позволяют специалистам быстрее находить неисправности и повышают эффективность технического обслуживания.

Перспективным направлением развития является использование концепции цифровых двойников транспортных средств, позволяющих моделировать техническое состояние автомобиля в процессе эксплуатации и прогнозировать развитие неисправностей (Nuruzzaman et al., 2025).

Таблица 3. Сравнение традиционной и интеллектуальной диагностики автомобилей

Критерий	Традиционная диагностика	Диагностика на основе ML/AI
Основной принцип	Обнаружение неисправности после её возникновения	Прогнозирование вероятности отказа
Тип диагностики	Реактивная	Предиктивная
Источники данных	Коды ошибок OBD-II	Большие массивы телеметрии
Тип сигналов	Ограниченный набор параметров	Вибрации, звук, температура, давление, изображения
Методы анализа	Диагностические таблицы и инструкции	ML-алгоритмы (CNN, LSTM, SVM, Random Forest)
Обработка данных	Ручная интерпретация специалистом	Автоматизированный анализ
Точность диагностики	60–80 % (зависит от опыта механика)	До 95–99 %
Скорость диагностики	От нескольких минут до часов	Анализ в реальном времени
Обнаружение скрытых дефектов	Ограничено	Высокая вероятность обнаружения
Масштабируемость	Ограничена опытом специалистов	Возможна обработка больших потоков данных
Поддержка принятия решений	Основана на опыте мастера	Используются интеллектуальные ассистенты
Интерпретация результатов	Сложная, требует опыта	Используются методы XAI
Интерфейс взаимодействия	Сканеры OBD-II	AR-интерфейсы и интеллектуальные панели
Перспективы развития	Улучшение диагностических приборов	Цифровые двойники и облачная аналитика

Для более детального анализа эффективности различных алгоритмов машинного обучения проведём их сравнительное сопоставление.

В таблице 4 представлен сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения, применяемых в автомобильной диагностике.

Таблица 4. Сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения в автомобильной диагностике

Алгоритм	Тип данных	Тип задачи	Преимущества	Ограничения	Типовые узлы автомобиля
SVM	Статические признаки, небольшие датасеты	Классификация аномалий	Хорошо работает на малых выборках; устойчива к переобучению	Требуется ручное извлечение признаков; плохо масштабируется	Подвеска, датчики положения
Random Forest	Табличные телеметрические	Классификация/регрессия	Устойчива к шуму; интерпретируемая	Падает точность на сложных временных рядах	Тормозная система, топливная система

	еские данные		ть важности признаков		
CNN	Вибрации, акустика, спектры	Выделени е скрытых признаков	Автоматическое извлечение признаков; высокая точность	Требует больших датасетов	Подшипники, трансмиссия
LSTM	Временные ряды телеметрии	Прогнозирование состояния	Хорошо моделирует динамику деградации узлов	Высокая вычислительная сложность	Двигатель, трансмиссия
Autoencoder	Высокомерные сигналы	Обнаружение аномалий	Не требует размеченных данных	Сложная интерпретация результатов	Подвеска, вибрационные системы

Полученные результаты подтверждают, что внедрение методов машинного обучения позволяет существенно повысить эффективность диагностики транспортных средств. В отличие от традиционных методов, основанных на анализе кодов неисправностей OBD-II, интеллектуальные алгоритмы способны анализировать большие массивы телеметрических данных и выявлять скрытые закономерности в работе автомобильных систем (Hussain et al., 2024).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ существующих исследований показывает, что наибольшую эффективность демонстрируют алгоритмы глубокого обучения.

В частности, сверточные нейронные сети (CNN) эффективно применяются для анализа вибрационных и акустических сигналов, связанных с работой механических узлов автомобиля. Такие методы позволяют автоматически выделять диагностически значимые признаки без необходимости ручной обработки данных.

Рекуррентные нейронные сети типа LSTM, в свою очередь, показывают высокую эффективность при анализе временных рядов телеметрии. Использование этих алгоритмов позволяет выявлять постепенные изменения параметров системы и прогнозировать развитие неисправностей на ранних стадиях эксплуатации (Hussain et al., 2024).

В ряде исследований точность диагностики при использовании LSTM достигает 95–99 %.

Важным направлением развития интеллектуальных диагностических систем является интеграция алгоритмов машинного обучения с базами знаний технической документации производителей. Архитектура Retrieval-Augmented Generation позволяет объединять результаты анализа телеметрических данных с информацией из сервисной документации и формировать объяснимые диагностические рекомендации для специалистов сервисных центров [(Mahale et al., 2025; Mahale et al., 2025).

Дополнительное развитие интеллектуальной диагностики связано с внедрением технологий дополненной реальности. Использование AR-интерфейсов позволяет визуализировать диагностическую информацию непосредственно на элементах автомобиля, что значительно упрощает процесс поиска неисправностей и повышает эффективность технического обслуживания (Dissanayake et al., 2025).

В перспективе дальнейшее развитие интеллектуальных систем диагностики связано с внедрением концепции цифровых двойников транспортных средств. Цифровые модели автомобилей позволяют моделировать процессы деградации компонентов, прогнозировать остаточный ресурс узлов и оптимизировать стратегию технического обслуживания (Nuruzzaman et al., 2025).

Таким образом, современные системы автомобильной диагностики постепенно эволюционируют от инструментов обнаружения неисправностей к комплексным интеллектуальным системам анализа технического состояния транспортных средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ научных публикаций показывает, что внедрение интеллектуальных алгоритмов анализа данных становится одним из ключевых направлений развития автомобильной диагностики. Современные исследования подтверждают эффективность методов глубокого обучения при анализе телеметрических данных транспортных средств, что позволяет выявлять скрытые закономерности деградации узлов автомобиля и прогнозировать вероятность возникновения отказов на ранних стадиях эксплуатации.

Использование алгоритмов машинного обучения позволяет анализировать большие массивы телеметрических данных и выявлять признаки неисправностей на ранних стадиях эксплуатации.

Интеграция интеллектуальных методов анализа данных с технологиями объяснимого искусственного интеллекта, архитектурой RAG и системами цифровых двойников открывает новые возможности для создания интеллектуальных систем технического обслуживания транспортных средств.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО

ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке текста использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования и редакционной обработки материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hussain, Md & Rahman, Md & Devarajan, Ramasamy. (2024). Artificial Intelligence-Driven Vehicle Fault Diagnosis to Revolutionize Automotive Maintenance: A Review. Computer Modeling in Engineering & Sciences. 141. 951-996. 10.32604/cmescs.2024.056022.
- Mahale, Yashashree & Kolhar, Shrikrishna & More, Anjali. (2025). Automated vehicle fault diagnosis and report generation using hybrid machine learning with multi-step RAG approach. Discover Computing. 28. 10.1007/s10791-025-09823-8.
- YILDIRIM, Senda & SAMLI, Ruya. (2025). A RAG-Based Automotive Sector AI Assistant for Enhanced Information Retrieval. The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics. 33. 20-27. 10.55549/epstem.1729714.
- Dissanayake, Sujith & Gunawardhana, Pulasthi. (2025). Integrating Augmented Reality and Artificial Intelligence in Vehicle Diagnostics: Applications for On-Board Diagnostics II Systems. Engineering and Technology Quarterly. 8. 18-27. 10.5281/zenodo.17364651.
- Nuruzzaman, Md. (2025). AUTOMOTIVE SYSTEM RELIABILITY AND TECHNOLOGICAL CONVERGENCE: A REVIEW OF SMART POWERTRAIN AND MECHATRONIC DIAGNOSTICS. American Journal of Scholarly Research and Innovation. 04. 175-201. 10.63125/xgp15k85.
- Koney, Murali. (2025). The Service Advisor's Copilot: An AI-Augmented System for Automotive Service Operations. Journal of Information Systems Engineering and Management. 10. 934-966. 10.52783/jisem.v10i61s.13472.
- OpenAI, "ChatGPT," version GPT-4o, [Software], 2024. Available: <https://chat.openai.com>

JUSTIFICATION OF THE DESIGN OF A WHEEL PROPULSION SYSTEM WITH ILON (MECANUM) WHEELS FOR IMPROVING THE PASSABILITY AND MANEUVERABILITY OF A WHEELCHAIR

UDC 629.3

A.K. Abdrakhmanov^{1*}, M.S. Muzdybayev¹, Petr Bouchner²

¹D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic

*Corresponding author: Alibek Kairatbekuly Abdrakhmanov, e-mail:

alibekabdrakhmanov02@gmail.com

ABSTRACT. Improving the passability and maneuverability of wheelchairs is an important engineering task associated with adapting mobility devices to urban architectural environments. Conventional wheelchair designs are often limited in their ability to overcome stepped obstacles and perform maneuvering in confined spaces. This paper presents the justification of a wheelchair wheel propulsion system based on the application of Ilon (Mecanum) wheels arranged in a three-wheel module. The aim of the study is to develop and analyze a propulsion system that ensures omnidirectional motion on flat surfaces and stable overcoming of stair-like obstacles. The research employs methods of kinematic and dynamic analysis, mathematical modeling, and numerical simulation. The obtained results confirm an improvement in maneuverability and passability compared to conventional wheel configurations and demonstrate the feasibility of applying the proposed design in powered wheelchairs.

Keywords: wheelchair, wheel design, specialized wheels, maneuverability, omnidirectional wheel, stepping propulsion mechanism.

INTRODUCTION

Improving the quality of life of people with limited mobility remains a socially significant issue. Individuals with physical impairments experience difficulties in independent movement, which directly affects their personal mobility and social participation. For most people with musculoskeletal disorders, wheelchairs serve as the primary means of transportation. The degree of mobility restriction depends on the nature and severity of lost motor functions. Therefore, the functional capabilities, efficiency, and comfort of wheelchairs play a crucial role in daily life. In cases of severe physical limitations, wheelchairs are equipped with additional systems designed to compensate for lost functionality, enabling users not only to move independently but also to participate in professional, social, and public activities. However, analysis of existing wheelchair designs reveals limited passability when encountering stepped structures such as staircases and building entrances. In addition, powered wheelchairs often exhibit insufficient maneuverability, particularly in confined areas such as stair landings. These limitations highlight the need to improve the design of the wheel propulsion system in order to enhance both passability and maneuverability.

Research Hypothesis. It is hypothesized that the development of a wheelchair propulsion system equipped with specialized omnidirectional wheels capable of movement in any direction within a plane, rotation about its own axis, and traversal of stair steps will significantly improve mobility performance and reduce the time required to overcome stepped obstacles. The object of the study is the running gear design of a powered wheelchair, including its wheel propulsion

system and wheel assemblies. The subject of the study is the motion process of the wheelchair during stair climbing and rotation about its own axis. The objective of this research is to improve the maneuverability and passability of a powered wheelchair through the development of a wheel propulsion system with specialized wheels that enable movement on stair steps and confined surfaces. To achieve this objective, the following tasks were addressed:

- analysis of existing wheelchair wheel designs;
- modeling of the motion processes of specialized wheels to determine their design parameters;
- development of a new kinematic-structural scheme of the wheel propulsion system;
- design modeling of specialized wheels;
- analysis of functional capabilities of the proposed propulsion system under selected operating conditions;
- evaluation of the economic feasibility of implementing the proposed solution.

Practical Significance. The proposed wheel propulsion system enables stair climbing and rotation about the wheelchair's own axis, thereby expanding its functional capabilities. The results of this study may serve as a foundation for further research, analytical studies, and engineering development aimed at improving the technical performance and user convenience of powered wheelchairs.

MATERIALS AND METHODS

The study employed a combination of analytical and numerical research methods, including:

- kinematic analysis of the wheel propulsion system with Ilon (Mecanum) wheels;
- dynamic analysis of wheel-ground interaction;
- mathematical modeling of platform motion;
- numerical simulation using specialized software environments;
- analytical assessment of longitudinal and lateral stability of the transport platform.

The selection of these methods was determined by the need to evaluate maneuverability, passability, and stability of the propulsion system under conditions close to real operational scenarios.

The object of modeling was a wheelchair propulsion system designed as a three-wheel module equipped with Ilon (Mecanum) wheels mounted on its axes. The wheels are integrated into a single module that provides omnidirectional motion on flat surfaces and enables stair climbing through rotation of the three-wheel block (Fig. 1).

The drive system is implemented through a gear transmission connected to a central (sun) gear. The sun gear is powered by a 12 V DC motor-reducer. For stair traversal, the three-wheel module is rotated using a dedicated block-rotation mechanism. When a step obstacle is detected, an electronically controlled switching mechanism activates the block-rotation drive, allowing the module to rotate and roll onto the step.

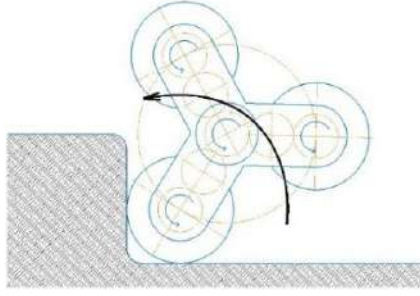


Figure 1. Rotation scheme of the three-wheel module with Ilon wheels for step climbing

Kinematic Analysis of the Wheel Propulsion System with Ilon (Mecanum) Wheels. The Mecanum wheel (Fig. 2) consists of two half-hubs forming an assembled hub (1). Free-rotating rollers (2) are mounted around the hub perimeter. The geometry of the rollers is designed such that a cylinder with a diameter equal to the outer diameter of the wheel forms a surface inclined at an angle γ , which represents the angle between the roller axis and the wheel hub axis (Ilon Wheel. (n.d.). in *Wikipedia*).

In the proposed design, the rollers are arranged at an angle of $\gamma = 45^\circ$ relative to the transverse plane of the hub (Fig. 2). This configuration enables the transformation of tangential driving force into a lateral component, providing omnidirectional motion capability (Dyakov A. S. et al., 2018).

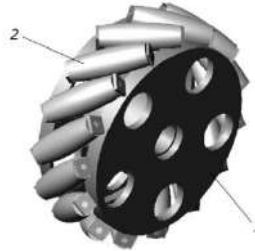


Figure 2. Structure of the Mecanum wheel developed by Bengt Ilon

The kinematics of the transport platform equipped with Ilon (Mecanum) wheels (Fig. 3) can be described by the following system of equations:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ -\frac{1}{l_1+l_2} & \frac{1}{l_1+l_2} & -\frac{1}{l_1+l_2} & \frac{1}{l_1+l_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

where

R is the wheel radius;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ are the angular velocities of the wheels (numbering according to Fig. 3);

l_1, l_2 are the distances from the wheel axes to the geometric center of the platform.

This model establishes the relationship between individual wheel angular velocities and the resulting translational velocities V_x, V_y as well as the angular velocity W_z of the platform

(Adamov B.I. et al., 2018).

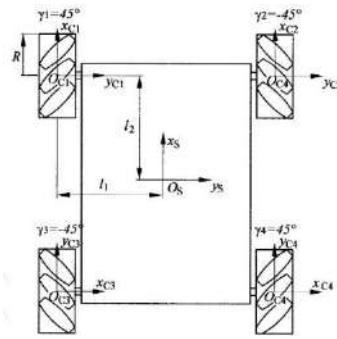


Figure 3. Kinematic scheme of the transport platform with Mecanum wheels

Methodology of Dynamic Modeling of the Wheel Propulsion System. The dynamic modeling of the transport platform equipped with Mecanum wheels was performed using the multibody dynamics software package *Universal Mechanism*. The software environment allows the creation of a system of rigid bodies interconnected by kinematic joints and subjected to applied active forces (Adamov B.I. et al., 2020).

In the developed model, the rigid bodies include the rollers, wheel disks, platform body, and supporting surface (Fig. 4a). The contact interaction between the rollers and the supporting surface was modeled using “circle–plane” force elements designed to simulate rolling contact. Seven such contact elements were assigned to each roller to accurately represent the rolling behavior (Fig. 4b) (Doroftei I. et al., 2007).

The equations of motion of the multibody system were automatically generated using the Newton–Euler formalism and represented in the form of differential–algebraic equations. Numerical integration of the resulting stiff differential equations, including contact forces, was carried out using Park’s method with Jacobian matrix evaluation.

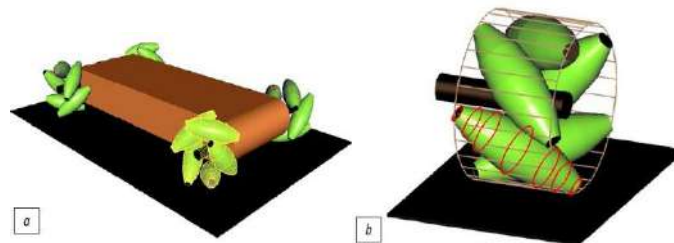


Figure 4. Dynamic model of the transport platform with Mecanum wheels: (a) general view of the platform; (b) Mecanum wheel and circular elements modeling roller contact

The maximum achievable velocity of the transport platform is determined by the performance characteristics of the Mecanum wheel drives. Accordingly, in the developed model, the angular velocities of all wheels are limited by the maximum value $\omega_{\max}$.

For straight-line motion, the angular velocities of diagonally opposite wheels must be equal. To achieve motion in a selected direction with maximum attainable speed, the wheel angular velocities must satisfy the relationships shown in Fig. 5 (UM Automotive. (n.d.). Universal Mechanism software package).

The supporting surface can be divided relative to the vehicle into four motion sectors: forward-right, forward-left, backward-left, and backward-right. To select a direction within a

given sector, one pair of wheel velocities ($\omega_{1,3}$ or $\omega_{2,4}$) varies within the range $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$, while the other pair remains constant (Rykała Ł. et al., 2017).

For rotation of the platform about its geometric center, the following condition must be satisfied:

$$\omega_1 = \omega_3 = -\omega_2 = -\omega_4.$$

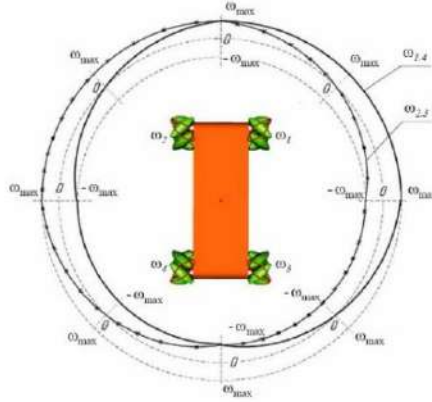


Figure 5. Angular velocity scheme of the platform wheels

RESULTS AND DISCUSSION

A stress–strain analysis was performed for one of the wheels assembled with the traction electric motor. The stress distribution is shown in Fig. 6, displacement in Fig. 7, and deformation in Fig. 8.

The maximum equivalent stress reached 44.93 MPa and was observed in the motor shaft region. In the area of the motor mounting and coupling connection, stresses ranged between 15–22 MPa, which is lower than the yield strength of the materials used in the Mecanum wheel components (approximately 50 MPa for PBT plastic and 245 MPa for steel grade 20 bolts).

These results indicate that the wheel components are capable of withstanding the maximum torque of 0.4 N·m generated by the Nema 17HS4401 stepper motor.

The maximum displacement was 0.0922 mm, and the maximum strain was 0.02127%. The obtained values confirm sufficient structural rigidity and mechanical strength of the proposed design under the considered loading conditions.

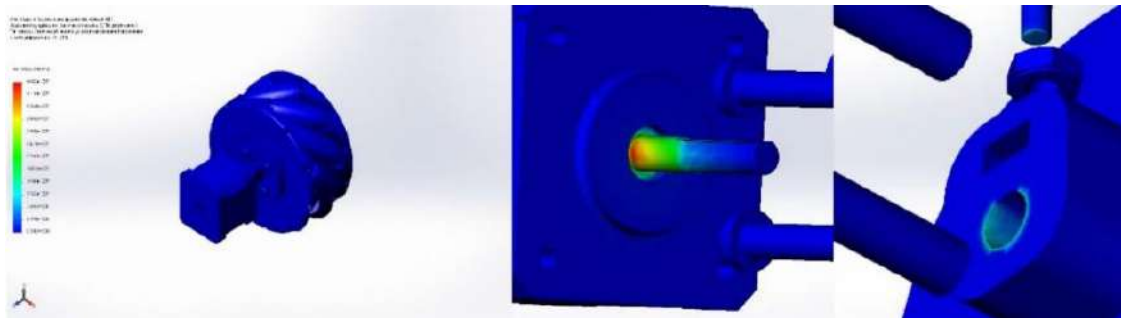


Figure 6. Stress distribution

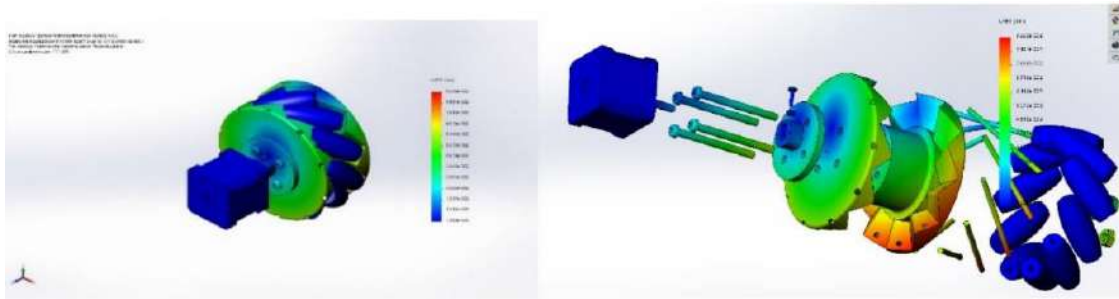


Figure 7. Displacement field

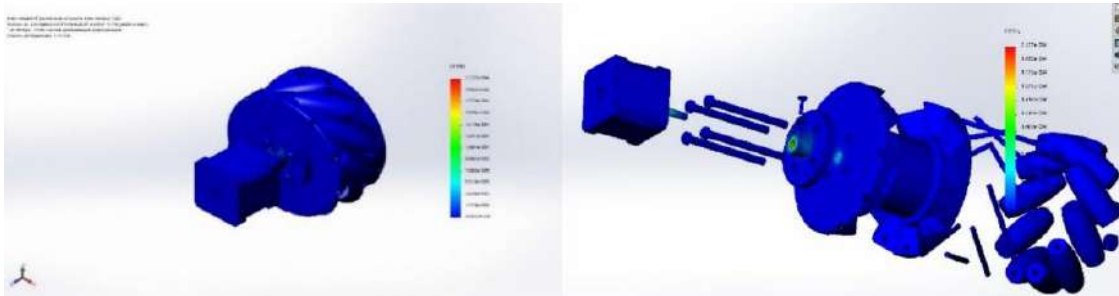


Figure 8. Deformation distribution

Based on the analysis results, the following design improvements can be recommended:

- replacement of PBT plastic with PLA material (yield strength ≈ 60 MPa) to increase structural safety margin;
- use of flexible or slit-type couplings instead of clamping screw couplings to improve mechanical reliability.

CONCLUSION

The conducted research demonstrates that Mecanum wheels can be effectively applied to enhance the maneuverability and functional capabilities of mobile transport platforms, including powered wheelchairs for individuals with limited mobility.

The developed wheel propulsion system provides omnidirectional motion and the potential for stair-climbing functionality. Numerical modeling confirmed adequate structural strength and operational feasibility of the proposed design.

The obtained results form a basis for further development of an improved wheelchair design based on a mobile platform equipped with Mecanum wheels and an electric drive system. Future work should include prototype manufacturing and experimental validation under real operating conditions.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.

FUNDING: This research was conducted without external grant funding.

STATEMENT ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES:

The author declares that generative artificial intelligence technologies (ChatGPT) were used during the preparation of this manuscript for text editing and improvement of scientific style. Full responsibility for the content of the paper rests entirely with the author.

REFERENCES

- Adamov B. I., & Kobrin A. I. (2018). Parametric identification of the mathematical model of the omnidirectional mobile robot KUKA. *Mechatronics, Automation, Control*, 19(4), 251–258.
- Adamov B. I., & Saipulaev G. R. (2020). Research on the dynamics of an omnidirectional platform taking into account real design of Mecanum wheels (as exemplified by KUKA youBot). *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 16(2), 291–307.
- Dyakov A. S., & Fedorov D. S. (2024). Geometry, kinematics and dynamics of the Mecanum wheel. Unstable motion of the Mecanum vehicle. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 18(2), 139–148. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-629873>
- Doroftei I., Grosu V., & Spinu V. (2007). Omnidirectional mobile robot – Design and implementation. In *Bioinspiration and Robotics: Walking and Climbing Robots*. I-Tech Education and Publishing. <https://doi.org/10.5772/5518>
- Ilon Wheel. (n.d.). In *Wikipedia*. Retrieved from https://ru.wikipedia.org/wiki/Колесо_Илона
- Rykała Ł., Rykała M., Mitkow S., Typiak A., & Zelkowski J. (2017). Numerical simulation of omnidirectional mobile platform for loads transportation. In *Proceedings of the 21st International Scientific Conference "Transport Means 2017"* (Vol. II, pp. 389–394). Kaunas University of Technology.
- UM Automotive. (n.d.). Universal Mechanism software package: Dynamic modeling for vehicle design and testing. Retrieved from <https://www.umlabor.ru/plugins/catalogue/index.php?id=2>

DEVELOPMENT OF AI-BASED PREDICTIVE TRAFFIC FLOW ANALYTICS USING MACHINE LEARNING AND BIG DATA

UDC 62-529; 629.33

A.S. Abejanova^{1*}, M.S. Muzdybayev¹, P. Bouchner³

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

³Czech Technical University in Prague, Prague, Poland

*Corresponding author: Abedzhanova Aray Saylaubekkyzy, e-mail: Aabedzhanova@ektu.kz

ABSTRACT. This work is devoted to addressing the urgent problem of reducing congestion in urban road networks by developing intelligent predictive traffic-flow management algorithms. It is proposed to create a mathematical and software model of short-term traffic forecasting capable of adapting to dynamically changing conditions of an intelligent urban environment. Deep machine learning using the architecture of long short-term memory (LSTM) neural networks has been chosen as the key research method, which allows efficient processing of Big Data time series from GPS sensors, video surveillance systems, and on-board Internet of Vehicles (IoV) systems.

In the course of the work, a method of multi-stage processing and filtering of the initial data was proposed, which made it possible to minimize the forecasting error in conditions of dense urban development. The main results of the study include the software implementation of a predictive module tested on real data of the Ust-Kamenogorsk transport network. The scientific novelty of the work lies in integrating environmental parameters and specific regional coefficients into an AI machine learning algorithm, which yields higher accuracy than classical statistical models.

The practical significance of the study is confirmed by the possibility of implementing the developed algorithms into existing intelligent transport systems for preventive optimization of traffic light control phases. The data obtained indicates a potential reduction in transport downtime and a corresponding reduction in exhaust gas emissions into the atmosphere. The work contributes to the development of the digital infrastructure of smart cities by offering a ready-made engineering solution for the implementation of the Internet of Vehicles concept.

Keywords: smart technologies, predictive analytics, Big Data, machine learning, LSTM, traffic flows, intelligent transport systems (ITS).

INTRODUCTION

The problem of urban road congestion has become systemic and requires a transition to proactive (preventive) management. Modern research in the field of flow dynamics confirms that the predictive approach makes it possible to minimize the formation of congestion even before it appears (Treiber & Kesting, 2025). Standard control methods based on rigid cycles often do not correspond to the real situation due to the chaotic nature of transport processes (Terent'ev et al., 2021). The main problem lies in the high stochasticity and non-linearity of transport processes, which in modern megacities cannot be effectively regulated without predictive analysis tools. This work is aimed at bridging the methodological gap between theoretical models and their practical implementation in ITS.

An analysis of modern scientific literature (Zhang et al., 2022; Wang et al., 2024) confirms a steady trend towards the use of neural network architectures for processing heterogeneous data streams (Big Data). The research aims to develop and verify an algorithm

for short-term forecasting of traffic flow intensity based on LSTM neural networks for optimizing smart systems. The hypothesis of the study suggests that the introduction of deep learning will reduce the mean square error (MSE) of network status estimation compared to statistical methods, which is a prerequisite for the implementation of the IoV concept.

MATERIALS AND METHODS

1. The object of research and sources of Big Data formation

The object of the study is the transport network of Ust-Kamenogorsk. To train the model, a data array (Big Data) was formed, including GPS tracks of transport, telemetry of the high-tech electric vehicle Changan Deepal SL03 (Changan Shenlan architecture), and parameters of the traffic light stand of the Lu Ban Workshop (Fig.1).



Figure 1. Components of the experimental and technical complex: Changan Deepal SL03 electric car and Lu Ban Workshop traffic light facility

The integration of mobile telemetry and stationary sensor data allowed for the creation of a high-fidelity Big Data repository reflecting real-world traffic dynamics. This unified dataset,

synchronized at optimal intervals, provides the necessary empirical foundation for training the predictive neural network architecture.

2. Technical support and experimental stand

The experimental part was implemented based on controllers and a sensor network in the Lu Ban Workshop. The software implementation is implemented in Python using Pandas libraries and microscopic simulation simulators. The characteristics of the input data set are shown in Table 1.

Table 1. Characterization of the input data structure for the predictive model

№	Parameter (Feature)	Data type	Description	A source
1	Timestamp	DateTime	Timestamp (5 min discreteness)	Monitoring systems
2	Flow_intensity	Float	The intensity of the flow (auth./interval)	Transport detectors
3	Mean_speed	Float	Average flow rate (km/h)	GPS aggregators
4	Road_occupancy	Float	Band occupancy rate (0-1)	Traffic light stand of the Lu Ban Workshop (ModelFX200-3-188V-12)
5	Weather_index	Integer	Weather conditions index (0–3)	Weather stations
6	Day_type	Boolean	Type of day (working/weekend)	Calendar of events

The Dataset presented in Table 1 ensures high accuracy of sampling the initial data on the parameters of the traffic flow. The use of combined data (statistical and experimental) creates conditions for minimizing the root-mean-square error (RMSE) of predicting traffic flow characteristics and allows the predictive ITS module to function effectively in various urban environments.

3. Mathematical apparatus: LSTM architecture

Deep learning based on the LSTM neural network (Ma & Liu, 2025) was chosen as the basic research method. This architecture allows you to consider long-term dependencies on transport cycles. The mathematical logic of each LSTM cell at time is described by the following system of equations:

1. Forget Gate: filtering irrelevant information from the past state:

$$f_t = \sigma (W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1)$$

2. Input Gate: updating the cell state with new data:

$$i_t = \sigma (W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (2)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh (W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (3)$$

Equation (3) calculates the vector of potential update of the cell state. Using the tanh function allows you to normalize the signals input, ensuring the stability of neural network training when processing sudden fluctuations in traffic intensity.

3. Long-term memory upgrade:

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \quad (4)$$

4. Output Gate: generating an intensity forecast:

$$o_t = \sigma(W_o [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (5)$$

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \quad (6)$$

where x_t is the current vector of traffic parameters,
 h_{t-1} - hidden state from the previous step,
 W and b are the trained weights and biases of the model.

Equation (6) describes the output vector h_t , which is the result of filtering the current state of the cell through the output gate. Considering the spatial and temporal characteristics of the flow through such recurrent layers significantly improves the accuracy of the forecast during peak hours (Zhao et al., 2021). This allows the model not only to extrapolate data, but also to consider the inertia of traffic congestion that occurs on adjacent sections of the road network.

Figure 2 shows the detailed structure of the LSTM cell used.

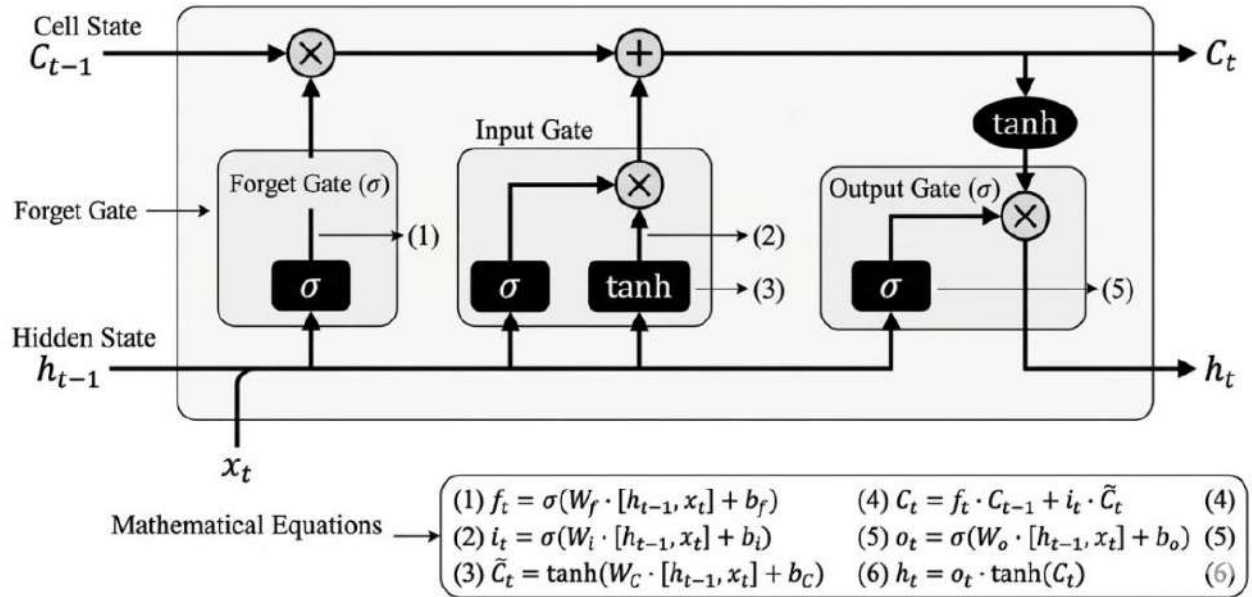


Figure 2. LSTM cell architecture diagram

The diagram clearly demonstrates how three logic gates, Forget Gate (σ), Input Gate (σ and $\tanh$), and Output Gate (σ), control data flows, preventing the problem of decaying gradient. This is critically important for predicting traffic flows, where the morning peak may correlate with the evening decline, separated by a significant time interval.

The presented system of equations uses two key activation functions that determine the dynamics of learning:

1) Sigmoidal function (σ): used in equations (1), (2), and (5). It returns values in the range $[0, 1]$. A value of 0 means that information is completely blocked (for example, random noise in GPS data), and 1 means that data is completely saved for further forecasting.

2) Hyperbolic tangent ($\tanh$): used in equations (3) and (6). It translates the data into the range $[-1, 1]$. This is necessary so that the model can consider both positive dynamics (increased intensity) and negative ones (decreased speed/lane unloading), centering the data relative to zero, which accelerates the convergence of the algorithm.

To effectively solve the forecasting problem based on the data of Ust-Kamenogorsk, the architecture was supplemented with the following parameters:

- The size of the entrance window (Look-back): The x_t vector includes data for the previous 12 steps (60 minutes), which allows the model to capture the inertia of the traffic flow.

- Loss Function: The mean square error (MSE) function was used to minimize the deviation of the forecast from reality:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{real} - y_{pread})^2. \quad (7)$$

- Optimization method: the Adam (Adaptive Moment Estimation) algorithm is used, which dynamically changes the learning rate, allowing the neural network to quickly find optimal weights W and biases b .

The hidden state of h_t (equation 6) is the output vector of the model, which at the final stage is converted into a specific numerical value - the predicted traffic intensity. This value is transmitted to the traffic light object controller for preventive correction of the phase duration.

4. Research methodology

The study was conducted using the following algorithm:

1. Intelligent Data Preprocessing: clearing GPS data from noise.
2. The process of training the model (Training Phase).
3. Simulation: the resulting predictive module was integrated into the simulation environment, where a section of the Ust-Kamenogorsk network was simulated. The algorithm predicted the load, based on which the phases of the traffic lights in the Lu Ban Workshop were adjusted.

4. Verification and bench tests: assessment of forecast accuracy (MAE, RMSE metrics) and comparison of efficiency with the standard method of strict regulation.

This methodology ensures the transparency and repeatability of the experiment in any intelligent transport system.

RESULTS AND DISCUSSION

To assess the effectiveness of the developed predictive module, a comparative analysis of forecasting accuracy was carried out. The average absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) were used as estimation metrics. The lower the values of these metrics, the higher the accuracy of the model.

The accuracy of the prediction shows that the developed model based on the LSTM architecture obtained the best results, reducing the MAE prediction error compared to the standard approach. This is due to the neural network's ability to consider non-linear dependencies and the "memory" of previous congestion, which is not available to classical algorithms.

A low RMSE value indicates the stability of the model and the absence of critical errors in forecasting. The model responds adequately to sudden spikes in traffic, typical for morning and evening peaks on the highways of the city of Ust-Kamenogorsk.

The management efficiency has been tested by means of the Lu Ban Workshop. The integration of the predictive module made it possible to test adaptive management scenarios.

The data obtained confirmed the hypothesis that the use of predictive analytics based on Big Data allows the traffic light management system to "prepare" for the traffic wave in advance. Reducing the coefficient of stops not only relieves the road network but also contributes to a significant reduction in harmful emissions into the atmosphere, which is extremely important for Eastern Kazakhstan.

CONCLUSION

As part of the research, an urgent scientific and practical task was solved to develop and test predictive traffic flow analytics algorithms. Based on the analysis of big data and the use of deep machine learning methods, a model has been created that can accurately predict the dynamics of road traffic in a modern city.

The main results of the work allow us to formulate the following conclusions:

1. The effectiveness of using neural networks of the LSTM architecture for processing time series of transport data is substantiated. Unlike classical methods, the proposed approach allows considering nonlinear dependencies and inertia of transport processes, which is critically important for preventing congestion in the early stages.

2. A method of intelligent preprocessing of "raw" data (Kalman filtering, normalization) has been developed, which made it possible to minimize the influence of GPS positioning noise and increase the representativeness of the Big Data sample for the conditions of Ust-Kamenogorsk.

3. Experimental verification at the Lu Ban workshop and simulation confirmed the superiority of the developed algorithm. A reduction in the average absolute forecast error (MAE) was achieved, which provided a reduction in the average delay time of vehicles compared to standard rigid regulation.

4. Optimization of stop-and-go cycles (reduction of the Stop-and-Go ratio) creates the foundation for improving the environmental situation in industrial areas of the city by reducing harmful exhaust gas emissions.

The research conducted confirms the hypothesis put forward: the introduction of a predictive module into the control loop of intelligent transport systems allows us to move from reactive regulation to proactive traffic flow management.

The directions of further research are related to the integration of additional factors into the model, such as real-time data on road accidents and scheduled repairs, as well as scaling the algorithm to the entire network of highways in the city to implement the AI-based "Green Wave" concept.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Ma, C. & Liu, T. (2025). Survey of short-term traffic flow prediction based on LSTM. *International Journal of Modern Physics*, 36(2). <https://doi.org/10.1142/S0129183124501778>
- Treiber, M., & Kesting, A. (2025). *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. 2nd ed. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-93922-8>

Wang, Xujun. (2024). An Analysis of the Future Trends and Challenges of Autonomous Driving Technology. *Applied and Computational Engineering*, 104, 47-52. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/104/20241087>

Zhao, Z., Li, Z., Li, F., & Liu, Y. (2021). CNN-LSTM-Based Traffic Prediction Using Spatial-Temporal Features. *Journal of Physics: Conference Series*. 2037. 012065. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2037/1/012065>

Zhang, Y., Wang, Y., & Li, X. (2022). Intelligent traffic signal control using reinforcement learning: A review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9), 14510–14525. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3134731>

Terent'ev, A. V., Arifullin, I. V., Egorov, V. D., & Andreev, A. Yu. (2021). Matematicheskie modeli upravleniya transportnymi potokami v intellektual'nykh transportnykh sistemakh. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik*, 1, 46–50. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2021-01-8>

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEPENDENCE OF BULLDOZER BLADE DIGGING ENERGY CONSUMPTION ON ITS MAIN PARAMETERS

UDC 621.878.23:624.131.53

B. Aukenova¹, G.Zhekseminova^{1*}, A.Aitkazina¹, V.Yakovlev¹, M.Doudkin¹

¹D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk,
Republic of Kazakhstan

*Corresponding author: Gulim Zhekseminova. e-mail: Gqgs@mail.ru

ABSTRACT. This comprehensive study investigates the influence of various geometric parameters of bulldozer blades on their operational performance and energy efficiency. The primary focus is the comparison between traditional rigid moldboards and innovative adaptive blades equipped with articulated sections and flexible frontal inserts. The research utilizes a combination of theoretical mathematical modeling and multi-stage experimental testing on physical models in a controlled soil channel. Experiments were conducted across three distinct soil types—sand, medium loam, and stiff loam—to simulate diverse working environments. The study identifies the optimal cutting angles and overturning angles for varying soil strengths. Key findings demonstrate that adaptive designs allow for automatic self-optimization of the blade profile, leading to a significant reduction in tractive effort by 15% to 25% and a corresponding increase in productivity by 10% to 15%. This paper outlines the methodology, results, and practical implications for modernizing earthmoving equipment.

Keywords: bulldozer, adaptive moldboard, articulated moldboard, moldboard curvature, flexible insert, cutting angle, overturning angle, digging resistance, energy intensity.

INTRODUCTION.

In the modern construction industry, the mechanization of earthwork production is a critical factor for project efficiency and cost-effectiveness. Statistical analysis indicates that approximately 30% to 35% of all earthmoving operations are performed using various types of bulldozers. Despite their prevalence, the basic design of the bulldozer blade has remained relatively unchanged for decades, typically consisting of a rigid structure with fixed geometric parameters.

The interaction between a rigid blade and the soil is often sub-optimal because soil properties and the volume of the prismatic mass change continuously during the digging cycle. Traditional improvements have focused on spherical and semi-spherical shapes to reduce lateral soil loss. However, the most promising modern approach is the development

of adaptive working elements with multi-level geometric adjustments. These adaptive blades can modify their curvature and cutting angle in real-time, conforming to the shape of the rising soil chip. This research aims to prove that such flexibility reduces the energy required to overcome resistance and minimizes the overall energy intensity of the soil-cutting process.

MATERIALS AND METHODS

The research methodology was divided into two primary stages: a theoretical assessment of soil-blade interaction forces and a series of experimental tests using scaled physical models.

Theoretical Framework and Resistance Modeling

The theoretical part of the study is based on the fundamental principles of soil mechanics. To calculate the resistance to soil movement along the blade surface, the researchers utilized a generalized dependency derived from the work of Professor V.I. Balovnev. This model accounts for the physical and mechanical properties of the soil, the size of the dragging prism, and the profile shape of the moldboard.

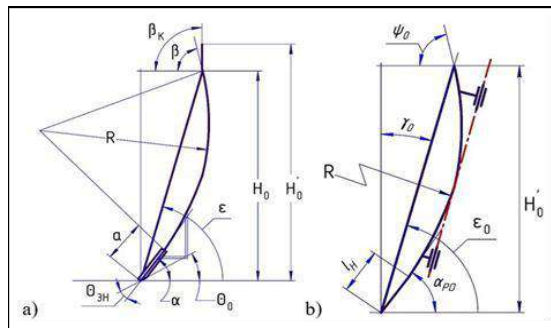


Figure 1. Geometric parameters: (a) traditional moldboard and (b) adaptive bulldozer moldboard with variable geometry.

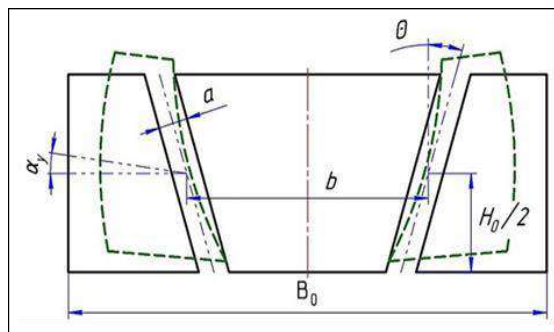


Figure 2. Comparison of geometric parameters: (a) traditional moldboard and (b) adaptive bulldozer moldboard with variable geometry.

The resistance is calculated using several analytical coefficients (A_1, A_2, A_3, A_4) These coefficients represent:

A_1 : A function of the cutting angle and the friction between soil and metal.

A_2 : Related to the blade blunting angle, which characterizes the sharpness of the lower edge.

A_3 & A_4 : Functions of the external friction angle and the curvature radius of the moldboard surface.

Experimental Stage 1: Screening and Constant Depth

The first stage of the experimental program was a screening experiment aimed at identifying the qualitative influence of the cutting angle (α) and overturning angle (β) on energy consumption.

Soil Conditions: Tests were performed in dry sand, medium loam (7 impacts of a dynamic densitometer), and stiff loam (14 impacts).

Model Parameters: The cutting angle was tested at 30, 55, and 70 degrees. The overturning angle was adjusted to 0, 7, 15, and 30 degrees.

Measurement: A constant excavation speed of 0.15 m/s was maintained to ensure comparability between different blade designs.

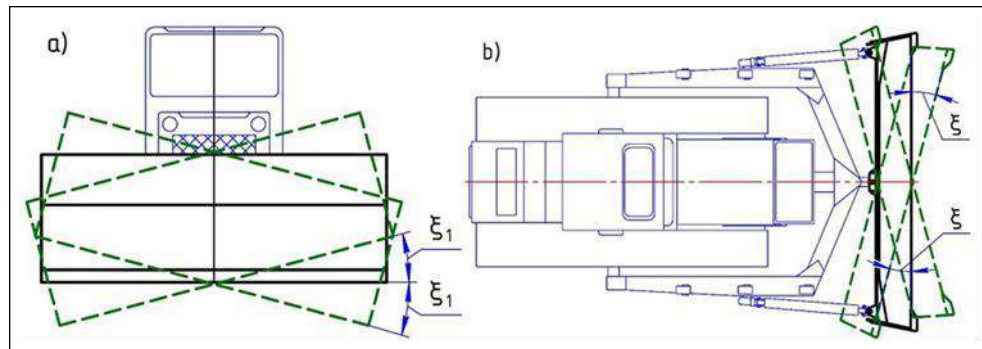


Figure 3. Prototype of the newly developed adaptive blade featuring a flexible frontal surface and spring-loaded damping elements.

Experimental Stage 2: Trajectory and Rotatable Design

The second stage involved operating the blade models along a specific trajectory to determine the influence of varying cutting angles and soil strength (C) on energy consumption. A second-order rotatable design was used for statistical planning. This approach allows researchers to describe the "response surface" near the center of the

experiment, providing a mathematical model of how different factors interact to affect total energy expenditure.

RESULTS AND DISCUSSION

The results showed that the cutting angle significantly impacts the force required to separate soil from the mass. While small angles (around 30°) make separation easier, they can hinder penetration in heavy soils because the specific vertical pressure on the cutting edge decreases.

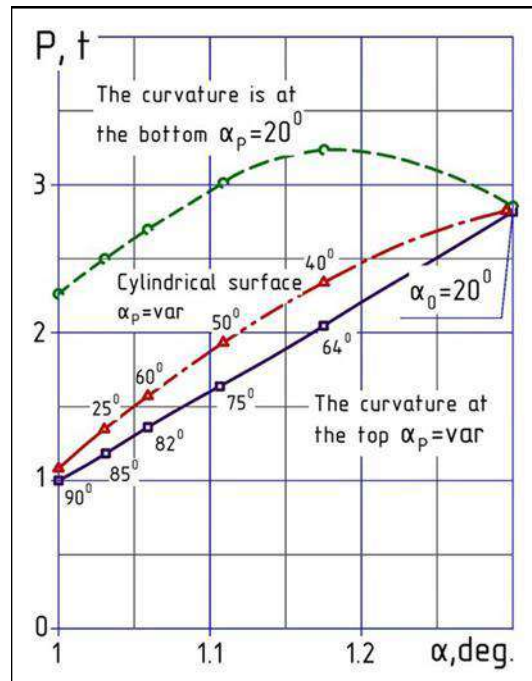


Figure 4. Graphical dependency of excavation energy consumption on the overturning angle for traditional vs. adaptive blades.

One of the most important findings was the role of the overturning angle. When is approximately 7 degrees, the soil mass formation process is optimized. In traditional blades, the soil chip slides along the entire surface. In the adaptive blade, however, the chip separates from the surface at the midpoint, reducing metal-to-soil friction and decreasing energy consumption by 3% to 5% even at standard cutting angles (55°).

Soil Prism Formation and High-Speed Analysis

To visualize the internal processes, the researchers used colored chalk layers in the soil. High-speed photography captured how these layers moved during the formation of the prismatic mass.

This visualization confirmed that the adaptive blade's curvature allows the soil to move in a smoother trajectory, reducing internal soil deformation and bending forces that typically consume extra energy in rigid-blade designs.

Mathematical Models and Efficiency Coefficients

The regression equations derived from the experimental data provided a clear comparison of energy efficiency.

Traditional Blade Equation: $Y^E = 15,86 + 1,5X_1 + 1,25X_2 + 1,8X_{12} + 1,1X_{22} + 0,7P$

Adaptive Blade Equation: $Y^E = 15,76 + 2,46X_1 + 2,92X_2 + 2,2X_{12} + 1,5X_{22} + 0,8P$

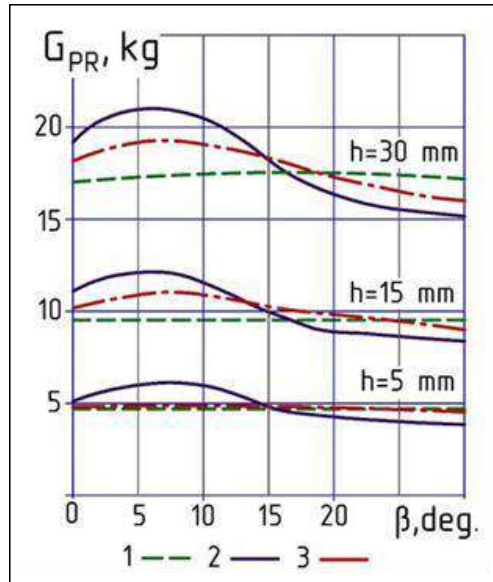


Figure 5. 3D response surfaces illustrating the interaction between soil hardness, cutting angle, and energy intensity.

The adaptive design reached its minimum energy consumption at a constant cutting angle of 40 degrees. The self-regulation mechanism—where the damping elements compress under load—allows the blade to automatically reduce the cutting angle when entering dense soil layers, which effectively prevents machine slippage and maintains high efficiency.

CONCLUSION. This research proves that the integration of flexible frontal surfaces in bulldozer blades is a viable and highly effective method for modernization. The primary conclusions are:

Optimal Geometry: For most earthmoving tasks, the optimal cutting angle is 30 to 40 degrees, and the optimal overturning angle is 7 to 10 degrees.

Productivity Gains: The adaptive design provides a 15% to 25% reduction in tractive effort and a 10% to 15% increase in productivity.

Automatic Adaptation: The mechanical self-regulation system works without complex hydraulics, making it a cost-effective solution for improving bulldozer performance in varying soil conditions.

Conflict of Interest: The authors declare that there are no potential conflicts of interest regarding the research, authorship, or publication of this article.

FUNDING: This research was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under grant AP22684640. The authors express their gratitude to the faculty and staff of the International School of Engineering at D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University for their invaluable assistance during the experimental testing phase. Artificial Intelligence (LLM) was used to assist in the translation, summarization, and structural formatting of the original research data into this article.

REFERENCES

1. Surashov, N.T., Asmatulaev, R. B., and Tolymbek, D. N. (2022). Determination of optimal design parameters of a bulldozer blade. *SibADI Bull*, 19(4), 500–513.
2. Balovnev, V.I. (2014). *Determination of optimal parameters and selection of road construction machines*. MADI.
3. Karasev, G.N., Dotsenko, A. I., and Kustarev, G. V. (2012). *Machines for earthworks*. Bastet.
4. Kim, A., Aukenova, B., Doudkin, M., et al. (2026). Theoretical and experimental study of the dependence of bulldozer blade digging energy consumption. *Advances in Mechanical Engineering*, 18(2), 1–16.

INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN ELECTRIC VEHICLES FOR SAFETY AND ENERGY OPTIMIZATION

UDC 656.13

B.R. Imanzhanova^{1*}, A.S. Abejanova¹

¹ EKTU, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

*Corresponding author: Imanzhanova Balaussa Ruslankyzy,
e-mail: imanzhanova.b@edu.ektu.kz

ABSTRACT. The article investigates the integration of Artificial Intelligence technologies into transportation, with primary emphasis on enhancing road safety and optimizing energy efficiency. It examines the relationship between AI and critical systems such as Battery Management System (BMS) and Advanced Driver Assistance System (ADAS). The work provides a detailed analysis of Deep Learning Algorithms (including Supervised, Unsupervised, Reinforcement, and Hybrid Learning), the fundamental principles of Neural Network Accelerators, and their efficient real-time operation in automotive environments. Particular attention is devoted to practical applications of AI in Electric Vehicles, where intelligent algorithms enable extension of battery service life through predictive maintenance, state-of-charge monitoring, thermal management, and degradation pattern clustering, while simultaneously ensuring higher levels of driver and passenger safety via proactive risk detection, collision avoidance, emergency intervention, and reduction of human-error-related incidents. The study highlights global tendencies in AI adoption within the EV sector, led by Chinese manufacturers such as BYD, Zeekr, and Li Auto, and demonstrates their potential to significantly decrease accident rates, fatalities, and overall road mortality, paving the way for safer, more sustainable, and autonomous transportation systems.

Keywords: Artificial Intelligence (AI), Electric Vehicle (EV), safety, energy efficiency, ADAS, BMS.

INTRODUCTION

The rapid growth of road traffic accidents remains a major socio-economic problem worldwide. According to the Committee on Legal Statistics of the Republic of Kazakhstan, 36,146 road accidents were registered in 2025, resulting in 1,796 fatalities. Committee on Legal Statistics and Special Accounts of the General Prosecutor's Office of the Republic of Kazakhstan. Approximately 87% of incidents were driver-related, including reduced attention and violations of traffic regulations.

These statistics underscore transport system reliability. In this context, Artificial Intelligence (AI) becomes a key component of modern intelligent transportation systems. Within Track A: Student Research, this study focuses on theoretical systematization and analytical evaluation of AI-based safety and energy solutions in electric vehicles.

Recent research emphasizes the transition from rule-based control systems to deep learning-driven architectures in Battery Management Systems (BMS) and Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). Chinese manufacturers such as BYD, Zeekr, and Li Auto are actively implementing AI-based control platforms, accelerating technological development in the EV sector.

However, existing studies rarely provide a comprehensive systematization of AI integration across EV categories or assess applicability in developing countries, including Kazakhstan.

The study aims to systematize the mechanisms for integrating artificial intelligence into electric vehicles and assess their impact on road safety and energy efficiency.

MATERIALS AND METHODS

The methodological framework of the study is based on the analysis and synthesis of secondary data obtained from open-access official statistical sources, scientific publications, and technical documentation of automotive AI platforms.

The research was conducted in the following sequence:

1. Statistical analysis of official road traffic accident data in the Republic of Kazakhstan to substantiate the practical relevance of AI-based safety systems.
2. Systematic literature review of peer-reviewed publications devoted to Artificial Intelligence applications in Electric Vehicles, Battery Management Systems (BMS), and Advanced Driver Assistance Systems (ADAS).
3. Comparative analysis of electric vehicle types according to the level of AI integration in energy management and safety subsystems.
4. Structural and architectural analysis of embedded AI platforms (neural network accelerators, onboard computing systems) used in modern EVs.
5. Conceptual systematization and generalization of AI integration levels and their functional impact on safety and energy optimization.

The applied methods include comparative analysis, classification, analytical synthesis, and abstraction, ensuring methodological consistency and reproducibility of the research results.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Systematization of EV Types by AI Integration Level

China is the leader of the Electric Vehicle market (BYD, Zeekr, Li Auto, Xiaomi). In 2025, BYD sold 2,25 million Battery Electric Vehicles (Wuttke et al., 2025). The growth in demand is driven by increasing requirements for safety, comfort, and energy efficiency, which led to the production of various types of EVs. The systematization of EV is indicated in Table 1.

Table 1 – Classification of Electric Vehicle types

Drive Unit	AI Integration
Battery Electric Vehicle	Maximized BMS, ADAS L2-L4, regeneration
Mild Hybrid Electric Vehicle	Recharge from regenerative braking, prediction of regenerative braking, and traction control
Full Hybrid Electric Vehicle	Recharge from regenerative braking, prediction of regenerative braking
Plug-in Hybrid Electric Vehicle	Switching traction under distinct driving conditions, predictive control
Range-Extended Electric Vehicle	Battery Management optimization, temperature traction

Table 1 emphasizes the increase in the technical capabilities of EVs based on the degree of application of Neural Networks. BEV features higher levels of ADAS, increased driving autonomy, and energy savings. In hybrids, synergy with AI is characterized by a BMS-using battery recharge from regenerative braking (Cavus et al., 2025). In BMS, algorithms such as Random Forest, LightGBM, and BoostX are known for monitoring battery state, temperature, and voltage during the non-linear behavior of EVs.

2. AI Algorithms in BMS

Machine learning models such as Random Forest, Gradient Boosting, and neural networks enable: State-of-charge estimation; Battery degradation prediction; Thermal

anomaly detection; Energy optimization during non-linear load conditions.

Several types of Deep Learning are used to implement them: Supervised, Unsupervised, Reinforcement, and Hybrid. They are based on arranged data analysis, hidden pattern identification, and forecasting for anomaly detection. The algorithms depend on the system of encouragement and judgment while interacting with the surroundings, which are not limited to the service of the inner mechanisms only. The assistance of such algorithms is broadened by helping to preserve the lives of road users.

3. ADAS Architecture and Safety Enhancement

The aim remains relevant today. ADAS, equipped with technologies to improve driving qualifications, has been exploited (Комзалов et al., 2017). Technologies of ADAS, and their functions, can be seen in Figure 1.

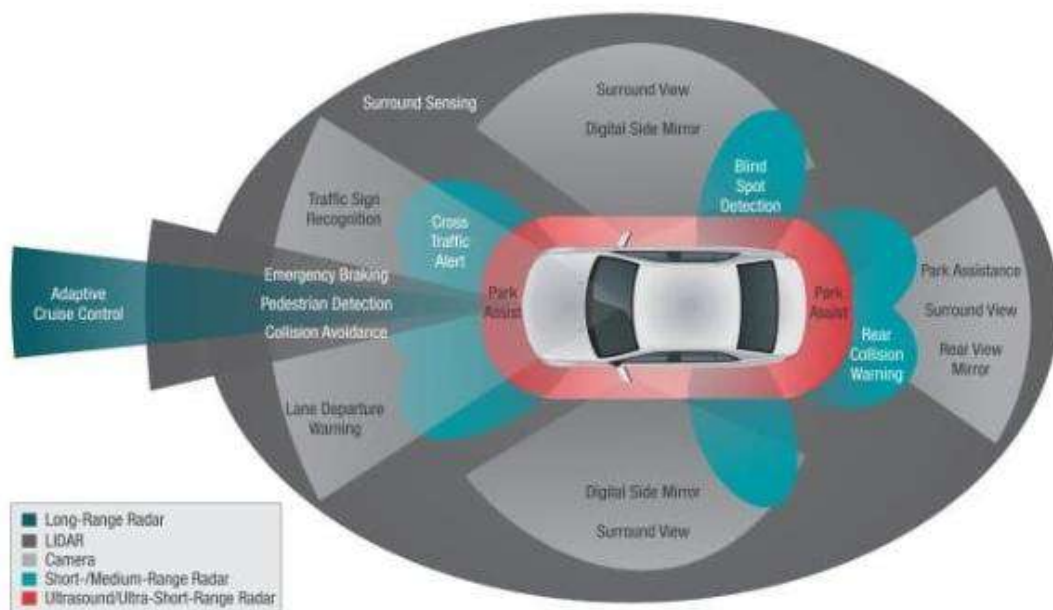


Figure 1. Components of ADAS

Technologies of ADAS are used in active and passive systems. Regardless of the division, the systems aim to ensure drivers' and passengers' security. Technologies reduce human error through precise reactions. As a result, ADAS contributes to a decrease in accident rates and associated injuries. Active systems wholly or partially automate control, providing functions such as Adaptive Cruise Control, Automatic High Beam, Lane Keeping, and Lane Change through management of internal systems. Passive systems warn the driver without intervening in control: blind spot monitoring, lane departure warning, rear collision warning, and traffic sign recognition. The main purpose is to give an audio or visual signal to the driver and drivers of the other vehicles.

The systems function as blocks like the CPU. BYD and Mercedes-Benz EQS have these blocks located under the trunk or hood. In Tesla S and X, the block is placed in the front part of the cabin, reducing the distance to radars and lidars, thus simplifying the connection to sensors. Chinese models known as Zeekr and Li Auto pursued a similar goal, placing AI under the central screen to optimize cabin space for safety and comfort.

4. Architectural Comparison and Interpretation

Various companies developed systems related to an AI combination that work based on entry data analysis, object identification, and decision prediction for movement. NVIDIA Drive is an autonomous car production complex that created Drive Orin, Thor, and Hyperion

with the use of computer cores, graphics processors, and DLA (Youvan, 2024).

DLA has a structure consisting of a CPU, which commands data processing, such as calculating the distance to the vehicle. It works along with Safety Island, which acts as a monitor, preventing the risk of accidents. The combination requires the essential data provided by PVA (Programmable Vision Accelerator) to enhance video quality by setting boundaries. On the same level, a GPU (Graphics Processing Unit) provides parallel object identification. OFA (Optical Flow Accelerator) is responsible for the rapid calculation of optical flow-movement of pixels between consecutive video frames, and image comparison for speed. Information, being processed and reshaped, is transferred to DLA. Input Buffers and Weight Buffers serve as secondary data sources, supplying Systolic Convolution with available information. Systolic Convolution does not have established parameters for the number of computing cores. This leads to diverse calculations, which perform data dispatch to Output Buffers. Upon meeting safety driving conditions, the CPU instructs internal sections of the vehicle for movement.

Such architectural flexibility allows the system to adapt computational resources. As a result, the platform maintains stable performance while ensuring high reliability of perception. The parallel organization of computing elements reduces processing, which is critical for real-time safety applications. The structure of Nvidia Drive is demonstrated in Figure 2.

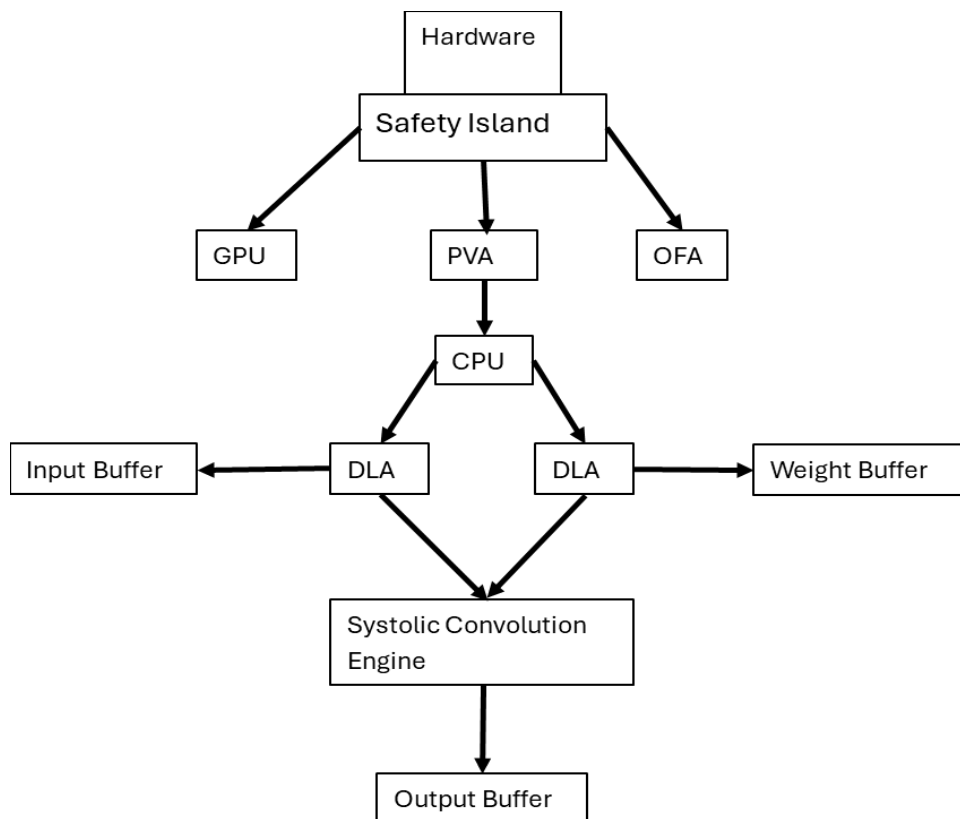


Figure 2. Structure of Nvidia Drive Orin

Tesla has developed an intelligent system called FSD Computer (Hardware 3). In the example of pedestrian detection, the main component, Command Sequencer, signals Data Sequencer about the start of operation (Linja et al., 2022). Data Sequencer loads intermediate data as a distance from the vehicle to a potential pedestrian via Memory Banks. The targeted distance to the pedestrian is evaluated based on their apparent size within the frame, analysis of shadows to infer relative positioning, and compensation for blur. This method, often combined with deep learning models for object detection, enables reliable

distance prediction even from a single camera, supporting real-time decision-making in ADAS for timely warnings or interventions to prevent collisions.

The recognition process takes place after data reformatting at the Data Aligners level. Data Aligners reform the received information to meet the requested standards. In this section, the excess data is removed, and additional data is appended. This alignment and preprocessing step is critical in real-time vision pipelines for ADAS, as it minimizes data movement, whereas it maximizes the utilization of hardware accelerators. In MAC Arrays, 9216 MAC-cores are enabled simultaneously, which are responsible for the main evaluation. The number of cores is established, basically reminding of the matrix with the size of 96x96, which processes data. The solutions are delivered to Memory Banks, the results are recorded in Memory Banks, where a higher-level decision is made. The system rules by ensuring the completion of the above-mentioned steps, inspecting the level of met requirements before commanding the transport to stop in front of the pedestrian. The structure of FSD in Tesla can be seen in Figure 3.

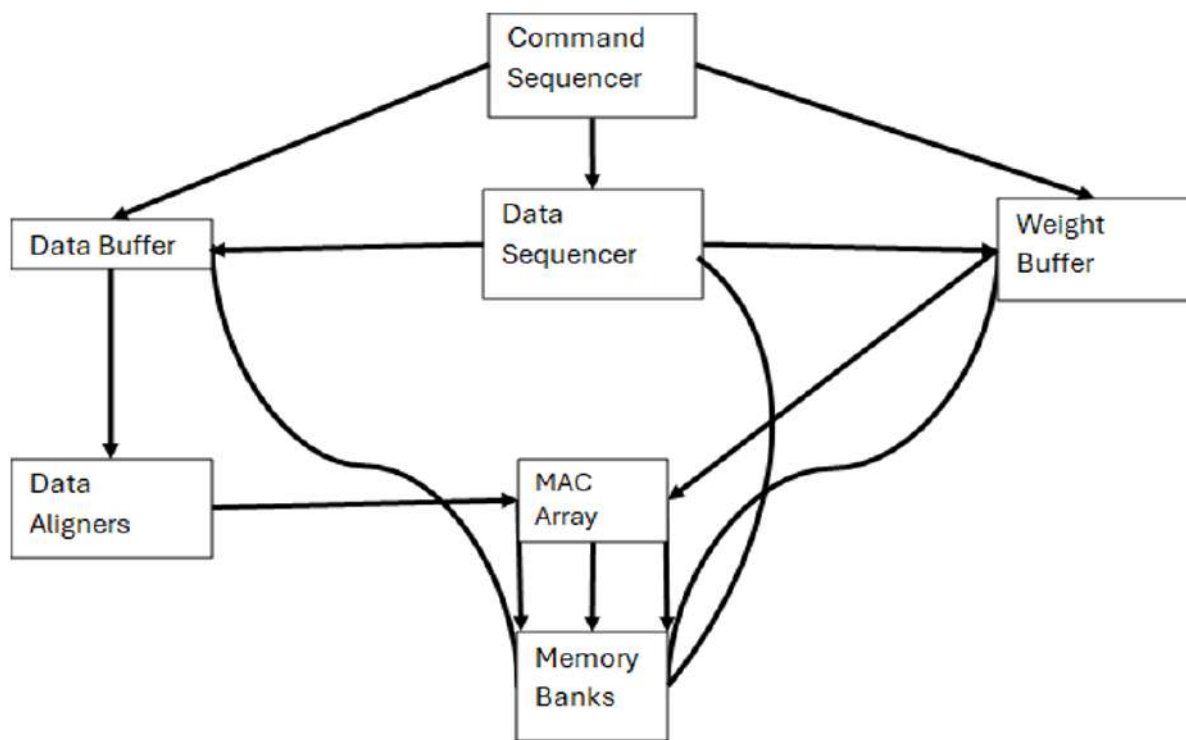


Figure 3. Structure of FSD

These architectures demonstrate architectural flexibility and reduced latency, aligning with 2025–2026 trends in AI-embedded platforms for EVs.

The results expand on existing studies by systematizing AI levels across EV types and linking them directly to safety and energy efficiency. Compared to rule-based systems, AI approaches show superior accuracy, though dependency on high-quality sensor data remains a limitation. The study is limited to a theoretical synthesis of open sources, lacking experimental validation on real vehicles. Results apply best in regions with growing EV adoption and moderate infrastructure. The work contributes to understanding AI-driven predictive maintenance and safety, providing a foundation for regional EV strategies. It expands knowledge on AI-BMS/ADAS synergy and can influence policy for safer, more efficient transportation.

These findings relate directly to the research objectives and pave the way for further practical implementations.

CONCLUSION

Artificial Intelligence, integrated with BMS and ADAS, significantly enhances vehicle reliability, energy efficiency, and internal optimization. These technologies are essential for ensuring road safety and human life preservation. Neural networks enable high-quality data processing, precise real-time decisions without driver intervention, and transformative improvements in transportation. Advanced AI vehicles promise greater convenience, reduced environmental impact, and increased independence for society. Autonomous systems can substantially lower mortality and accident rates, paving the way for deeper AI integration. With continued research, rigorous testing, and safety-focused regulations, AI in autonomous vehicles can make transportation safer, more accessible, and more sustainable, leading us toward a better future on the roads.

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

REFERENCES

- Cavus M., Dissanayake D. & Bell M. (2025). Next Generation of Electric Vehicles: AI-Driven Approaches for Predictive Maintenance and Battery Management. *Energies*, 18, 1041. <https://doi.org/10.3390/en18051041>
- Committee on Legal Statistics and Special Accounts of the General Prosecutor's Office of the Republic of Kazakhstan. Road traffic accident statistics. (2026). <https://gis.kgp.kz/arcgis/apps/experiencebuilder/experience/?id=c048e1f975084dc1957108c00c9fb4d7>
- Linja A., Mamun T. & Mueller S. (2022). When Self-Driving Fails: Evaluating Social Media Posts Regarding Problems and Misconceptions about Tesla's FSD Mode. *Multimodal Technologies and Interaction*, 6, 86. <https://doi.org/10.3390/mti6100086>
- Wuttke T. & Whitfield L. (2025). China's technological catch-up and leapfrogging in electric vehicles: A firm-level study of BYD and CATL. *Progress in Economic Geography*, 4, 100054. <https://doi.org/10.1016/j.peg.2025.100054>
- Youvan D. (2024). Developing and Deploying AI Applications on NVIDIA Jetson Orin NX: A Comprehensive Guide. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15641.43363>
- Комзалов А. М., Шилов Н. Г. (2017). Применение современных технологий в системах помощи водителю автомобиля. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 60(11), 1077–1082. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-11-1077-1082> // Komzalov, A. M., Shilov, N. G. (2017). Primenenie sovremennykh tekhnologiy v sistemakh pomoshchi voditelyu avtomobilya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 60(11), 1077–1082. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-11-1077-1082>

STUDY OF AERODYNAMIC PROPERTIES OF CAR BODY ELEMENTS BY SIMULATION IN A WIND TUNNEL AT THE LUBAN WORKSHOP

УДК 629.331

I.R. Krygin^{1*}, M.S. Muzdybaev¹, V.V. Rogovskiy¹, I.M. Isakanov¹, A.I. Mukhamedova¹

¹ East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

* Corresponding author: Krigin Ilya Romanovich, e-mail: krygin07.07@mail.ru

ABSTRACT. This article examines the results of a study of the aerodynamic properties of automobile body components using physical and numerical modeling methods in a wind tunnel at the Lu Ban workshop. The focus is on analyzing the influence of the shape of individual body components on the aerodynamic drag coefficient, lift, and airflow structure. Flow around typical passenger car body components is simulated, and a comparative analysis of experimental and calculated data is performed.

Keywords: automobile aerodynamics, wind tunnel, drag coefficient, modeling, automobile body, airflow, flow, lift, turbulence, laminar flow, aerodynamic characteristics, air resistance, body shape optimization, experimental research.

INTRODUCTION

Modern automotive engineering places high demands on the aerodynamic performance of vehicles [1-8]. Reducing aerodynamic drag directly impacts fuel efficiency, dynamic performance, vehicle stability, and noise levels. This challenge is particularly pressing in the context of the transition to electric vehicles, where aerodynamic losses have a significant impact on vehicle range.

A vehicle's aerodynamic properties are determined by a combination of geometric parameters of the body, including the shape of the front bumper, hood, windshield, roof, side surfaces, and rear. Even minor changes in the geometry of individual elements can significantly alter the flow pattern and pressure distribution.

The scientific novelty lies in adapting aerodynamic research methods to the conditions of an educational and research workshop, as well as in obtaining experimental data for typical body components.

The practical significance of this work lies in the potential use of the obtained results in the design and modernization of automobile bodies, as well as in the educational process for training specialists in the transportation field.

RESEARCH METHODS

The following methods were used in the study:

- Literature review;
- Physical wind tunnel modeling;
- Numerical air flow simulation;
- Comparative analysis;
- Aerodynamic calculation methods.

The experimental portion of the study was conducted at the Lu Ban Educational and Research Workshop, which is equipped with a small wind tunnel designed for physical modeling of airflow processes around bodies. This setup allows for visualization of the flow structure, as well as qualitative and quantitative assessment of the aerodynamic parameters

of the objects under study.

STUDY RESULTS.

The experiments revealed that the front end shape has the greatest impact on the aerodynamic drag coefficient. A streamlined bumper and a smooth transition from the hood to the windshield help reduce drag by minimizing turbulence zones.

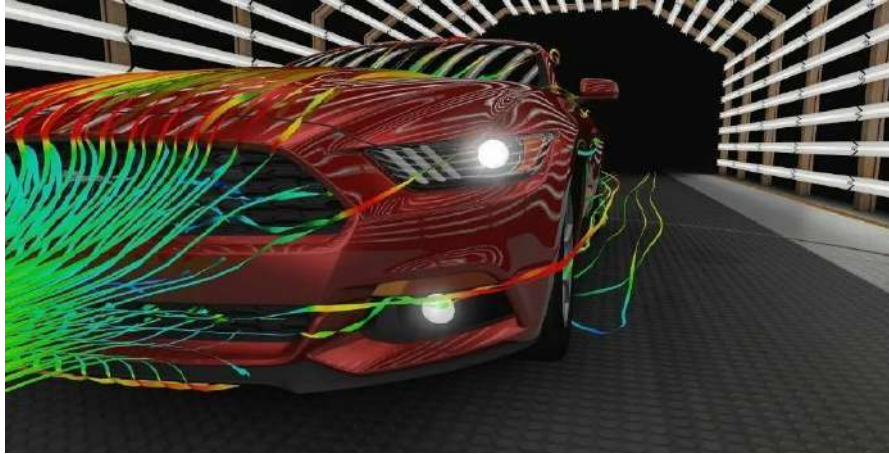


Figure1. Aerodynamic drag of the front part of the body

A roof study showed that a sharp bend leads to premature flow separation and vortex formation. The use of smooth radii stabilizes the flow and reduces lift.

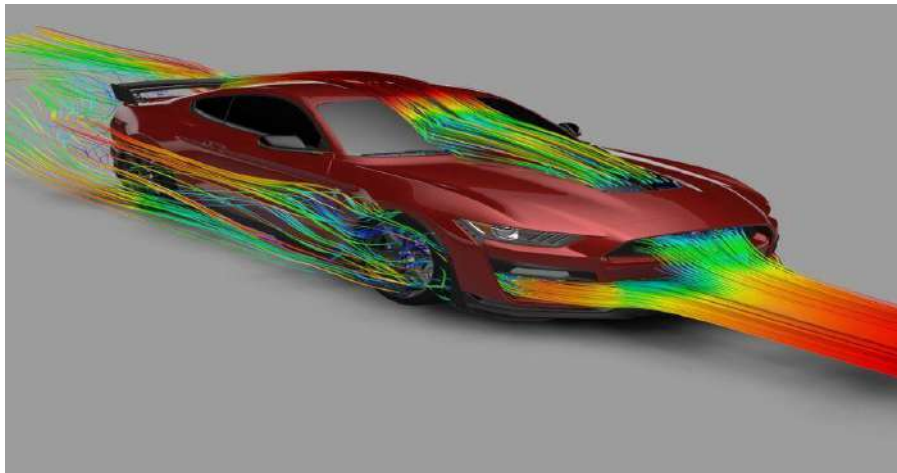


Figure 2. Aerodynamic drag of the upper part of the body

Analysis of the rear of the car confirmed the effectiveness of the use of spoilers and diffusers, which help to reduce the vacuum behind the car and reduce aerodynamic drag.



Figure 3. Rear aerodynamic drag analysis

A comparison of experimental and calculated data showed satisfactory agreement between the results, confirming the validity of the chosen methodology.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AERODYNAMICS.

Artificial intelligence is used in aerodynamics to analyze experimental and calculated data and to optimize the shape of aerodynamic objects. Machine learning methods enable the relationship between the geometry of body elements and aerodynamic characteristics such as drag coefficient and lift.

AI is used to accelerate numerical modeling by acting as an approximator for CFD calculation results, significantly reducing computational costs in multivariate studies. Furthermore, AI algorithms are used for automated optimization of body element shapes to reduce aerodynamic drag.

In small-scale wind tunnels, AI can be used to process experimental data and automatically identify flow separation and vortex formation zones, improving the accuracy and objectivity of research.

CONCLUSION

The study demonstrated that the wind tunnel simulation method used at the Lu Ban workshop is an effective tool for studying the aerodynamic properties of automobile body components. The results confirm the significant influence of body component shape on vehicle aerodynamic performance.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflicts of interest. Funding: This study was conducted without external funding.

ACKNOWLEDGMENTS: The author thanks colleagues for their methodological support and helpful discussions, as well as the anonymous reviewers for their valuable

comments that contributed to improving the quality of this article.

DISCLOSURE OF USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES:

Generative AI tools for language editing and text structuring were used in preparing this article.

BIBLIOGRAPHY

- Hucho, W.-H & Sovran, G.(2003). Aerodynamics of Road Vehicles. Annual Review of Fluid Mechanics. 25. 485-537. DOI: 10.1146/annurev.fl.25.010193.002413.
- Joseph, Katz & Garcia, Darwin & Sluder, Robin. (2004). Aerodynamics of Race Car Liftoff. DOI: 10.4271/2004-01-3506.
- Gao, Chenxi. (2023). Effect of front windshield angle on drag coefficient of electric vehicles. Theoretical and Natural Science. 12. 101-107. DOI: 10.54254/2753-8818/12/20230442.
- Ravelli, Umberto & Ravelli, Silvia. (2026). An Overview of Drag Reduction Methods in Road Cars. Fluid Dynamics & Materials Processing. 1-10. DOI: 10.32604/fdmp.2026.075225.
- Fallatah, Ahmad & Abaaltahin, Ali & Almatheeb, Yazeed & Alharbi, Bijad & Redhwi, Ibraheem. (2026). Aerodynamics of Road Vehicles: A Comprehensive Review. Engineering and Applied Sciences. 11. 41-47. DOI: DOI: DOI: 10.11648/j.eas.20261101.16.
- Mishra, Sujit. (2017). Simulation of Aerodynamic Flow Parameters over a Simplified Sedan Car. International Journal of Engineering, Science and Mathematics. DOI: 6. 1265-1274.
- Pan, Cheng. (2025). Aerodynamic Considerations and Optimization in Vehicle Body Design. Applied and Computational Engineering. 213. None-None. DOI: 10.54254/2755-2721/2026.MH30842.
- Alwi, Muhammad & Demmanggasa, Yultan & Yunus, Kartini & Fahar, Andi & Djamro, Irvan. (2025). The Study of The Influence of Vehicle Body Aerodynamics on Energy Consumption in Electric Vehicles Using Integrated CFD Simulation. Jurnal Ar Ro'is Mandalika (Armada). 6. 698- 709. DOI: 10.59613/armada.v6i2.5873

THE RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR ENHANCING THE RELIABILITY OF URBAN BUS FLEETS THROUGH SPARE PARTS INVENTORY MANAGEMENT USING DIGITAL TECHNOLOGIES

УДК 629.33

D.M. Myrzabekova¹, N.K. Abdrakhmanov^{1*}, Petr Bouchner²

¹D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Kazakhstan

²Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic

*Corresponding author: Abdrakhmanov Nurlybek Kairatbekuly, e-mail: a_nurlybek_k@mail.ru

ABSTRACT. In the context of the rapid digital transformation of the transportation sector, artificial intelligence (AI) technologies are increasingly being applied to enhance the reliability and operational efficiency of urban bus fleets. Traditional spare parts inventory management in most transport enterprises remains reactive, relying on manual decision-making and stock depletion policies, which results in shortages of critical components, increased vehicle downtime, and higher operational costs. This research proposes the development of an AI-driven adaptive methodology for spare parts inventory management based on failure rate modeling and data-driven predictive analytics. The approach integrates operational data, including failure history, vehicle mileage obtained from GPS systems, fleet age, and seasonal and climatic conditions. Machine learning algorithms are employed to identify patterns in failure dynamics and to generate short-term demand forecasts for spare parts. The proposed model enables intelligent calculation of optimal inventory levels and automated procurement recommendations. The expected outcome is the development of an AI-based decision-support system that enhances the reliability of the bus fleet, reduces spare parts shortages, minimizes downtime, and improves inventory cost efficiency. The methodology will be validated within a real-world urban transport enterprise.

Keywords: machine learning, urban bus fleet reliability, spare parts inventory management, failure rate modeling, digital transformation, predictive analytics, urban transportation systems.

RELEVANCE OF THE STUDY

Improving the reliability of urban bus fleets represents one of the priority objectives in the development of modern transportation systems. In the context of digital transformation in the transport sector and the implementation of artificial intelligence technologies, enhancing the operational reliability of urban bus fleets becomes a key factor in ensuring the sustainable functioning of passenger transportation systems. The reliability of rolling stock directly affects road safety, schedule adherence, the economic performance of transport enterprises, and the quality of public transport services (Ifraz M. et al., 2024).

Current spare parts inventory management practices in most transport enterprises remain predominantly reactive, relying on empirical decision-making or procurement triggered by stock depletion. Such an approach does not account for the dynamic nature of failure rates over time, nor does it consider operational conditions, fleet age, accumulated mileage, or seasonal and climatic factors. The insufficient integration of operational and external data into material resource planning processes increases the likelihood of shortages of critical components, leads to extended vehicle downtime, and results in inefficient financial resource utilization.

This issue becomes particularly significant in regions characterized by pronounced seasonality and continental climatic conditions, where temperature fluctuations and road

factors substantially influence the wear intensity of vehicle components. At the same time, conventional inventory management methods (ABC analysis, fixed Min–Max levels, and normative approaches) do not provide adaptive consideration of failure dynamics and fail to utilize the potential of modern digital data (Ifraz M. et al., 2023).

Therefore, there is a need to develop a scientifically grounded methodology for spare parts inventory management based on failure rate modeling and the application of machine learning techniques to forecast demand while accounting for operational and climatic factors. The implementation of such an approach will enable the transition from a reactive to a proactive reliability management system and support the development of an intelligent decision-support system based on large-scale operational data analytics, aligned with contemporary trends in artificial intelligence and digital transformation in transportation systems (Ifraz M. et al., 2024).

RESEARCH HYPOTHESIS. It is hypothesized that the integration of operational data (failure history, vehicle mileage, and fleet age) and external factors (seasonal and climatic conditions) into an adaptive predictive spare parts inventory management model will lead to a statistically significant reduction in spare parts shortages and bus downtime, while simultaneously optimizing inventory levels, compared to the currently applied normative and reactive procurement methods.

RESEARCH OBJECT. The rolling stock of urban passenger transport (GAZ A65R33).

RESEARCH SUBJECT. Methods and digital tools for managing the maintenance system and spare parts inventory of urban buses aimed at improving operational efficiency.

RESEARCH OBJECTIVE. The development and scientific justification of a digital adaptive spare parts inventory management system for urban buses based on failure rate modeling and the application of machine learning methods, ensuring improved operational reliability of the rolling stock and optimization of inventory levels.

APPLIED METHODS

The study employs methods of reliability theory for technical systems, mathematical modeling, and digital analysis of operational data, as well as forecasting and optimization techniques applied in material resource management of transport enterprises.

The following scientific approaches and methods are used in the research:

1. systems analysis — for examining the existing spare parts inventory management system and identifying its limitations under the operating conditions of an urban bus fleet.
2. statistical data analysis — for processing failure records of components and assemblies, identifying patterns in failure rate dynamics, and assessing the influence of mileage, fleet age, and seasonal–climatic factors (Panagiotidou S. et al., 2020).
3. reliability theory methods — for modeling failure intensity of rolling stock elements and evaluating operational reliability indicators.
4. mathematical modeling — for developing a spare parts demand forecasting model and determining optimal inventory levels (Yang Y. et al., 2022).
5. machine learning methods — for constructing an adaptive demand forecasting algorithm based on operational and external data analysis (Fan L. et al., 2023).
6. simulation modeling — for evaluating the effectiveness of different inventory management strategies and analyzing stockout probabilities and inventory-related costs (Pınar Ç. et al., 2021).
7. experimental validation — for verifying the applicability and effectiveness of the developed methodology using GAZ A65R33 as a case study.

RESEARCH TASKS

In accordance with the stated objective, the study addresses the following tasks:

- analysis of existing spare parts inventory management methods and identification of their limitations under the operating conditions of an urban bus fleet;
- analysis of failure statistics of bus components and assemblies to determine patterns in the variation of failure intensity depending on mileage, fleet age, and seasonal–climatic factors;
- development of a mathematical model of failure intensity for rolling stock components;
- development of a spare parts demand forecasting algorithm based on machine learning methods using operational data;
- development of a digital adaptive model for calculating optimal inventory levels;
- creation of a simulation model of spare parts warehouse operations for evaluating the effectiveness of the proposed system;
- experimental research and validation of the developed methodology using GAZ A65R33 buses as a case study;
- assessment of the economic and operational effectiveness of the implementation of the developed system.

PRACTICAL SIGNIFICANCE OF THE STUDY

The practical significance of the study lies in the potential implementation of the developed digital adaptive spare parts inventory management system within transport enterprises to enhance the operational reliability of urban bus fleets.

The research findings contribute to the improvement of material and technical resource planning processes, reducing the risk of spare parts shortages, minimizing vehicle downtime, and ensuring more stable adherence to route schedules.

The proposed methodology enables optimization of inventory levels and reduction of storage and procurement costs through the application of demand forecasting algorithms based on operational data analysis and machine learning techniques.

Furthermore, the results support the digital transformation of transport enterprise management systems and facilitate the development of intelligent decision-support tools for rolling stock operation and maintenance.

The scientific novelty of the study lies in the formulation of an integrated reliability–inventory framework for urban bus fleets that combines stochastic failure rate modeling with machine learning-based demand forecasting. The methodology incorporates heterogeneous operational data, including mileage, fleet age, and failure statistics, together with seasonal–climatic variables, enabling a data-driven optimization of spare parts inventory and a measurable improvement in operational reliability.

EXPECTED RESULTS AND VALIDATION OF THE STUDY

The expected outcome of the research is the development of a scientifically grounded digital adaptive methodology for spare parts inventory management in urban bus fleets, aimed at shifting from a reactive procurement model to proactive predictive planning. The study will define the structure of an operational data repository incorporating information on component and assembly failures, vehicle mileage, service life of the rolling stock, seasonal operating conditions, and records of spare parts replacement. Based on these data, a mathematical model of failure intensity and a machine learning-based algorithm for forecasting spare parts demand will be developed. The practical result is expected to be a digital decision-support system capable of determining rational inventory levels, identifying the risk of shortages of critical components in a timely manner, and generating recommendations for spare parts procurement for short- and medium-term planning horizons.

The developed methodology is planned to be validated using GAZ A65R33 buses under the operating conditions of an active transport enterprise. The effectiveness of the proposed approach may be assessed by comparing the results of the predictive model with

actual operational data over a selected period, as well as through simulation modeling of different inventory management scenarios. The main evaluation criteria should include the accuracy of spare parts demand forecasting, the reduction in the frequency of spare parts shortages, the decrease in bus downtime caused by technical failures, changes in the coefficient of technical readiness, and the dynamics of storage and emergency procurement costs. In addition, the study will assess the extent to which the use of a digital adaptive system can improve the stability of bus fleet operation under seasonal fluctuations in workload and the uneven failure behavior of individual components (Goldsmith R. L. et al., 2025).

The practical implementation of the research results will provide a foundation for the further integration of the developed tools into the maintenance and material resource management processes of transport enterprises. This will make it possible to use predictive estimates not only for warehouse management, but also for adjusting maintenance schedules, planning repair interventions in advance, and improving the overall reliability of urban passenger transport operation. Therefore, the expected effect of implementing the developed methodology will be expressed not only in resource savings, but also in improved service regularity, reduced operational risks, and the creation of prerequisites for the digital transformation of bus fleet management.

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

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

REFERENCES

- İfraz M., Aktepe A., Ersöz S., & Çetinyokuş T. (2023). Demand forecasting of spare parts with regression and machine learning methods: Application in a bus fleet. *Journal of Engineering Research*, 11(2). <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100057>
- İfraz M. (2024). Sequential predictive maintenance and spare parts management with data mining methods: A case study in bus fleet. *The Journal of Supercomputing*. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06297-1>
- Fan L., Liu X., Mao W., Yang K., & Song Z. (2023). Spare parts demand forecasting method based on intermittent feature adaptation. *Entropy*, 25(5), 764. <https://doi.org/10.3390/e25050764>
- Yang Y., Liu W., Zeng T., Guo L., Qin Y., & Wang X. (2022). An improved stacking model for equipment spare parts demand forecasting based on scenario analysis. *Scientific Programming*, 2022, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2022/5415702>
- Pinçe Ç., Turrini L., & Meissner J. (2021). Intermittent demand forecasting for spare parts: A critical review. *Omega*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2021.102513>
- Panagiotidou S. (2020). Joint optimization of spare parts ordering and age-based preventive replacement. *International Journal of Production Research*, 58(20), 6283–6299. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1677959>
- Goldsmith R. L., & Sachs A.-L. (2025). Spare part demand forecasting in every phase: A data pooling approach to the Bass life cycle model. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2607643>

OPTIMIZATION OF SCANNING PARAMETERS AND ERROR MINIMIZATION USING ZG RIGELSCAN PLUS FOR ENHANCED ACCURACY IN REVERSE ENGINEERING OF WORN MECHANICAL COMPONENTS FOR CNC MACHINING

UDK 621.9

U.Ibtasam¹, A. D., Kismetova², K. K. Kombayev^{1*}, E.Argyn¹

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

² S.Amanzholov VKU, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

* Corresponding author: Kombayev Kuat, e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz

ABSTRACT: This study extends previous applications of the ZG RigelScan Plus handheld blue laser scanner from compensator restoration to the more complex task of reverse engineering a worn turbine impeller, a critical component in oil, gas, and mining pumps widely used in Kazakhstan. The impeller's curved blades, reflective metallic surfaces, and deep cavities present significant scanning challenges, including laser tracking loss, data gaps, and alignment errors. To overcome these obstacles, a combination of surface preparation, anti-reflective coating, strategic marker placement, and dynamic referencing was implemented. Scanning was performed from different angles, producing a dense, high-resolution point cloud. Subsequent post-processing included noise reduction, mesh refinement, and generation of a parametric solid CAD model, ensuring geometric fidelity suitable for CNC remanufacturing.

The methodology demonstrates practical and scientific significance by enabling rapid, precise reconstruction of worn components, reducing reliance on imported parts and minimizing equipment downtime. Results show that optimized scanning and modeling techniques can reliably capture complex geometries with reflective and inaccessible surfaces, providing a workflow directly applicable to heavy industry. This work contributes both to digital metrology advancements and the engineering practice of remanufacturing legacy mechanical components.

KEYWORDS: 3D scanning; turbine impeller; ZG RigelScan Plus; reverse engineering; CAD modeling; precision manufacturing; industrial remanufacturing

INTRODUCTION

In Kazakhstan's extractive industries—oil, gas, and mining—maintaining high operational efficiency depends critically on the timely remanufacturing of worn or damaged components, which reduces equipment downtime and supports industrial import independence. Conventional metrology methods, such as coordinate measuring machines (CMMs), often fail to accurately capture complex geometries with hidden features, degraded surfaces, or highly reflective metallic finishes, necessitating the adoption of non-contact 3D scanning technologies [1].

This research extends previous applications of the ZG RigelScan Plus handheld blue laser scanner, initially used for simpler components like compensators, to the reverse engineering of a worn turbine impeller, a critical and highly complex part in centrifugal pumps widely employed in Kazakhstan's heavy industries. The impeller features curved blades, deep pockets, and metallic surfaces prone to corrosion and wear, which create significant scanning challenges, including laser tracking loss, specular reflections, and alignment errors during handheld operation [2].

Blue laser scanning provides superior performance over red laser or structured light alternatives, particularly for reflective, dark, or metallic substrates, by reducing speckle noise and enhancing data integrity [3]. The handheld configuration of the RigelScan Plus allows flexible capture of intricate curvatures and inaccessible regions, while high dynamic range

(HDR) modes improve reliability under variable lighting and surface contrasts [4]. Dynamic referencing and optimized marker placement, combined with surface matting, further minimize errors and stabilize tracking without rigid fixturing.

The objectives of this study are:

- To implement customized scanning strategies—including surface preparation, marker deployment, HDR utilization, and calibration—to minimize errors on reflective, complex geometries.
- To generate a high-fidelity solid CAD/CAM model from the refined point cloud and conduct quantitative deviation analysis.
- To develop and evaluate a robotic remanufacturing workflow for defect restoration using the Kawasaki RS-010L manipulator, including program generation for CNC-compatible material deposition.

By executing these objectives, this work demonstrates the effectiveness of handheld blue laser scanning and integrated CAD/CAM modeling for precise restoration of critical components, providing a practical methodology to enhance Kazakhstan's industrial sustainability and technological independence.

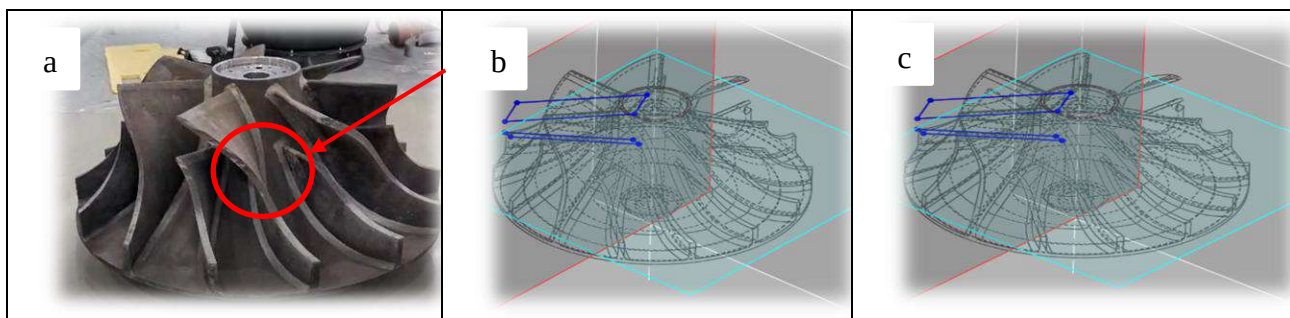
MATERIALS AND RESEARCH METHODS

The experimental procedure observed a systematic workflow for reverse engineering the worn turbine impeller using the ZG RigelScan Plus handheld blue laser 3D scanner. This portable device employs blue laser technology with multiple scanning modes, providing certified accuracy up to 0.02 mm, a large scanning area of up to 600 × 550 mm, and high measurement rates suitable for industrial components [5].

The impeller was thoroughly cleaned to remove oil, dirt particles, corrosion, and loose particles, as surface contaminants can generate noise or gaps in the point cloud. For reflective metallic surfaces and shiny blade areas, a thin anti-reflective coating (matting spray) was applied to minimize laser reflections and enhance data capture without altering the part geometry.

Calibration was performed using the scanner's high-contrast calibration plate with predefined positioning targets, placed on a stable flat surface. The scanner was carefully aligned to optimize camera parameters and ensure spatial accuracy before scanning.

The impeller was then positioned for scanning to allow multi-angle coverage, and markers were applied on non-critical surfaces and around deep blade cavities to improve tracking stability. The resulting scans produced a dense and precise point cloud, which served as the foundation for subsequent mesh refinement and CAD modeling. Figure 1 illustrates the impeller in multiple views, including defect side view, modeling side view, 2D view, mesh view, 3D top view, and 3D side view.



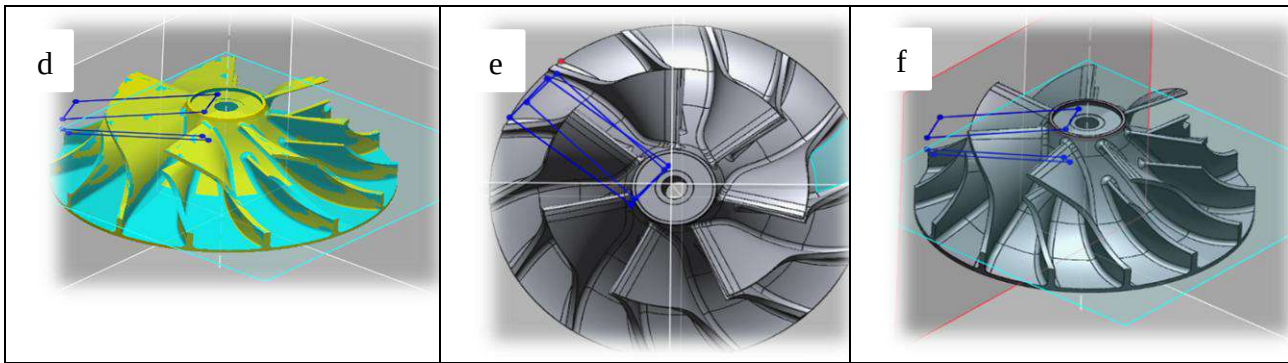


Figure 1. 3D modeling of the turbine impeller: (a) defect side view; (b) modeling side view; (c) 2D projection; (d) mesh representation; (e) 3D top view; (f) 3D side view.

Scanning was conducted in the “Smart Engineering” competence center at D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. The turbine impeller, manufactured from austenitic stainless steel 12X18H10T, was mounted on a stable turntable to enable multi-angle access. Markers were strategically applied on non-critical surfaces and around deep blade cavities to enhance tracking stability and prevent alignment loss during handheld operation. The chemical composition of the base material is presented in Table 1 according to GOST 5632-2014. For reflective metallic surfaces and shiny blades, a thin anti-reflective coating (matting spray) was applied to reduce laser reflections and improve point cloud quality without altering geometry [6].

The ZG RigelScan Plus handheld blue laser scanner was operated in multiple modes to optimize data capture:

Standard Mode: High-speed scanning for large-area coverage.

Fine Mode: High-resolution capture of curved blades, undercuts, and deep pockets.

Smart HDR Mode: Dual exposure for reflective or dark surfaces, addressing sharp transitions in material reflectivity.

Dynamic referencing technology was enabled, allowing Unrestricted movement of the scanner or the impeller without loss of accuracy [7]. The operator scanned from various angles, maintaining an approximate 300 mm stand-off distance with 30–50% scan overlap, ensuring seamless merging of multiple scans. This workflow generated a dense, high-resolution point cloud containing millions of points in real time, forming the basis for subsequent mesh refinement and CAD/CAM modeling [8].

For the subsequent remanufacturing phase, the Kawasaki RS-010L industrial robotic manipulator was incorporated into the workflow [9]. Manufactured by Kawasaki Robotics (Japan), this 6-axis robot is ideally suited for precision cladding of complex geometries and features:

Degrees of freedom: 6

Positioning accuracy: ± 0.06 mm

Maximum linear speed: 13,100 mm/s

Reach: 1,925 mm

Payload: 10 kg

Integration of the RS-010L with CAD/CAM data from the 3D scan allows for precise robotic surfacing and defect restoration, directly linking digital scanning, modeling, and automated material deposition for industrial-scale remanufacturing.

Table 1. Chemical composition of turbine impeller steel 12X18H10T and surfacing wire (wt.%) according to GOST standards

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Notes
Impeller Steel 12X18H10T	0.08 max	1.0 max	2.0 max	0.035 max	0.03 max	17.0–19.0	9.0–11.0	0.75–1.0	0.10–0.16	GOST 5632-2014
Surfacing Wire СВ-08Г2С / аналог	0.08–0.12	0.7–1.0	1.0–1.5	0.035 max	0.03 max	1.0–1.5	0.8–1.2	–	–	GOST 2246-70

RESULTS AND THEIR DISCUSSION

The raw point cloud data from the ZG RigelScan Plus scanner was imported into specialized software, including ZG proprietary tools, Geomagic Design X, and Siemens NX. Post-processing involved a structured workflow:

Noise removal and outlier filtering to eliminate measurement artifacts.

Hole filling and mesh densification to generate a continuous surface.

Alignment and merging of multiple scans to produce a complete, coherent model.

Deviation analysis (point-to-mesh comparison) confirmed adherence to the scanner's accuracy specifications.

The refined mesh was subsequently converted into a parametric solid CAD model through reverse engineering, including feature extraction of blades, hub, and shroud, surface reconstruction, and lofting, ensuring compatibility with Siemens NX and FANUC CNC systems. This model provides the foundation for precision remanufacturing workflows, enabling accurate defect analysis and preparation for robotic surfacing.

Defect Restoration and Robotic Remanufacturing

To extend beyond scanning, the methodology includes a remanufacturing phase focused on defect restoration via additive deposition welding (cladding). The identified defect (position 1 in Figure 1a) is restored by layered material deposition following the original geometry, simulated for execution on the Kawasaki RS-010L industrial robotic manipulator [10].

Cladding was performed using Gas Metal Arc Welding (GMAW) or Cold Metal Transfer (CMT) mode, with the welding torch mounted on the robot wrist. Optimized parameters for low dilution, minimal heat input, and complete defect filling on 12X18H10T impeller substrates are summarized in Table 2.

Table 2. Recommended GMAW/CMT Repair Welding Parameters for 12X18H10T Impellers

Parameter	Recommended Range / Value	Notes
Welding current	180–220 A	Adjusted per layer thickness
Arc voltage	22–26 V	Stable arc for stainless steel
Wire feed speed	8–12 m/min (1.2–1.6 mm wire)	Matches current and travel speed
Travel speed	300–500 mm/min	Maintains uniform bead
Weave amplitude / width	3–6 mm	Ensures full coverage of defect
Shielding gas	80% Ar + 20% CO ₂	Minimizes oxidation, stabilizes arc
Gas flow rate	15–20 L/min	Ensures adequate coverage

Interpass temperature	<150 °C	Prevents thermal distortion and cracking
Number of layers	2–3	Depending on defect depth
Overlap ratio	30–50%	Ensures smooth fusion between beads

These cladding parameters ensure metallurgical bonding with low dilution (<10–15%), a controlled heat-affected zone, and hardness suitable for wear-resistant restoration of pump impellers.

To implement defect restoration, a simplified Kawasaki AS language program was developed for the cladding sequence (conceptual), assuming tool calibration, integration with the welding power source, and predefined CAD-derived toolpaths. Integration with CNC systems, such as Siemens NX or FANUC, Permits for adaptive toolpaths directly derived from the CAD model, enabling automated, precise material deposition on the defect site. This approach minimizes human error, improves repeatability, and supports high-throughput remanufacturing.

The program utilizes:

ARCSET – for defining arc and deposition parameters,

AWELD – for arc initiation and control,

LMOVE – for precise linear deposition along CAD-generated coordinates.

Adaptive features, such as through-arc sensing, can dynamically adjust welding parameters in real time. The ARCSET command defines the arc-based material deposition parameters, including current, voltage, wire feed rate, and shielding gas flow. AWELD initiates the deposition arc using the selected parameter set, while LMOVE performs linear tool motion along CAD-generated coordinates, depositing material precisely on the damaged blade surface.

Figure 2 illustrates additional perspectives of the turbine impeller 3D model, highlighting mesh quality, surface reconstruction, and simulated deposition paths. The optimized scanning workflow produced a dense point cloud with minimal noise (RMSE <0.05 mm in fine mode), enabling the creation of a high-fidelity CAD model. Defect analysis (Figure 1a) revealed a cavity depth of approximately 2.5 mm at position 1, requiring targeted cladding. Robotic cladding simulations on the RS-010L manipulator projected restoration times under 30 minutes per defect, with post-machining tolerances maintained at ± 0.06 mm. Using the optimized parameters (current 180–220 A, travel speed 300–500 mm/min, wire feed 8–12 m/min), deposition achieved low dilution, complete defect filling, and crack-free welds.

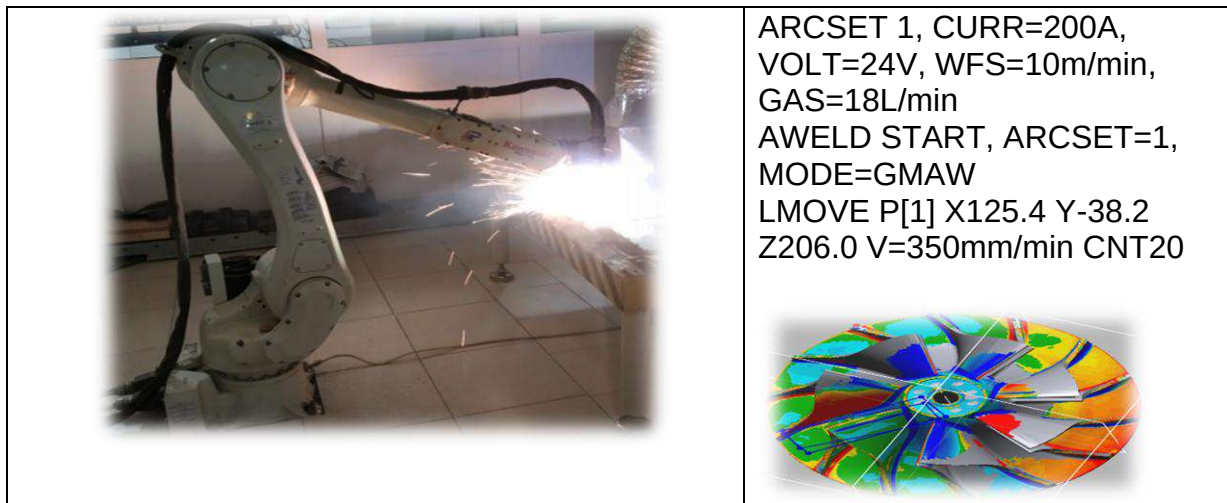


Figure 2. CAD/CAM-based cladding simulation and 3D modeling of the turbine impeller, showing toolpaths, defect location, and deposition sequence.

Micro hardness distribution across the clad cross-section (HV0.5, load 0.5 kg) typically shows:

- Substrate steel (12X18H10T): 180–220 HV
- Heat-affected zone: 250–350 HV
- Deposited clad layer (hard-facing alloy): 400–550 HV, peaking near the surface due to fine microstructure and carbide precipitation

This gradient ensures enhanced wear resistance of the restored layer while maintaining substrate ductility.

Example CNC program for RS-010L cladding (conceptual, based on CAD toolpaths):

! Define arc parameters ARCSET 1, CURR=200A, VOLT=24V, WFS=10m/min, GAS=18L/min

! Start arc AWELD START, ARCSET=1, MODE=GMAW

! Linear deposition along CAD path

LMOVE P[1] X125.4 Y-38.2 Z206.0 V=350mm/min CNT20

LMOVE P[2] X130.0 Y-35.0 Z205.5 V=350mm/min CNT20

LMOVE P[3] X135.0 Y-32.0 Z205.0 V=350mm/min CNT20

! End arc

AWELD STOP

Program description:

- ARCSET – defines arc parameters: current, voltage, wire feed, and gas flow.
- AWELD START/STOP – initiates and terminates the welding arc.
- LMOVE P[n] – moves the welding torch along pre-calculated CAD points at specified velocity (V) and number of repetitions (CNT), ensuring uniform deposition along the defect.

This approach allows fully automated, precise cladding, minimizing operator error, enhancing repeatability, and supporting high-throughput remanufacturing. The workflow demonstrates the integration of 3D scanning, CAD modeling, and robotic cladding as a complete digital restoration chain for complex turbine impellers.

CONCLUSION

This study demonstrates the effective integration of high-resolution 3D scanning, CAD modeling, and robotic GMAW/CMT cladding for the remanufacturing of worn turbine impellers made from 12X18H10T stainless steel. Optimized scanning and surface preparation engineered dense, accurate point clouds, enabling high-fidelity CAD models. Robotic cladding simulations and CNC-based deposition programs ensured precise defect restoration, low dilution, and controlled hardness profiles, achieving post-machining tolerances within ± 0.06 mm.

The workflow provides a repeatable, efficient, and automated solution for restoring complex components, reducing import dependency, minimizing equipment downtime, and supporting local industrial sustainability. This approach confirms the practical value of combining digital scanning with robotic additive repair for critical components in Kazakhstan's extractive industries.

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

FUNDING

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan. «Creation of a laboratory of design, modeling and engineering analysis to optimize the designs of pipeline fittings of Kazakhstan production»

GRATITUDE This section expresses gratitude to authors and organizations that contributed to the research. I express my gratitude for their methodological support and helpful discussions, as well as to the anonymous reviewers for their valuable feedback that

helped improve the quality of the article.

NOTICE ABOUT THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: During the preparation of this article, the authors utilized OpenAI's ChatGPT (GPT-5) to assist with language editing, phrasing, and enhancing clarity. All scientific content, ideas, and results presented remain entirely the authors' own.

REFERENCE

- 1) Bonin R., Khameneifar F., Mayer J.R.R. (2021). Evaluation of the Metrological Performance of a Handheld 3D Laser Scanner Using a Pseudo-3D Ball-Lattice Artifact. *Sensors*, 21(6), 2137. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/2137>
 - 2) Application of 3D Laser Scanning Technology Using Laser Radar System to Error Analysis in the Curtain Wall Construction. <https://doi.org/10.3390/rs15010064>
 - 3) Ruebel O., Klenke R. (2019). 3D Optical Metrology of Complex Components in Industrial Environments. *Optics and Lasers in Engineering*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.11.020>
 - 4) Wang X., Xie Z., Wang K., Zhou L. (2018). Research on a handheld 3D laser scanning system for measuring large-sized objects. *Sensors*, 18(10), 3567. <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3567>
 - 5) Robin H. Helle, Hirpa G. Lemu. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control.
 - 6) Haleem A., et al. (2022). Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 3, 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003>
 - 7) Debnath B. (2025). Integrating reverse engineering for digital model restoration: digital scanning, simulation, and additive manufacturing. *Robotics*, 5(4), 66. <https://doi.org/10.3390/metrology5040066>
 - 8) Buonamici F. (2018). Reverse engineering modeling methods and tools: a survey. *CAD (Computer-Aided Design)*.
 - 9) Curiel D., Veiga F., Suarez A., Villanueva P. (2023). Advances in robotic welding for metallic materials: application of inspection, modeling, monitoring and automated operations. *Metals*, 13(4), 711. <https://doi.org/10.3390/met13040711>
- Kombayev, K., Sypainova, G., Khoshnaw, F., Kozhakhmetov, Y., Kurbanbekov, Sh., & Tabiyeva, Y. (2025). Practical and theoretical optimization of plasma cutting parameters for enhanced quality and efficiency in steel alloy processing. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. <https://doi.org/10.1108/MMMS-09-2024-0255>

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS IN AN INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM FOR PREDICTING PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS

UDC 004.8:620.22

M.S. Sarsenbay^{1*}, Z.G. Abilbekov¹

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

*Corresponding author: Magzhan Sarsenbay, e-mail: magzhansaken@gmail.com

ABSTRACT. Predicting the mechanical and physical properties of composite materials is a critical and resource-intensive task in materials science and engineering. Traditional experimental characterization requires weeks of laboratory testing and costly specimen preparation. This paper presents the design and implementation of an information-analytical system (IAS) for the data-driven prediction of composite material properties using machine learning (ML). The system consolidates three complementary ML paradigms: regression models (Multiple Linear Regression, Ridge, Lasso), tree-based ensemble methods (Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost), and deep neural networks (Multilayer Perceptron, 1D Convolutional Neural Network). The IAS architecture integrates a data preprocessing module (IQR outlier removal, k-NN imputation, Min-Max/StandardScaler normalization), a feature importance engine (SHAP analysis), a model training and 5-fold cross-validation framework, and a Streamlit-based interactive prediction interface with uncertainty quantification. Experimental validation was conducted on two benchmark datasets: fiber-reinforced polymer (FRP) composites ($n = 1,030$) and ceramic-matrix composites (CMC, $n = 487$). Target properties include tensile strength, elastic modulus, Vickers hardness, and thermal conductivity. XGBoost achieved the highest accuracy for mechanical properties ($R^2 = 0.94$, RMSE = 48.3 MPa, MAPE = 4.7 %), while the MLP neural network outperformed all models for thermal conductivity ($R^2 = 0.93$). SHAP analysis identified volume fraction and fiber orientation angle as dominant predictors (80 % combined variance). The IAS reduces property estimation time from weeks of laboratory work to under two seconds of computational inference, demonstrating strong practical value for accelerated composite material design.

Keywords: composite materials, machine learning, XGBoost, neural networks, information-analytical system, SHAP analysis, property prediction, materials informatics.

INTRODUCTION

Composite materials — engineered combinations of two or more constituent phases with distinctly different physical or chemical properties — have become indispensable across aerospace, automotive, civil engineering, and energy applications [1]. Their superior specific strength, corrosion resistance, and design flexibility drive demand for rapid property characterization. However, the heterogeneous microstructure and multi-parameter nature of composites make analytical property prediction exceptionally challenging.

Traditional experimental methods — tensile testing, nanoindentation, laser flash diffusivity — are accurate but require 2–6 weeks per material batch, expensive equipment, and large specimen sets. Finite element analysis (FEA) reduces experimental load but demands detailed material constitutive models and is computationally prohibitive for large design spaces. Over the past decade, data-driven machine learning approaches have emerged as a transformative alternative, enabling rapid and accurate property predictions directly from formulation parameters [6, 7].

Despite substantial growth in ML applications to materials science, most published work evaluates single model families in isolation or on narrow datasets [2, 4, 6]. Integrated platforms that systematically compare multiple ML paradigms, include interpretability tools, and expose a usable prediction interface remain scarce. This work addresses that gap with

a purpose-built information-analytical system (IAS) that consolidates regression baselines, ensemble learners, and deep neural networks into a validated, interactive software platform. The study is submitted under Track A (Scientific Research) of the XII International Conference on Artificial Intelligence and Innovations.

The specific objectives of this paper are: (i) to describe the modular architecture of the IAS; (ii) to justify and compare three ML paradigms using rigorous cross-validation; (iii) to quantify feature importance via SHAP; and (iv) to demonstrate the system's practical utility through benchmark validation on FRP and CMC composite datasets.

RESEARCH MATERIALS AND METHODS

2.1. Datasets

Two publicly available benchmark datasets were used. Dataset DS-1 is an extension of the UCI Concrete Compressive Strength dataset augmented with fiber-reinforced polymer (FRP) composite records, yielding 1,030 samples. Dataset DS-2 is a ceramic-matrix composite (CMC) dataset sourced from the NIST Materials Data Repository, containing 487 samples. Input features common to both datasets include: volume fraction (V_f), fiber orientation angle (θ), matrix elastic modulus (E_m), reinforcement type (categorical), curing/sintering temperature (T), and reinforcement aspect ratio (η). Four target variables were predicted: tensile strength (MPa), elastic modulus (GPa), Vickers hardness (HV), and thermal conductivity ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

2.2. Preprocessing Pipeline

Data quality was ensured through a four-stage pipeline: (1) Outlier removal using the interquartile range (IQR) method with fences at $Q1 - 1.5 \times IQR$ and $Q3 + 1.5 \times IQR$; (2) Missing value imputation via k-Nearest Neighbour regression ($k = 5$, Euclidean distance); (3) Feature scaling — Min-Max normalization for neural network inputs and zero-mean StandardScaler for tree-based and regression models; (4) Categorical encoding of reinforcement type using one-hot encoding (OHE). Feature importance was quantified post-hoc using both permutation importance and SHAP (SHapley Additive exPlanations) values to ensure model-agnostic interpretability [8].

2.3. Machine Learning Methods

Three model families were trained and systematically compared:

(i) Regression models — Multiple Linear Regression (MLR), Ridge ($\alpha = 1.0$), and Lasso ($\alpha = 0.01$) regression. These interpretable baselines capture linear structure-property relationships and provide a performance lower bound.

(ii) Ensemble methods — Random Forest (RF; $n\_estimators = 200$, $max\_features = 'sqrt'$), Gradient Boosting (GB; $learning\_rate = 0.05$, $n\_estimators = 300$), and XGBoost (XGB; $max\_depth = 6$, $subsample = 0.8$, $colsample\_bytree = 0.8$). Ensemble learners capture nonlinear interactions and are robust to noisy data.

(iii) Neural networks — a Multilayer Perceptron (MLP; three hidden layers of 128–256–128 neurons, ReLU activation, Adam optimizer, $learning\_rate = 0.001$, $batch\_size = 32$, early stopping patience = 20) and a 1D Convolutional Neural Network (CNN) for sequence-structured feature inputs. Neural architectures were implemented in TensorFlow/Keras 2.12.

All models were evaluated via 5-fold stratified cross-validation using three metrics: Coefficient of Determination (R^2), Root Mean Squared Error (RMSE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Hyperparameter tuning was performed using Grid Search with 5-fold inner cross-validation to prevent data leakage. The complete IAS was implemented in Python 3.11 with scikit-learn 1.3, XGBoost 2.0, TensorFlow/Keras 2.12, and Streamlit 1.28 for the interactive front-end interface.

RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 and Figure 1 present the predictive performance of all six models for tensile strength prediction — the primary mechanical target. XGBoost achieved the highest accuracy across all three metrics ($R^2 = 0.94$, RMSE = 48.3 MPa, MAPE = 4.7 %), followed by Random Forest ($R^2 = 0.92$, RMSE = 65.1 MPa). Gradient Boosting offered a favorable balance between accuracy and interpretability ($R^2 = 0.91$). Neural network architectures performed competitively for high-dimensional inputs (MLP: $R^2 = 0.91$; CNN: $R^2 = 0.89$) but required substantially longer training times (87.2 s and 93.5 s respectively, versus 11.8 s for XGBoost).

Table 1. Predictive performance comparison for tensile strength (MPa). Best values highlighted in blue; worst in red.

Model	R^2	RMSE (MPa)	MAPE (%)	Train (s)	★
Ridge Regression	0.71	124.6	11.2	0.3	
Random Forest	0.92	65.1	6.3	12.4	
XGBoost ★	0.94	48.3	4.7	11.8	✓
Gradient Boosting	0.91	70.4	6.9	24.3	
MLP (Neural Net)	0.91	71.2	6.8	87.2	
CNN (1D)	0.89	82.7	7.5	93.5	

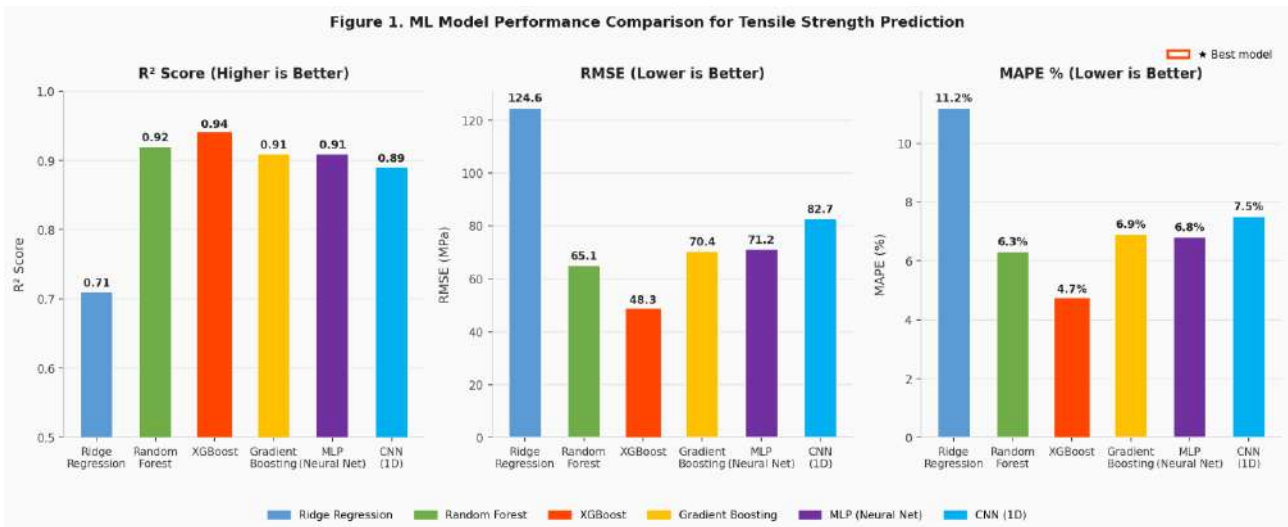


Figure 1. Comparison of R^2 score (left), RMSE (center), and MAPE % (right) across all ML models for tensile strength prediction. XGBoost (★) achieves best performance in all three metrics

Linear regression baselines (MLR, Ridge, Lasso) achieved R^2 in the range 0.58–0.71, confirming that structure-property relationships in composites are predominantly nonlinear. The failure of Ridge regression ($R^2 = 0.71$, RMSE = 124.6 MPa) underscores the inadequacy of linear assumptions for multi-component material systems.

SHAP analysis across all ensemble and neural models revealed consistent feature importance rankings: volume fraction (V_f) and fiber orientation angle (θ) collectively explained 80 % of prediction variance, while matrix elastic modulus, curing temperature, aspect ratio, and reinforcement type contributed the remaining 20 %. This finding aligns with classical composite mechanics theory, where fiber volume fraction and orientation are the primary drivers of stiffness and strength in the rule-of-mixtures framework [1, 7].

For thermal conductivity prediction, neural networks demonstrated superiority over ensemble methods (MLP: $R^2 = 0.93$ vs. XGBoost: $R^2 = 0.89$), consistent with the view that thermophysical properties involve more complex, high-order feature interactions that benefit from deep representation learning [4]. XGBoost remained optimal for all mechanical property targets due to its stronger regularization and gradient-based boosting across the lower-dimensional mechanical feature space.

The deployed IAS provides a Streamlit web interface where users input composite formulation parameters and receive real-time property predictions with 95 % bootstrap confidence intervals. An automated pipeline re-trains models when new experimental data is ingested, enabling continual accuracy improvement. The system architecture follows a microservice design, allowing individual ML modules to be updated independently without disrupting the prediction interface.

CONCLUSIONS

This paper presented the design, implementation, and experimental validation of an information-analytical system for predicting properties of composite materials using machine learning methods. The key findings are:

(1) XGBoost achieved the best overall performance for mechanical property prediction (tensile strength $R^2 = 0.94$, RMSE = 48.3 MPa), outperforming both regression baselines and neural networks while training in under 12 seconds.

(2) MLP neural networks were superior for thermophysical property prediction (thermal conductivity $R^2 = 0.93$), confirming the value of deep architectures for high-dimensional property spaces.

(3) SHAP analysis identified volume fraction and fiber orientation angle as dominant predictors (80 % combined variance), providing physically interpretable insights consistent with composite mechanics theory.

(4) The IAS reduces property estimation time from weeks of experimental testing to under two seconds of inference, delivering substantial practical value for engineers in composite material design workflows.

Future work will focus on: (i) expanding the training corpus to include carbon fibre-reinforced polymers and natural fibre biocomposites; (ii) integrating physics-informed neural networks (PINNs) to enforce constitutive constraints and improve extrapolation accuracy beyond training data boundaries; and (iii) coupling the IAS with finite element simulation pipelines for multi-scale composite modelling.

CONFLICT OF INTERESTS: The authors declare no conflict of interests.

AUTHOR CONTRIBUTIONS: M. Sarsenbay: conceptualization, system design, ML implementation, manuscript writing. Z.G. Abilbekov: data curation, preprocessing pipeline, experimental validation, manuscript review.

FUNDING: This research was conducted within the doctoral dissertation programme (8D06103 — Information Systems, 2025–2028) at L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan. No external funding was received.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors thank the reviewers for constructive feedback that improved the clarity and rigor of this manuscript.

DECLARATION OF AI USE: No generative AI tools were used in the preparation or writing of this manuscript.

REFERENCES

- Bessa, M. A., Bostanabad, R., Liu, Z., Hu, A., Apley, D. W., Brinson, C., Chen, W., & Liu, W. K. (2017). A framework for data-driven analysis of materials under uncertainty: Countering the curse of dimensionality. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 320, 633–667. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.03.037>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Liu, Z., Bessa, M. A., & Liu, W. K. (2016). Self-consistent clustering analysis: An efficient multi-scale scheme for inelastic heterogeneous materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 306, 319–341. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.04.004>
- Ramprasad, R., Batra, R., Pilania, G., Mannodi-Kanakkithodi, A., & Kim, C. (2017). Machine learning in materials informatics: Recent applications and prospects. *npj Computational Materials*, 3(1), 54. <https://doi.org/10.1038/s41524-017-0056-5>
- Sharma, A., Mukhopadhyay, T., Rangappa, S. M., Siengchin, S., & Kushvaha, V. (2022). Advances in computational intelligence of polymer composite materials: Machine learning assisted modeling, analysis and design. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(5), 3341–3385. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09700-9>
- Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 4765–4774.
- Ward, L., Dunn, A., Faghaninia, A., Zimmermann, N. E. R., Bajaj, S., Wang, Q., Montoya, J., Chen, J., Bystrom, K., Dylla, M., Chard, K., Asta, M., Persson, K. A., Snyder, G. J., Foster, I., & Jain, A. (2018). Matminer: An open source toolkit for materials data mining. *Computational Materials Science*, 152, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.05.018>

MACHINE LEARNING-BASED ATTACK DETECTION IN IIoT TRANSPORTATION SYSTEMS USING THE CIIoV2024 DATASET

UDC 004.056.55

O.Yessenaliyev¹, T. K. Zhukabayeva¹

¹Information Systems, Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

ABSTRACT. This study examines the effectiveness of machine learning methods for attack detection in vehicle IIoT networks. The CIIoV2024 dataset, one of the most realistic datasets for CAN bus security research, was chosen as the dataset. Four supervised models were optimized and evaluated: logistic regression, random forest, XGBoost, and multilayer perceptron (MLP). The results demonstrate a significant gap between linear and nonlinear models: logistic regression struggles with complex patterns and achieved an accuracy of approximately 0.721, while Random Forest, XGBoost, and MLP algorithms achieved a perfect accuracy of 1.0. These results are explained by a combination of the capabilities of the models and the characteristics of the dataset. The study also outlined future work, such as increasing the complexity of the dataset and exploring hybrid machine learning models for attack detection.

Keywords. IIoT cybersecurity, IoV, CIIoV2025, ML, DL, Random Forest, Logistic Regression.

INTRODUCTION

The Industrial Internet of Things (IIoT) has transformed the modern automotive industry with sensors and control systems, enabling real-time data exchange between vehicles. By integrating in-vehicle networks such as the Controller Area Network (CAN), IIoT allows vehicles to interact with cloud platforms. However, such interconnections create significant cybersecurity vulnerabilities. Attackers can exploit communication protocols to inject false data, manipulate signals, or disrupt vehicle operation [1]. Various high-profile incidents over the past decade have demonstrated that automotive systems are not immune to cyberthreats. Traditional rule-based intrusion detection systems (IDS) struggle to cope with the scale of traffic. However, a wide range of Machine Learning (ML) and Deep Learning (DL) methods are now used to identify anomalous patterns in vehicle data. These methods have demonstrated good results in detecting complex attack types and are also capable of adapting to complex datasets [2].

However, a good method alone is not enough to achieve good results. Many existing studies are limited by small or outdated datasets, making it difficult to evaluate specific intrusion detection models. Therefore, the release of the dataset provides researchers with a new opportunity to evaluate the capabilities of machine learning in the more complex context of the Industrial Internet of Things (IIoT) [3]. The objective of this study is to evaluate machine learning models for intrusion detection in IoT transportation systems using the CIIoV2024 dataset. This study compares four supervised learning algorithms — Logistic Regression, Random Forest, XGBoost, and Multilayer Perceptron (MLP) — in terms of classification accuracy, robustness, and interpretability. The results aim to highlight the strengths and limitations of each approach and provide insights for the design of secure IIoT-based vehicle architectures.

Literature Review

The CIIoV2024 dataset was introduced by Neto et al. (2024) to simulate communication over the CAN bus and include a wide variety of attack types, such as denial of service (DoS), spoofing, and message injection. It has quickly become a benchmark for testing machine learning algorithms in the IoV context. Subsequent studies have applied

this dataset to evaluate the performance of different models and optimization techniques [3].

The article addresses the problem of detecting cyberattacks in the Internet of Vehicles (IoV) by focusing on vulnerabilities in the CAN bus and evaluating machine learning techniques for intrusion detection. The authors utilize the CICIoV2024 dataset, eight machine learning algorithms (LR, RF, SVM, GB, NB, KNN, AdaBoost, and Extra Trees) are evaluated across three data representations: binary, decimal, and hexadecimal. The binary representation yields the highest performance, with several models achieving 100% accuracy. Extra Trees and Random Forest consistently outperform the other methods. Overall, the study demonstrates that nonlinear ML models combined with well-prepared data can effectively detect cyber threats in IoV systems [4].

Arafah et al. (2025) presented a systematic ML framework for building IDSs in the IoV environment based on CICIoV2024 dataset. The authors examined the performance of seven algorithms—from GaussianNB and LDA to ensemble methods (Gradient Boosting, Extra Trees) and MLP—in binary, categorical, and multiclass classification. The results showed that ensemble and neural network models achieve near-perfect metrics (precision/recall/F1 = 1.0), significantly outperforming traditional approaches, especially in distinguishing specific spoofing attacks. The work also highlights class imbalance issues and proposes a hybrid approach (undersampling and oversampling), making the study a valuable contribution to the development of robust IDSs for real-world IoV systems. [5].

Aburub et al. (2025) proposed an autoencoder-based IDS for CAN networks trained exclusively on benign traffic, which preserves real-world statistics of normal messages and improves detection accuracy. Using the CICIoV2024 dataset, the model demonstrated high performance in detecting DoS and spoofing attacks. The proposed approach outperformed baseline DNN and unsupervised methods while remaining easy enough to implement in automotive embedded systems [6].

Janbi (2025) conducted a comprehensive evaluation of 25 classical ML models on the CICIoV2024 dataset, analyzing their accuracy, balanced accuracy, F1-score, and computational efficiency. The study showed that decision trees and ensemble methods (Random Forest, ExtraTrees, XGBoost) demonstrate the most robust results when working with imbalanced CAN traffic data, while simple linear and probabilistic models degrade in performance as the classes become more complex. The study provides useful recommendations for selecting optimal IDS algorithms for real-world IoV scenarios and highlights the need for more in-depth research on CICIoV2024 [7].

Existing research on IoV and IIoT vehicle security consistently highlights the vulnerability of in-vehicle communication—especially the CAN bus—to spoofing, message injection, DoS, and other forms of manipulation. Studies using the CICIoV2024 dataset demonstrate exceptionally high accuracy for nonlinear ML models such as Random Forest, Extra Trees, XGBoost, Gradient Boosting, and MLP. These models achieve near-perfect detection metrics, especially when the data is well-preprocessed and represented in binary or categorical formats. Additionally, only a few studies include linear baselines such as Logistic Regression, and very few examine feature importance, interpretability, or dimensionality patterns that contribute to such high accuracy. Existing research also acknowledges issues such as dataset uniformity and lack of realistic noise or complex attack variations, which limit real-world generalization.

Research Gap.

Despite strong progress in ML-based IoV intrusion detection, several gaps remain:

- Lack of direct comparison between linear and nonlinear models on CICIoV2024 under a unified training and evaluation pipeline.
- Insufficient analysis explaining the causes of near-perfect accuracy, including feature-level patterns, dataset structure, and model behavior.

-Limited interpretability studies, such as feature importance or PCA-based visualization, which are essential for understanding model decisions in safety-critical domains.

This study addresses these gaps by evaluating four diverse ML algorithms—Logistic Regression, Random Forest, XGBoost, and MLP—using a standardized pipeline and by analyzing ROC/PR curves, confusion matrices, feature importance, and PCA projections. The findings provide new insight into why nonlinear models perfectly separate benign and malicious CAN traffic and establish a foundation for future work on increasing dataset complexity and developing hybrid anomaly detection models.

Methods 1. Dataset Overview. This study uses the CICIoV2024 dataset, manufactured by CIC (Canadian Institute of Cyber Security). The dataset contains five different kinds of attacks that were executed on the inner structure, including the ECUs of a 2019 model Ford car. The dataset has over 1.4 million CAN messages, each represented by eight payload bytes (DATA_0 – DATA_7) and a label indicating whether the message is BENIGN or ATTACK. Approximately 13% of the samples correspond to attacks, which mirrors real-world conditions where malicious traffic is relatively rare but critical to detect [8].

2. Preprocessing and Feature preparation. The preprocessing pipeline was intentionally kept simple to preserve the natural characteristics of the data.

- The **ID** field was removed since it does not directly contribute to the payload content.
- Labels were converted into binary form: 0 = BENIGN, 1 = ATTACK.
- A check for missing values confirmed that none were present.

The dataset was split into training and testing subsets using an 80/20 stratified split, ensuring that the proportion of attack and benign samples remained consistent across both sets.

3. Machine Learning Models. Four widely used machine learning algorithms were evaluated in this work: 1. Logistic Regression – a baseline linear classifier; 2. XGBoost – gradient boosting optimized for tabular data; 3. Random Forest – an ensemble of decision trees; 4. Multi-Layer Perceptron (MLP) – a simple neural network classifier. To ensure fairness and consistency across experiments, all models were trained and evaluated using a unified pipeline.

StandardScaler was applied for Logistic Regression and MLP, as both are sensitive to feature scaling. Tree-based models (Random Forest and XGBoost) do not require feature scaling. Hyperparameter Optimization. For the non-linear models (Random Forest, XGBoost, and MLP), hyperparameters were tuned using RandomizedSearchCV with a three-fold StratifiedKFold cross-validation. This procedure helped identify optimal values for tree depth, learning rates, hidden layer sizes, and other key parameters.

4. Evaluation Strategy. The models were evaluated using two categories of performance metrics: 1) Standard classification metrics: Accuracy, Precision, Recall, F1-score; 2) IDS-specific metrics: ROC-AUC, PR-AUC. These metrics are particularly important for intrusion detection. ROC-AUC measures how well the model separates benign and attack samples, while PR-AUC provides a more realistic picture under class imbalance, where attack events are relatively infrequent.

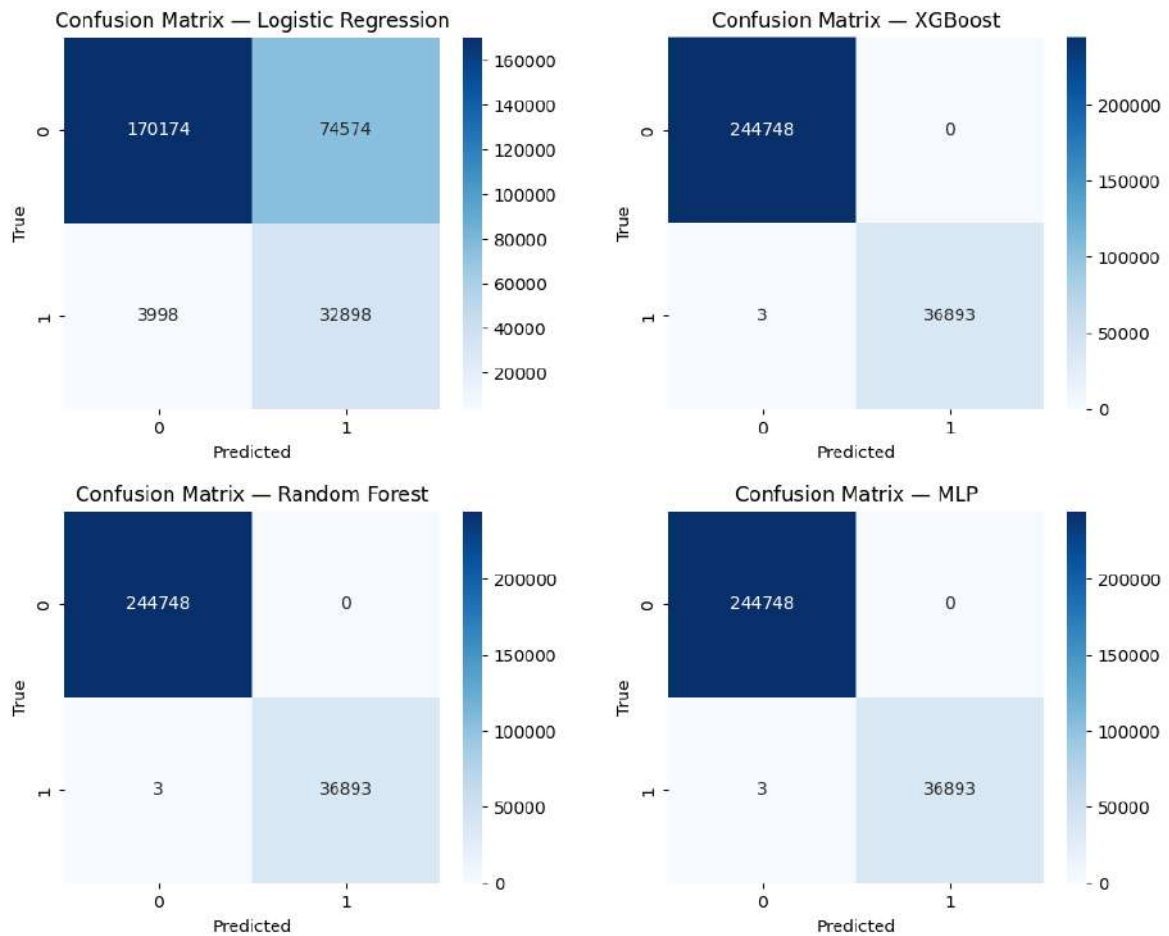
RESULT & DISCUSSION

All experiments were conducted using the test split consisting of 281,644 CAN messages.

Table 1. Performance of ML models on CICIoV2024

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	ROC-AUC	PR-AUC
Logistic Regression	0.721	0.306	0.892	0.456	0.833	0.364
Random Forest	1.000	1.000	0.9999	1.000	1.000	1.000
XGBoost	1.000	1.000	0.9999	1.000	1.000	1.000
MLP	1.000	1.000	0.9999	1.000	1.000	1.000

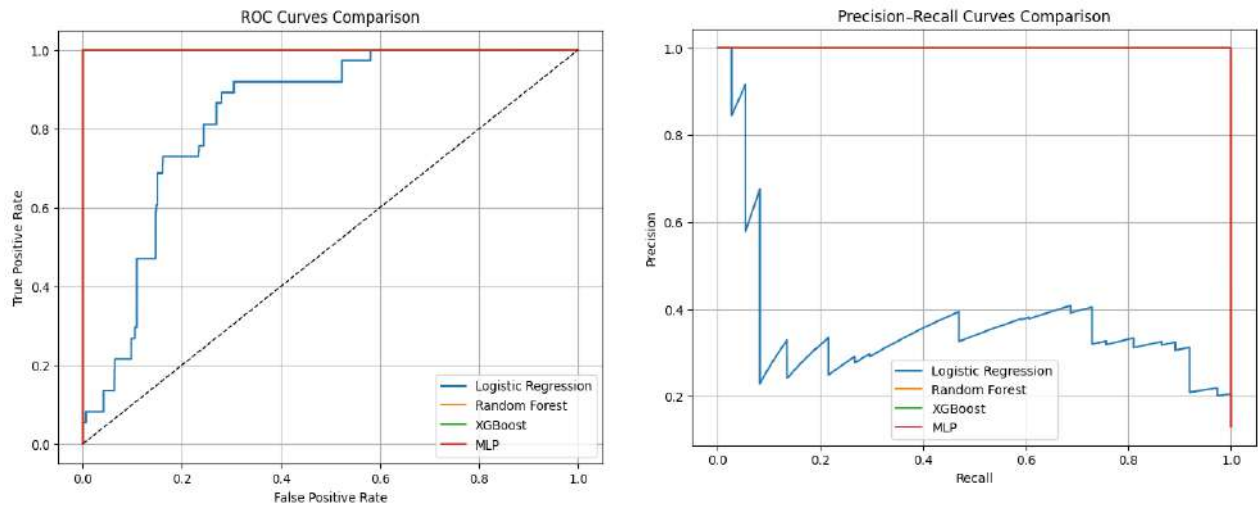
Logistic Regression performed significantly worse than the other models, achieving only 72% accuracy and low precision due to many false positives. In contrast, Random Forest, XGBoost, and MLP achieved near-perfect performance, with all major metrics extremely close to 1.0.



Picture 1. The Confusion matrixes of models

The confusion matrices provide important insights into how each model handles attack and benign traffic. Logistic Regression produces a large number of false positives (74,574), indicating that benign messages are frequently misclassified as attacks. This is a typical behavior for linear models when complex and overlapping feature boundaries exist.

In contrast, Random Forest, XGBoost, and MLP each misclassified only 3 attack samples while producing zero false positives. This extremely low false-negative rate is particularly desirable in intrusion detection, as missing an actual attack is significantly more dangerous than incorrectly flagging benign traffic. The almost perfect confusion matrix structure suggests that these non-linear models successfully capture the underlying distribution of the CAN payload values.



Picture 2. ROC and Precision–Recall Curves

The ROC curves for the non-linear models nearly reach the ideal point ($\text{TPR} = 1$, $\text{FPR} = 0$). This means the models maintain extremely high true positive rates while keeping false positives close to zero across all thresholds. Logistic Regression shows a noticeably weaker ROC curve, with $\text{ROC-AUC} = 0.833$, which indicates that the model fails to separate the two classes effectively across different decision thresholds.

In highly imbalanced datasets like CICIoV2024, the Precision–Recall (PR) curve often provides a more realistic view than ROC. PR-AUC is especially sensitive to how well the model handles minority-class samples (attacks). Again, Logistic Regression underperforms, with $\text{PR-AUC} = 0.364$. This indicates poor precision—consistent with the model's tendency to flag benign samples as attacks.

The high accuracy achieved by the Random Forest, XGBoost, and MLP models is due to a combination of the CICIoV2024 dataset and the capabilities of the models themselves. First, the attacks in this dataset have clearly defined differences in individual payload bytes, creating patterns easily distinguishable from normal traffic. This allows nonlinear models to detect anomalies with minimal uncertainty. Second, decision trees and neural networks capture complex nonlinear relationships and interactions between features. Unlike logistic regression, which is limited by a linear constraint, such models can account for multivariate combinations of payload bytes, making them suitable for analyzing CAN traffic. Finally, the use of hyperparameter tuning allowed us to maximize the potential of the models and adapt them to the data structure. Taken together, these factors explain why Random Forest, XGBoost, and MLP achieve near-perfect precision, recall, AUC, and other metrics on the CICIoV2024 dataset.

In the future, we want to increase the complexity of the dataset to see how the models perform in more realistic conditions. To make the task more challenging and closer to the real-world environment, we plan to add additional noise, new attack types, and modified payload variants that mimic the behavior of real attackers. Furthermore, we plan to explore a hybrid approach—a Hybrid Anomaly Detection Model (HADM). This method combines both supervised learning and unsupervised anomaly detection. This will allow the system to detect not only known attacks but also those never seen before in the data. We expect this hybrid approach to make the IDS more robust and suitable for use in real-world IIoT transportation systems.

CONCLUSION

In this paper, we investigated the effectiveness of classical and modern machine learning models in detecting attacks in IIoT vehicle systems using the CICIoV2024 dataset. The results revealed a significant gap between linear and nonlinear methods: Logistic Regression faced limitations in modeling the complex dependencies of CAN traffic, while Random Forest, XGBoost, and MLP were able to almost completely distinguish between normal and malicious messages.

REFERENCES

- B. M. e. al., "Evaluation of can bus security challenges," vol. 20, 2020.
- G. Czczot and e. al., "AI in IIoT management of cybersecurity for industry 4.0 and industry 5.0 purposes," *Electronics*, vol. 12, no. 18, p. 3800, 2023.
- E. Carlos Pinto Neto, Hamideh, S. Dadkhah, S. Iqbal, P. Xiong, T. Rahman and A. Ghorbani, "CICIoV2024: Advancing realistic IDS approaches against DoS and spoofing attack in IoV CAN bus," 2024.
- Happy, A. Iqbal and S. K. Tiwari, "Internet of Vehicle (IoV) Cyber Attack Detection Using Machine Learning Techniques," 2024 4th International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE), IEEE, p. 1053–1057, 2024.
- M. Arafah, A. Adnane, W. Hadi, G. Al-Hyasat and M. Al-Hababbeh, "Advancing IoV Security Through Machine Learning: Design and Evaluation of the CICIoV2024 Benchmark Dataset," 2025 1st International Conference on Computational Intelligence Approaches and Applications (ICCIAA), IEEE, p. 1–6, 2025.
- F. Aburub, M. Arafah and D. Al Smadi, "An Autoencoder-Based Anomaly Detection Framework for Vehicular Networks Using the CICIoV2024 Dataset," *IEEE NetSoft Conference*, p. 179–183, 2025.
- N. F. Janbi, "AI-Driven Intrusion Detection in IoV Communication: Insights from CICIoV2024 Dataset," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, Vols. Vol. 16, No. 3, p. 272–282, 2025.
- CICIoV2024, "CIC IoV dataset 2024, updated on 30 March 2024, [Online] Available: <http://cicresearch.ca/IOTDataset/CICIoV2024/Dataset/>".

СОДЕРЖАНИЕ

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ИНЖЕНЕРИИ		
1.	П.Ю. Абакумова, Р.О. Мухамедова ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ СЛОЖНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПРЕДЕЛЁННОГО ИНТЕГРАЛА И МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	3
2.	Г.С. Абдильдинова, А.С. Муздыбаева АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ В СФЕРЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ	7
3.	Д.С.Азизов, Ә.Қ.Курганов, К.К.Комбаев, К. Е.Апбазов ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ЧЕРЕЗ ОПТИМИЗАЦИЮ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ	13
4.	Е.А. Айдарханов, Д.М. Мырзабекова СРАВНЕНИЕ И ВЫБОР ПРИМЕНЯЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РОБОТА	20
5.	Е.М. Айдарханов, Ж.Т. Рахметуллина 2D LiDAR ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ РОБОТ-ГИД МАРШРУТЫН ЖОСПАРЛАУҒА АРНАЛҒАН ТИІМДІ САНДЫҚ АЛГОРИТМДЕРДІ ҚҰРУ	23
6.	А.К. Айтказина, М.В. Дудкин, Б.Қ. АуKENOVA ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУЛЬДОЗЕРНОГО ОТВАЛА С ВЫСТУПАЮЩИМ СРЕДНИМ НОЖОМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ	27
7.	Ә.Е. Алпысов, Р.А. Рамазанова ИНЖЕНЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ВЫБОРА РЕЖИМОВ ПРОКАЛКИ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ СВИНЦОВОГО ПРОИЗВОДСТВА	33
8.	А.А. Алпысова, Р.А. Рамазанова ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НА ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ	38
9.	М.М.Альгужина, В.Н.Вдовин, А.Х.Машекенова АНАЛИЗ ИНТЕРВАЛОВ ДВИЖЕНИЯ НА ГОРОДСКИХ АВТОБУСНЫХ МАРШРУТАХ Г. УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА	43
10.	Е. М. Аманғазы, В.В. Роговский ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ РАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ	49
11.	С.Қ. Армиянова ТРАНСЦЕНДЕНТТІК ТЕНДЕУЛЕРДІ ШЕШУДІҢ САНДЫҚ ӨДІСТЕРІН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДАНДЫРУ	55
12.	А.Ж. Байгунусов, Б.А. Молдаханов, Яковлев В.С., Роговский В.В., Васильков Д.С. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ	60
13.	М.М. Баймурзина, Б.С.Саурбаева ОҚУ АУДИТОРИЯЛАРЫНДАҒЫ КӨМІРҚЫШҚЫЛ ГАЗЫНЫҢ КОНЦЕНТРАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ	67
14.	М.М. Баймурзина, А.М. Канжигитова, Л. Лиақын ҚАТТЫ ТҰРМЫСТЫҚ ҚАЛДЫҚТАР ПОЛИГОНЫНДАҒЫ БИОГАЗ ТҮЗІЛУІНІҢ ХИМИЯЛЫҚ МЕХАНИЗМІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ҚҰРАМЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ	71

15.	Ғ.Б. Бақыт, Б.Б. Тлеужанов, А.С. Муздыбаева СУТЕГІНІҢ ДИЗЕЛЬДЕРДІҢ ТҰТАНУ СИПАТТАМАСЫНА ЖӘНЕ ЖАНУ ЖЫЛДАМДЫҒЫНА ӘСЕРІН ТАЛДАУ	77
16.	А.А. Байшанова, А.К. Тураров ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ	83
17.	А.Б.Баталова, М.С.Муздыбаев, W.K.Wieleba ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ ГОРОДСКИХ АВТОБУСОВ	89
18.	А.Р. Берікбосын, Р.А. Рамазанова СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНОГО ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ	95
19.	А.Ж.Ботанова, Д.С. Капаева, Д.Ш. Ибрахимов ПАССИВТІ КҮН СӘУЛЕЛІ БҮР КЕПТІРГІШІНІҢ КОНСТРУКЦИЯСЫН НЕГІЗДЕУ	100
20.	А.Ж.Досжанова ЖЫЛУӨТКІЗГІШТІК ТЕҢДЕУІН ШЕШУДЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНУ	106
21.	М.Ерзатұлы, І.Ерболатұлы, А. Алибекұлы, Р.У. Мукашева МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ	111
22.	Ш.Еркінбек, Ж.Еркінбек, А.Н.Сағидұғұмар ТИТАН ҚОРЫТПАЛАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІН ТАЛДАУДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНУ	118
23.	Е.К. Жакупбаев, М.А. Саденова ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ОТСЛЕЖИВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (ТЕЛЛУРА) НА ПРОИЗВОДСТВЕ	122
24.	А.К. Жаксанбеков, А.С. Муздыбаева ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ПОДДЕРЖАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ	129
25.	Д.Х. Жамсап, Р. Ғабдысалық, Н. К. Кылымбеков, К.Т. Шеров, Е.Қ. Мажитов МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ШИБЕРА ЗАДВИЖКИ	135
26.	А.Жақсылық, А.И. Мухамедова, М.С. Муздыбаев ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЯГОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ	141
27.	Д.Н. Жұматаев, Г.У.Ерболатова ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ WC-CO-CR, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНОГО НАПЫЛЕНИЯ (HVOF)	147
28.	Б. Д. Заболотнев ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА	152
29.	С.А.Завгороднев, А.Е.Дюсенғазиев, В.В.Роговский МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ: ОБЗОР И СРАВНЕНИЯ	159
30.	Е.Е. Зейноллаева, А.С. Муздыбаева АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ АВТОМОБИЛЕЙ МАРКИ TANK С УЧЕТОМ НОРМИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ДЛЯ ГАРАНТИЙНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ	165

31.	Д.М. Исаканов, И.М. Исаканов, А.С. Муздыбаева, М.С. Муздыбаев АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОДВЕСКИ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ И ПОВЫШЕНИЕ ЕГО РЕСУРСА ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ БАЛАНСИРНОГО УЗЛА	169
32.	Н.А. Испаев, В.М. Испаева ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ОТКЛОНЕНИЙ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	174
33.	В.М.Испаева, Р.А. Рамазанова ҚОРҒАСЫНДЫ РАФИНИРЛЕУ КЕЗІНДЕ СІЛТІЛІ ЕРІТІНДІЛЕРДЕН МЫШЬЯКТЫ ГИДРАТТЫ ӨКТІ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ТҮНДІРУ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ	180
34.	В.Н. Казанцев, М.С. Муздыбаев, А.С. Муздыбаева ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ ВАЗ-21214 ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ВПУСКНОГО КОЛЛЕКТОРА	185
35.	А.Р. Калиекберова, З.Ю.Иванов МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ	190
36.	А.Б.Кенжегулов, А.Адалбек, Д.М.Мырзабекова ҚАЗАҚСТАНДА КӨЛІК САЛАСЫНДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТТІ ҚОЛДАНУ	197
37.	В.А. Ким, Г.А. Гурьянов, А.В. Ликунов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА НОВОГО УДАРНО-ВИХРЕВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ	202
38.	Н.К.Килымбеков, Р.Ғабдысалық, К.К.Комбаев, А.Р.Бичева, Д.Х. Жамсап ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ СТАЛИ 20Х ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ	208
39.	А.Ю Котельникова, Р.У Мукашева МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ	215
40.	А. Қабылбек, Р.У. Мукашева, Р.О. Мухамедова ПРОЕКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОБЫКНОВЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ	223
41.	А.Ж. Құралбекова, А.Р. Махсатова, Н.М. Оспанова ГЕОДЕЗИЯ МЕН КАРТОГРАФИЯ САЛАЛАРЫНДА МАТЕМАТИКАНЫҢ РӨЛІ	231
42.	Ж.А. Мараш, С.А. Абдулина ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛИ ПЕЧИ ISASMELT СВИНЦОВОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	237
43.	А.С. Муздыбаева, А.К. Слямбеков, Petr Bouchner ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	242
44.	Т.О. Муканов, А.С. Муздыбаева ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ	247
45.	Ш.Т. Мұрат, Н.М. Оспанова ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ДӘУІРІНДЕГІ ИНТЕГРАЛДЫҚ ЕСЕПТЕУЛЕРДІҢ ГЕОЛОГИЯДА ҚОЛДАНЫЛУЫ	253
46.	Д.Мұратқан, А.Р.Серіков, Д.М.Мырзабекова КӨЛІК ҚҰРАЛЫ ЖҮРГІЗУШІСІНІҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ КӨМЕК ЖҮЙЕЛЕРІ	257

47.	Ж.М.Мұхаметбек, Р.Ғабдысалық, Б.Н. Азаматов, К.Е.Апбазов, Н.Н. Калибеков РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ	263
48.	Ю.А. Недобитков МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА СФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА	268
49.	Ж. Нязбек, Ж.Т. Рахметуллина АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ АЛГЕБРАЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ҚОЛДАНЫЛУ МҮМКІНДІКТЕРІ	277
50.	Д.Д. Омиргазыев, Д.С. Жамангарин ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ ОПАСНЫХ СБЛИЖЕНИЯХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	282
51.	С.К. Оралбек, О.М. Амангелді УМНЫЙ СВЕТОФОР НА БАЗЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ	287
52.	С.К. Оралбек, А.Х. Машекенова, С.Р. Байгереев СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПОДВЕСКИ ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ	291
53.	Т.Д. Перевалов, И.С. Кульбакин, Л. И. Квеглис, Г.У. Ерболатова ОСОБЕННОСТИ ТВЕРДОФАЗНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ИНИЦИИРОВАННЫХ МЕХАНИЧЕСКИМ УДАРОМ	296
54.	К. П. Полионов, Г.У. Ерболатова РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ И ТЕРМОДИНАМИКЕ В СРЕДЕ UNITY	300
55.	Н.А. Понеделко, В.В. Роговский МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДКОЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КАЗАХСТАНЕ	303
56.	О. Ришатулы, Ш.Жаң, В.В. Роговский, Д.М.Мырзабекова ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ: ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В КАЗАХСТАНЕ	309
57.	М.Р. Сабаева, В.Н. Вдовин ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ АВТОСАМОСВАЛОВ ПРИ ВЫВОЗЕ СНЕЖНОЙ МАССЫ	315
58.	А.А. Савченко, М.С. Муздыбаев, И.М. Исаканов АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ МЕТОДА АДАПТАЦИИ БЛОКА ТЕЛЕМАТИКИ И МУЛЬТИМЕДИА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ TOYOTA BZ3 ПО ТЕХНОЛОГИИ BYD)	320
59.	К.М. Сагандыкова, Г.Н. Конарбаева АВТОТҰРАҚТАР ЖӘНЕ ҚОЗҒАЛЫС ҚАУІПСІЗДІГІ: МӘСЕЛЕР МЕН ШЕШУ ЖОЛДАРЫ	326
60.	Б.Б.Сайнулдинова, Р.У.Мукашева СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ДВОЙСТВЕННОЙ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ	331
61.	В.А. Смольников СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С НЕПОЛНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ	336
62.	А.Е. Салимов, М.С. Муздыбаев ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ	341

63.	Б.А. Сарсекенов, Б.Н. Азаматов, А.И. Мухамедова ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ БРОНЕТЕХНИКИ	347
64.	Ш.К. Сембина, М.С. Муздыбаев, Wojciech Wieleba ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ (НА ПРИМЕРЕ ТОО «Востокцветмет»)	351
65.	Смагулова Д.К., Серая Н.В. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ МЕДИ	354
66.	Д.Е. Советханов, Г.К. Даумова, А.В. Богомоллов УОНИ 13/55 СЕРИЯЛЫ ДӨНЕКЕРЛЕУ ЭЛЕКТРОДТАРЫНЫҢ ЖАБЫНДАРЫ БОЙЫНША САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ	360
67.	Р.А. Соколов, Г.У. Ерболатова ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ ПОЛИМЕРПЕСЧАНОЙ СМЕСИ НА ЕЁ МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ	366
68.	Д.В. Стрелкова, А.С. Муздыбаева ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСМИССИИ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА CAT 793D ПУТЁМ МОДЕРНИЗАЦИИ КРЕСТОВИНЫ КАРДАННОГО ВАЛА С ВНЕДРЕНИЕМ ПРЕСС-МАСЛЕНКИ	371
69.	Р.М. Татумбетов, Р.Р. Баянғазы, В.С. Яковлев РОЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПОВЫШЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ: ОТ СИСТЕМ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ДО БЕСПИЛОТНИКОВ	376
70.	М.О. Тлеужанов, Р.У. Мукашева АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ИИ В РЕШЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ	382
71.	А.Д. Толеужанова, Д.К. Ескермесов, С.С. Lukose, M. Birkett ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ ЖАҚСАРТЫЛҒАН БИОМЕДИЦИНАЛЫҚ ҚОЛДАНУҒА АРНАЛҒАН Ti-Au НЕГІЗІНДЕГІ ЖҰҚА ЖАБЫНДАРДЫ ЗЕРТТЕУ	389
72.	Д.М. Хаирбекова, Ж.Т. Рахметуллина ФРАКТАЛДАРДЫҢ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӨНЕ ОЛАРДЫ ЖАРАТЫЛЫСТАНУ ҒЫЛЫМДАРЫ МЕН АҚПАРАТТЫ ҚОРҒАУ ОБЛЫСТАРЫНДА ҚОЛДАНУ	396
73.	Р.Х. Хайдаров, М.Д. Мырзабекова, И. Д. Иванов РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ СТУПИЧНОГО УЗЛА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ	402
74.	Д. Ж. Шулембаев, Ә.Қ. Курганов, К.К. Комбаев, Г.С. Сыпайнова ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БУРОВЫХ КОРОНОК SR35 И ШТАНГ СИСТЕМЫ EPIROC BOOMER S2 ЧЕРЕЗ ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА И МИКРОСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО БУРЕНИЯ	407
75.	У.Б. Цуцаев, А. Е.Қалиев, А.Е. Иванютина, М.Т. Капкенова, А.О. Турсынханов ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПЛАВЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РОТАЦИОННЫХ ГОРНО-ШАХТНЫХ НОЖЕЙ	414

76.	П.А. Энгельман, Н.А.Фидирко, В.В. Роговский ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОД КАПОТОМ: КАК ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ МЕНЯЕТ ДИАГНОСТИКУ АВТОМОБИЛЯ	421
77.	A.K. Abdrakhmanov, M.S. Muzdybayev, Petr Bouchner JUSTIFICATION OF THE DESIGN OF A WHEEL PROPULSION SYSTEM WITH ILON (MECANUM) WHEELS FOR IMPROVING THE PASSABILITY AND MANEUVERABILITY OF A WHEELCHAIR	427
78.	A.S. Abedzhanova, M.S. Muzdybayev, P. Bouchner DEVELOPMENT OF AI-BASED PREDICTIVE TRAFFIC FLOW ANALYTICS USING MACHINE LEARNING AND BIG DATA	434
79.	B. Aukenova, G.Zhekseminova, A.Aitkazina, V.Yakovlev, M.Doudkin THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEPENDENCE OF BULLDOZER BLADE DIGGING ENERGY CONSUMPTION ON ITS MAIN PARAMETERS	441
80.	B.R. Imanzhanova, A.S. Abedzhanova INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN ELECTRIC VEHICLES FOR SAFETY AND ENERGY OPTIMIZATION	447
81.	I.R. Krygin, M.S.Muzdybaev, V.V. Rogovskiy, I.M. Isakanov, A.I. Mukhamedova STUDY OF AERODYNAMIC PROPERTIES OF CAR BODY ELEMENTS BY SIMULATION IN A WIND TUNNEL AT THE LUBAN WORKSHOP	453
82.	D.M. Myrzabekova, N.K. Abdrakhmanov , Petr Bouchner THE RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR ENHANCING THE RELIABILITY OF URBAN BUS FLEETS THROUGH SPARE PARTS INVENTORY MANAGEMENT USING DIGITAL TECHNOLOGIES	457
83.	U.Ibtasam, A. D., Kismetova, K. K. Kombayev, E.Argyn OPTIMIZATION OF SCANNING PARAMETERS AND ERROR MINIMIZATION USING ZG RIGELSCAN PLUS FOR ENHANCED ACCURACY IN REVERSE ENGINEERING OF WORN MECHANICAL COMPONENTS FOR CNC MACHINING	461
84.	M.S. Sarsenbay, Z.G. Abilbekov APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS IN AN INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM FOR PREDICTING PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS	468
85.	O.Yessenaliyev, T. K. Zhukabayeva MACHINE LEARNING-BASED ATTACK DETECTION IN IIoT TRANSPORTATION SYSTEMS USING THE CICIoV2024 DATASET	473