

8(149)

Владимир Михайлович Чаплин (28 июля (9 августа) 1861 — 10 ноября 1931) — русский и советский учёный, специалист в области отопительно-вентиляционной техники.

Дед писательницы Веры Чаплиной[2].

Потомственный дворянин из рода Чаплиных, восходящего[3] ко Льву Чаплину (середина XV века)[4].

В 1883 году окончил Императорское Московское техническое училище (ИМТУ), а в 1898 году получил в училище должность профессора. В 1898—1909 гг. также преподавал в Московском Училище живописи, ваяния и зодчества.

В 1895 году вместе с коллегой по ИМТУ архитектором В. Г. Залесским Чаплин организовал торговый дом «В. Залесский и В. Чаплин». В 1902 году Залесский и Чаплин построили собственный дом на Большой Дмитровке, 16, в котором их семьи имели по отдельному этажу и где располагались помещения их технической конторы[5]. Среди реализованных проектов торгового дома «В. Залесский и В. Чаплин» — системы отопления и вентиляции почти 1500 зданий[6] в десятках городах Российской Империи: Музей изящных искусств имени императора Александра III, Румянцевский музей, Политехнический музей, Аудиторный корпус Московского университета, Императорское Московское техническое училище, Московское училище живописи, ваяния и зодчества, Александровское военное училище, Брестский (Белорусский) вокзал, автозавод А. М. О., Сандуновские бани, гостиница Метрополь, ресторан Эрмитаж, здание страхового общества «Россия», Алексеевская глазная больница, странноприимный дом Шереметева, храм Василия Блаженного, склеп великого князя Сергея Александровича в Чудовом монастыре, Перервинский монастырь, Заиконоспасский монастырь, храм Марфо-Мариинской обители — все в Москве; храм-усыпальница Юсуповых в Архангельском, Петербургская городская детская больница, Путиловский завод, Архангельские городские ряды, Нижегородский городской театр, Киевский коммерческий институт, царский дворец в Ливадии, Иркутский завод «Треугольник», детская больница в Баку, фабрика Столыпина в Пензе, храм Казанской Божией матери в Риге, электрическая станция в Рязани, Тамбовский пороховой завод, Волжский Канальный банк в Самаре, Калужское Епархиальное училище, Императорский Харьковский университет и многие другие.

В 1903 году В. М. Чаплин создал первую в России систему водяного отопления с радиаторами. Предложенная им водяная система была прототипом широко применяемых в настоящее время систем отопления с радиаторами. Система была запатентована в 1903 году.



165 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
9 августа 2026 г.

ЧАПЛИН
ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ
1861-1931 гг.



UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 8(149)

Август 2026 г.

Часть 7

Новосибирск
2026

Главный редактор журнала:

Звездина Марина Юрьевна – д-р физ.-мат. наук, доц.

Редакционная коллегия:

Абдуллин Тимур Зуфарович – канд. техн. наук;

Колесников Александр Сергеевич – канд. техн. наук, проф.;

Манасян Сергей Керопович – д-р техн. наук, проф.;

Мартышкин Алексей Иванович – канд. наук, доц.;

Мерганов Аваз Мирсултанович – PhD;

Немирова Любовь Федоровна – канд. техн. наук, доц.;

Полтавец Валерий Васильевич – д-р техн. наук, доц.;

Радкевич Мария Викторовна – д-р техн. наук, проф.;

Старченко Ирина Борисовна – д-р техн. наук, проф.;

Усманов Хайрулла Сайдуллаевич – д-р техн. наук, проф.;

Фозилов Садриддин Файзуллаевич – д-р техн. наук, проф.;

Шайтура Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.;

Яронова Наталья Валерьевна – канд. техн. наук, доц.;

Мажидов Кахрамон Халимович – д-р хим. наук, проф.;

Тимухина Елена Николаевна – д-р техн. наук, проф.;

Деев Владислав Борисович – д-р техн. наук, проф.;

Кокшаров Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф.

U55 Universum: технические науки : электронный научный журнал. — № 8(149). — Часть 7. — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 84 с. — Текст : электронный. — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/category/8149> (дата публикации: 28.08.2026).

Содержание

Статьи на русском языке

Инфраструктура и транспорт

Энергетика и электроэнергетика

- Исследование энергетической эффективности и гармонического анализа анодного тока магнетронного генератора в установках микроволнового нагрева с помощью программы LTSPICE** 4

Гулиева Аделя Адемовна

Гардашбекова Наиля Адемовна

- Характеристики ветров в Нахчыванской котловине и их влияние на башенные конструкции** 17

Казымов Махбуб Гашим оглы

Гусейнов Горхмаз Мансур оглы

Велибеков Илкин Мехман оглы

- Математическое моделирование и исследование векторного управления ветроэнергетической системой на основе асинхронного генератора двойного питания** 29

Туйчиев Фуркат Нумонович

Рашидов Нурали Хайриддинович

Абдухалилов Абдуманноп Гайратжон угли

Транспорт и транспортные системы

- Сравнительный анализ и направления автоматизации расчёта параметров анкерной крепи горных выработок** 38

Жалбыров Жанибек Даулетханович

Рахматуллаев Рустам Рахимович

Ефанин Максим Викторович

Джусупов Нурбол Даулетханович

- Обзор подходов к управлению порожним контейнерным парком** 44

Кочнева Дарья Ивановна

- Анализ характерных неисправностей электрических самокатов и пути совершенствования системы их технического обслуживания в городской среде** 51

Световой Максим Андреевич

Авиационная и ракетно-космическая техника

- Задержанный возврат размера дульца гильзы спортивного патрона после отжига и обжима** 58

Жуков Игорь Геннадьевич

Экология и безопасность

Экология и техносферная безопасность

- Агрохимическая характеристика почвенных профилей Караузякского и Тахтакупырского районов республики Каракалпакстан** 70

Асаматдинов Алым Орынбаевич

Джаксымуратов Караматдин Мустапаевич

Кудьяров Оралбай Аширбаевич

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ИНФРАСТРУКТУРА И ТРАНСПОРТ

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Статья поступила в редакцию: 14.08.2026

Статья принята к публикации: 20.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 621.385.6+621.372.8

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23330

**Исследование энергетической эффективности и гармонического анализа
анодного тока магнетронного генератора в установках микроволнового
нагрева с помощью программы LTSPICE**

Гулиева Аделя Адемовна

преподаватель кафедры

Электроника и энергетика, Нахчыванский Государственный Университет

Азербайджанская Республика, г. Нахчывань

ORCID ID: 0009-0004-7405-3049

E-mail: adilebeyova@gmail.com

Гардашбекова Наиля Адемовна

доц. кафедры Физика, Нахчыванский государственный университет

Азербайджанская Республика, г. Нахчывань

ORCID ID: 0000-0002-0191-9428

E-mail: naileqardashbekova@gmail.com

**Investigation of energy efficiency and harmonic analysis of the anode current of
a magnetron generator in microwave heating systems using LTSPICE**

Guliyeva Adela Ademovna

lecturer

Department of Electronics and Power Engineering, Nakhchivan State University

Azerbaijan, Nakhchivan

Gardashbekova Naila Ademovna

Associate Professor

Department of Physics, Nakhchivan State University

Azerbaijan, Nakhchivan

Аннотация

В статье исследуются энергетическая эффективность и гармонический состав анодного тока магнетронного генератора, применяемого в системах микроволнового нагрева, с использованием программной среды LTspice. Целью исследования является моделирование высоковольтной цепи питания магнетрона, анализ переходных процессов анодного напряжения и тока, а также количественная оценка гармонических искажений при изменении режима нагрузки. В рамках исследования смоделированы трансформатор, диодно-конденсаторный выпрямительный узел и цепь питания магнетрона. Для анализа спектрального состава анодного тока применен метод быстрого преобразования Фурье (БПФ), на основе которого определены основные гармонические компоненты и коэффициент суммарных гармонических искажений (THD). Результаты моделирования показали импульсный характер тока в высоковольтной цепи и наличие выраженных высших гармоник, обусловленных нелинейностью элементов схемы. Полученное значение THD составило 58,98 %, что свидетельствует о существенном уровне нелинейных искажений. Установлено, что изменение параметров нагрузки влияет на амплитуду анодного тока и гармонический состав, что может приводить к дополнительным энергетическим и тепловым потерям. Предложенный подход может быть использован для анализа, мониторинга и оптимизации режимов работы магнетронных генераторов, повышения их энергетической эффективности и обеспечения электромагнитной совместимости микроволновых установок.

Abstract

The article investigates the energy efficiency and harmonic composition of the anode current of a magnetron generator used in microwave heating systems using the LTspice simulation environment. The aim of the study is to model the high-voltage power supply circuit of the magnetron, analyze the transient processes of the anode voltage and current, and quantitatively evaluate harmonic distortions under varying load conditions. Within the framework of the study, the transformer, diode-capacitor rectifier unit, and magnetron power supply circuit were modeled. The Fast Fourier Transform (FFT) method was applied to analyze the spectral composition of the anode current, based on which the main harmonic components and the Total Harmonic Distortion (THD) were determined. The simulation results demonstrated the pulsed nature of the current in the high-voltage circuit and the presence of pronounced higher-order harmonics caused by the nonlinear characteristics of the circuit elements. The obtained THD value was 58.98 %, indicating a significant level of nonlinear distortion. It was established that variations in load parameters affect the amplitude and harmonic composition of the anode current, which may lead to additional energy and thermal losses. The proposed approach can be used for the analysis, monitoring, and optimization of magnetron generator operating modes, improving their energy efficiency, and ensuring electromagnetic compatibility in microwave heating systems.

Библиографическое описание: Гулиева А.А., Гардашбекова Н.А. Исследование энергетической эффективности и гармонического анализа анодного тока магнетронного генератора в установках микроволнового нагрева с помощью программы LTSPICE // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23330>

Ключевые слова: LTspice, магнетрон, микроволновой нагрев, анализ БПФ, гармонические искажения (THD), энергетическая эффективность, анодный ток.

Keywords: LTspice, magnetron, microwave heating, FFT analysis, harmonic distortion (THD), energy efficiency, anode current.

1. Введение

Технология микроволнового нагрева в последние годы нашла широкое применение в различных производственных областях, например таких, как пищевая промышленность, медицина, химия и материаловедение. Основными преимуществами этой технологии являются высокая эффективность преобразования энергии, равномерный нагрев материала по всему объему и точное управление процессом [10]. Для надежной и эффективной работы магнетронного генератора, являющегося основным источником микроволновой энергии, критически важно правильное построение его высоковольтной системы питания и оптимальное согласование с параметрами нагрузки. Изменение режима нагрузки может повлиять на электрические параметры цепи питания, приводя к снижению выходной мощности генератора, росту гармонических искажений и возникновению дополнительных потерь энергии.

В современных инженерных исследованиях наряду с экспериментальными методами широкое применение находят компьютерное моделирование и методы симуляции. В частности, программные пакеты на базе SPICE, включая LTspice, считаются надежными инструментами для моделирования силовой электроники и нелинейных электрических цепей, а также для анализа переходных процессов и гармонического состава. LTspice позволяет исследовать различные режимы работы сложных электрических цепей за короткое время и с высокой точностью, а также снизить объем и стоимость лабораторных испытаний [8].

В существующих исследованиях особенности высоковольтных систем питания магнетронных генераторов изучались преимущественно экспериментальными методами. Тем не менее количество работ, посвященных комплексной оценке в программной среде LTspice переходных процессов цепи питания, гармонического состава анодного тока и энергетической эффективности при различных режимах нагрузки, ограничено [1]. В связи с этим изучение гармонических характеристик и энергетических показателей цепи питания на основе компьютерного моделирования представляется актуальным как с научной, так и с практической точек зрения [9].

Научная новизна данного исследования заключается в том, что высоковольтная цепь питания магнетронного генератора, применяемого в системах микроволнового нагрева, была комплексно смоделирована в среде LTspice, а переходные процессы и гармонический состав анодного тока оценены посредством анализа БПФ [12]. Впервые на основе единой модели симуляции проанализировано влияние изменения параметров нагрузки на коэффициент гармонических искажений (THD) и энергетическую эффективность, а полученные результаты оценены с точки зрения оптимизации режима работы магнетронного генератора и снижения потерь энергии.

Основная цель состоит в моделировании высоковольтной схемы питания магнетронного генератора в среде LTspice, анализе переходных процессов, оценке гармонического состава анодного тока с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) и определении влияния изменения параметров нагрузки на энергетическую эффективность. Результаты исследования имеют практическую значимость с точки зрения оптимизации режимов работы магнетронных генераторов в системах микроволнового нагрева, снижения гармонических искажений и повышения энергетической эффективности [13].

2. Материалы и методы

Магнетрон представляет собой вакуумный электронный прибор, генерирующий высокочастотные электромагнитные волны, и считается основным источником энергии в системах микроволнового нагрева [4]. Он преобразует электрическую энергию в микроволновое излучение с частотой около 2,45 ГГц, которое используется в различных промышленных и бытовых применениях. Поскольку эта частота относится к диапазону промышленных, научных и медицинских (ISM) применений, она широко используется в установках микроволнового нагрева [18].

К основным конструктивным элементам магнетрона относятся катод, анод, резонаторные полости, постоянный магнит и антенна [6]. При нагреве катода за счет термоэлектронной эмиссии испускаются электроны. Высокое напряжение, создаваемое между анодом и катодом, обеспечивает движение электронов в направлении анода. В то же время магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом, искривляет траекторию электронов, способствуя их спиралевидному движению. В результате взаимодействия электронов с резонаторными полостями возникают высокочастотные электромагнитные колебания, и эта энергия через антенну передается в волновод или микроволновую камеру [15].

Для обеспечения нормального режима работы магнетрона на анодную цепь обычно подается высокое постоянное напряжение порядка 3–4 кВ. Во время работы анодный ток в зависимости от типа магнетрона и условий нагрузки изменяется в интервале примерно 300–500 мА. Эти параметры считаются ключевыми показателями, определяющими выходную мощность генератора и эффективность преобразования энергии [17].

Выходная мощность магнетрона в зависимости от анодного напряжения, анодного тока и коэффициента полезного действия выражается следующей формулой:

$$P_{out} = \eta U_A I_A$$

где:

P_{out} — выходная мощность магнетрона, Вт;

U_A — анодное напряжение, В;

I_A — анодный ток, А;

η — коэффициент полезного действия магнетрона.

В магнетронах бытового и промышленного назначения коэффициент полезного действия изменяется в пределах примерно 0,65–0,75 (65–75 %). Это означает, что 65–75 % электрической энергии, получаемой от источника питания, преобразуется в микроволновую энергию, а оставшаяся часть теряется в виде тепловых потерь и других внутренних энергозатрат [19].

3. Результаты и обсуждение

Энергетическая эффективность магнетрона зависит не только от напряжения питания, но и от согласования нагрузки и уровня отражения микроволновой энергии [18]. Неправильное согласование нагрузки приводит к увеличению отраженной мощности, изменению формы анодного тока, повышению уровня гармоник и, как следствие, к снижению коэффициента полезного действия генератора. По этой причине мониторинг режима работы магнетрона на основе анодного тока и напряжения имеет важное значение для надежной и эффективной эксплуатации промышленных установок микроволнового нагрева [12].

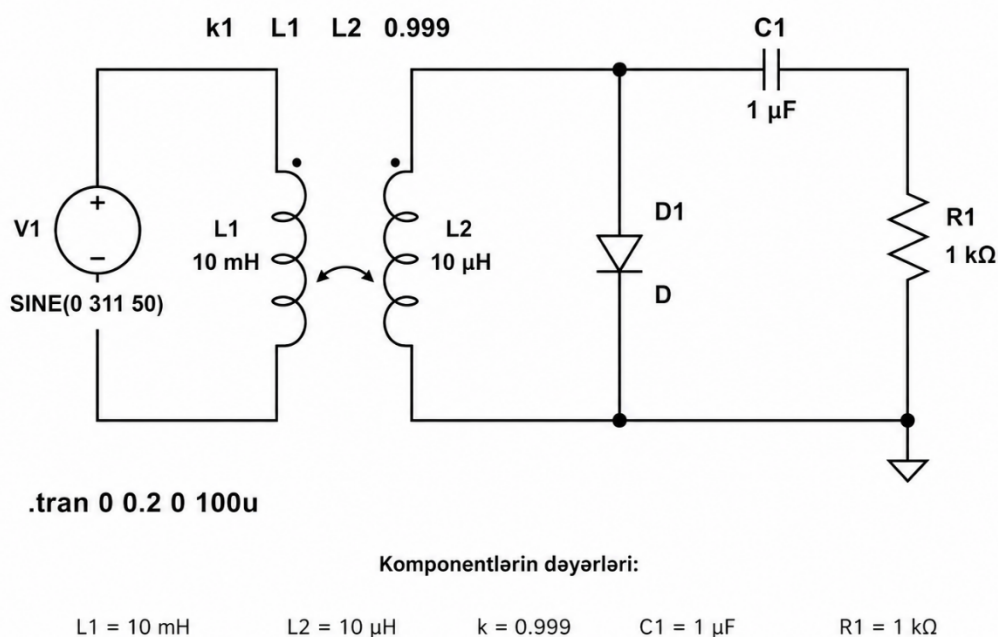


Рисунок 1. Общая схематическая модель высоковольтной цепи питания магнетрона в программной среде LTspice

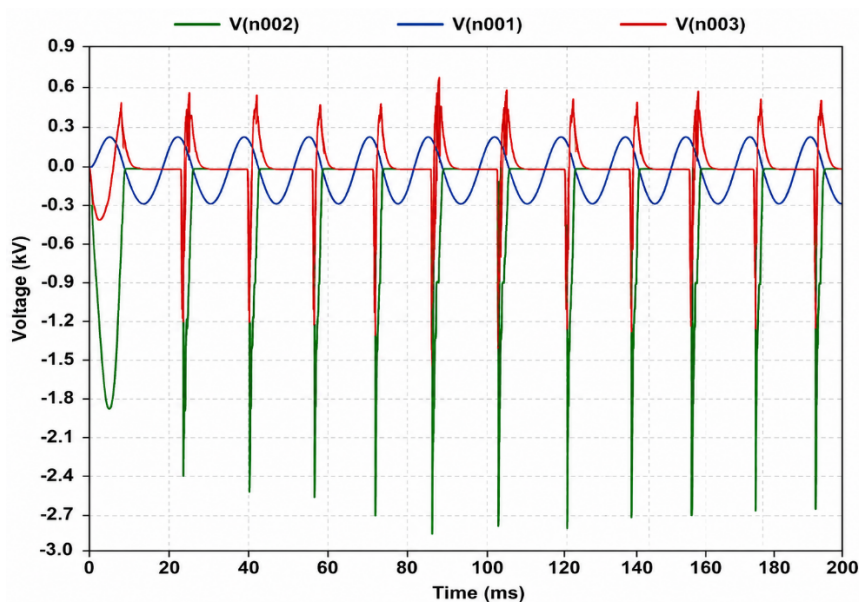


Рисунок 2. Схема замещения входных и выходных элементов трансформатора и блока питания

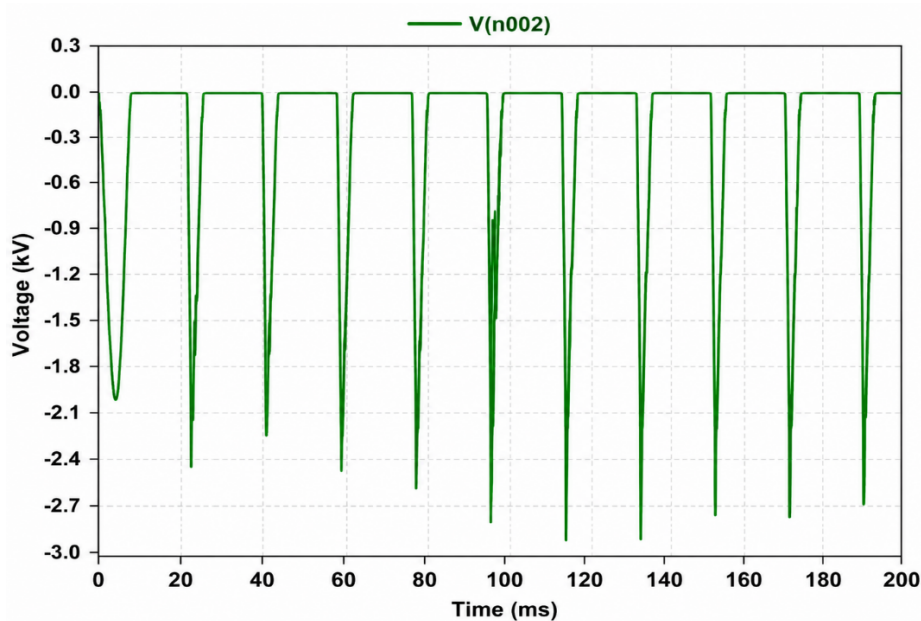


Рисунок 3. Общий графический вид переходных процессов цепи питания в программе LTspice. (Результаты симуляции переходного процесса высоковольтной цепи питания магнетрона в программе LTspice: синий — переменное выходное напряжение трансформатора; красный и зеленый — импульсы напряжения, возникающие под действием диода и конденсатора)

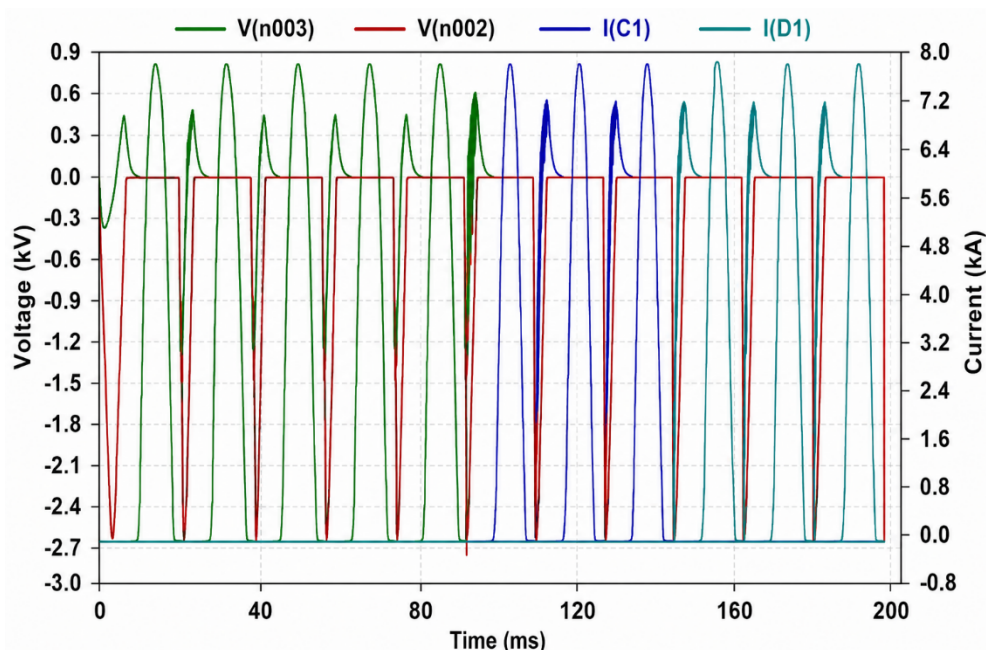


Рисунок 4. График изменения переменного напряжения второй обмотки трансформатора во времени

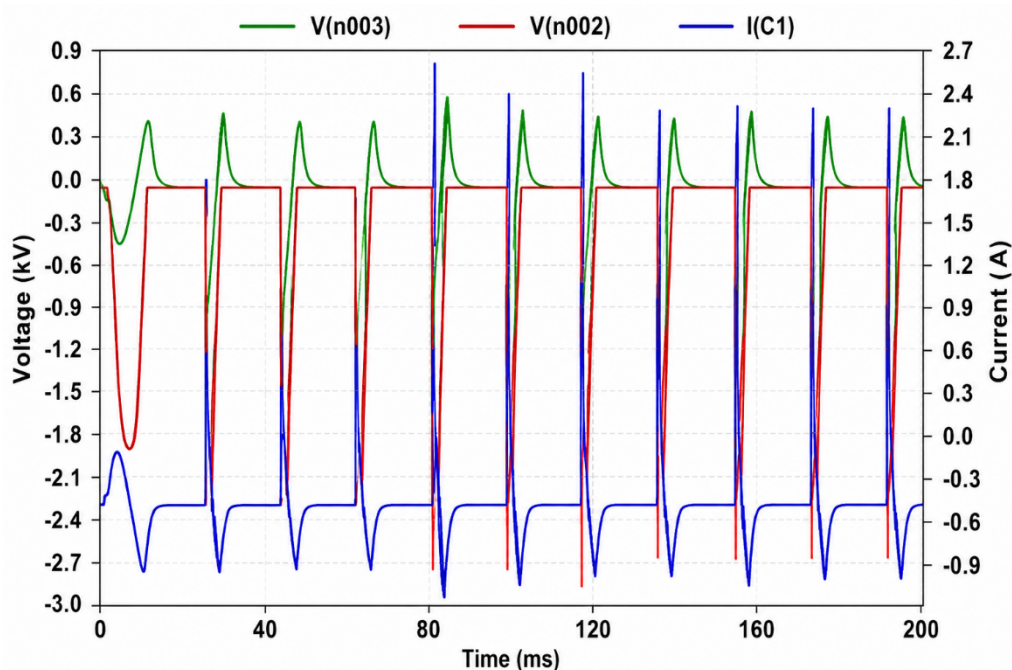


Рисунок 5. Динамика формирования напряжения в диодно-конденсаторном узле

Рассматривая результаты симуляции переходных процессов высоковольтной цепи питания магнетрона в программе LTspice, на рисунке показаны напряжение второй обмотки трансформатора (зеленый), высокое напряжение, образующееся в диодно-конденсаторном узле (красный), и ток через конденсатор (синий). Согласно результатам симуляции, конденсатор заряжается только тогда, когда диод находится в проводящем состоянии, и в этот момент возникают кратковременные импульсы тока. Максимальное отрицательное напряжение в цепи составляет около -2.7 кВ , что согласуется с принципом высоковольтного питания магнетрона [19].

В то же время результаты проведенной симуляции показывают, что во второй обмотке трансформатора возникает высокое напряжение, а диод и конденсатор совместно обеспечивают формирование напряжения. Токи диода и конденсатора протекают только в виде кратковременных импульсов, что указывает на периодический процесс заряда и разряда конденсатора [13]. Полученные результаты подтверждают принцип работы высоковольтной цепи питания магнетрона и согласуются с теоретическими знаниями.

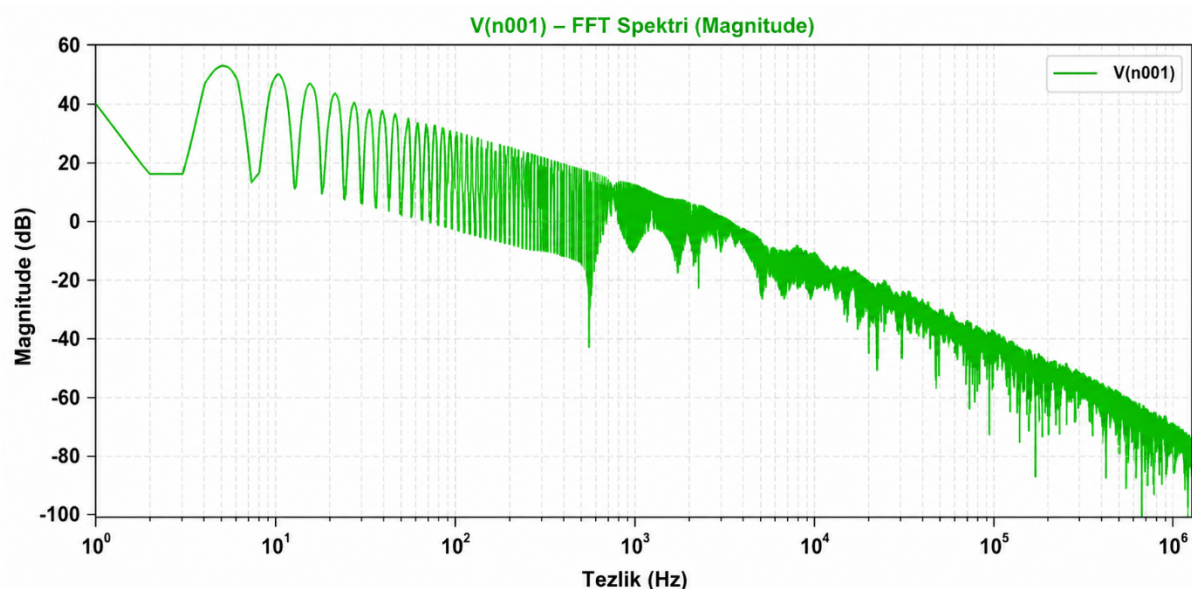


Рисунок 6. График изменения тока диода $I(D1)$ во временной области, имеющий импульсный характер

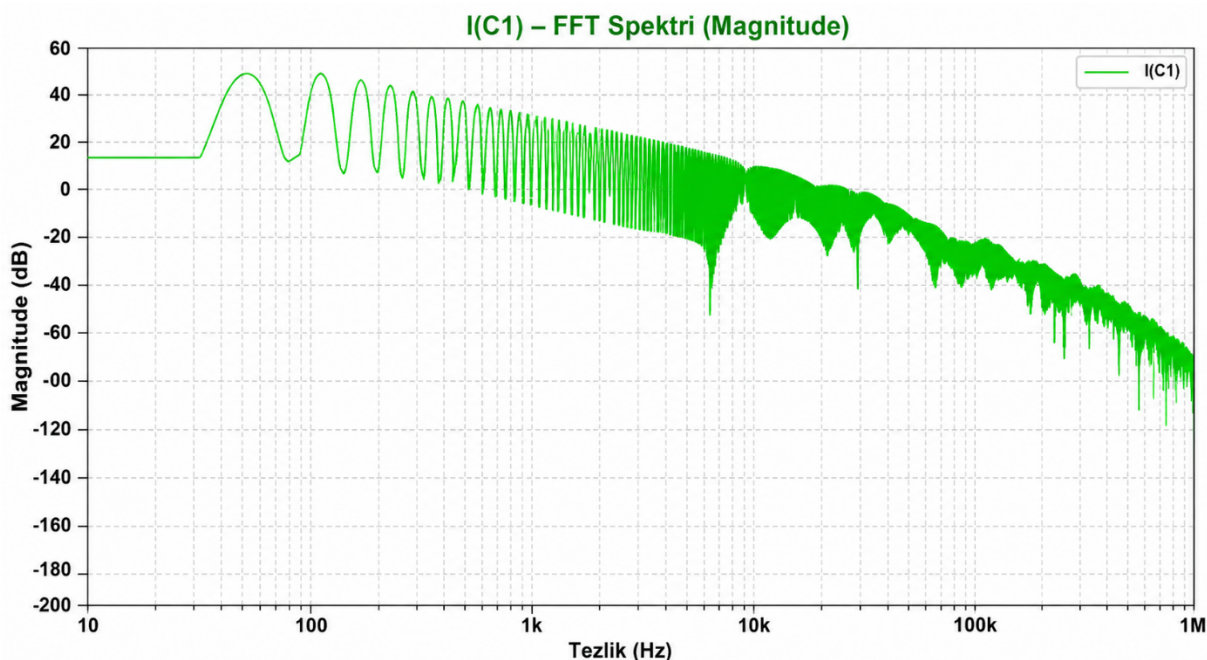


Рисунок 7. Сравнение синфазного изменения временных диаграмм токов диода и конденсатора

Анализ БПФ показывает, что основные энергетические компоненты сигнала сосредоточены в области низких частот [17]. С ростом частоты амплитуда гармоник постепенно уменьшается, что свидетельствует об ослаблении высокочастотных компонентов сигнала. Гармоники, наблюдаемые в спектре, отражают влияние нелинейных элементов в цепи [5].

Результаты симуляции показывают, что временные диаграммы токов диода и конденсатора изменяются синфазно. Это обусловлено последовательной структурой соединения цепи: поскольку процесс заряда конденсатора ограничен интервалом проводимости диода, протекание тока для обоих элементов происходит одновременно. Это играет решающую роль в формировании импульсного характера тока, необходимого для высоковольтного питания магнетрона [7].

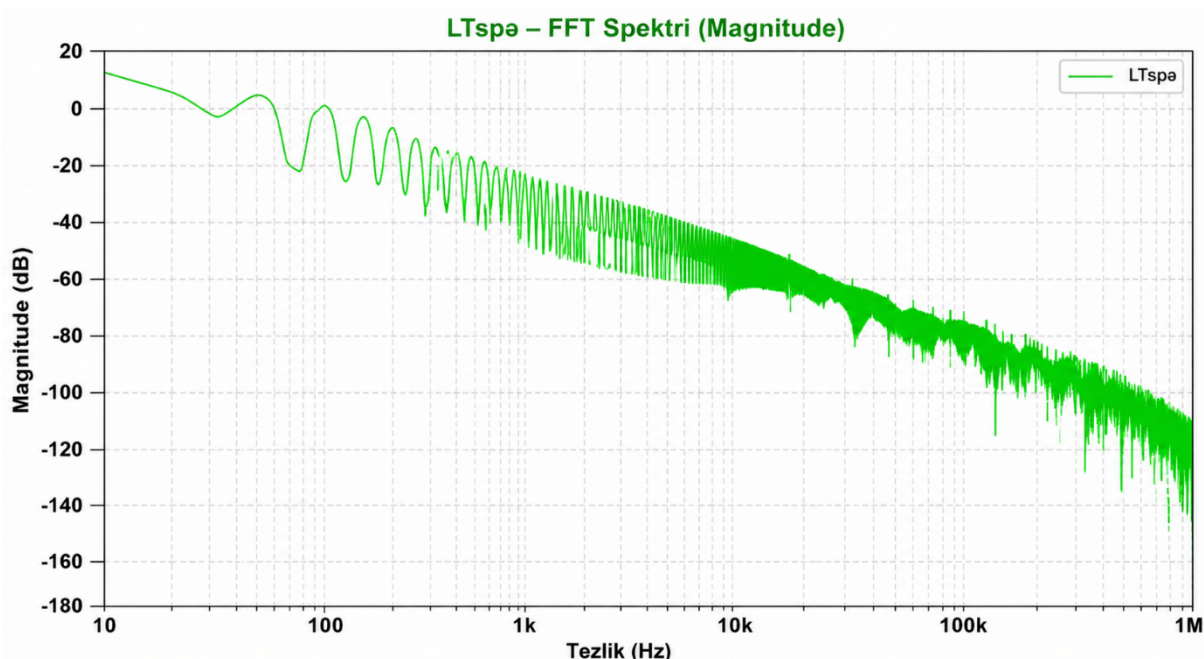


Рисунок 8. График спектра БПФ магнитного потока во второй обмотке трансформатора ($L2 : flux$)

Анализ БПФ магнитного потока во второй обмотке трансформатора ($L2 : flux$) отражает спектральный состав гармонических компонентов, возникающих при преобразовании энергии в магнитное поле. Результаты БПФ показывают, что хотя основной энергетический компонент сосредоточен на фундаментальной частоте, в результате импульсного характера питания формируются высокочастотные гармоники. Спектральное распределение магнитного потока напрямую связано с формой напряжения питания и импульсным характером тока, возникающего в диодно-конденсаторном узле [4]. Компоненты высокой амплитуды, наблюдаемые в низкочастотной области спектра, отражают нелинейные характеристики магнитного сердечника трансформатора и считаются одним из основных факторов, влияющих на эффективность преобразования энергии [11].

Рост гармоник приводит к возникновению дополнительных потерь в магнитном сердечнике трансформатора, повышению тепловой нагрузки на диод и ухудшению электромагнитной совместимости (ЭМС) [8]. Согласно результатам симуляции, значение коэффициента суммарных гармонических искажений (THD_I), составляющее 58.98 %,

указывает на преобладание нелинейных процессов в цепи питания. Данная ситуация может привести к росту потерь энергии вследствие неполного согласования нагрузки с магнетроном, снижению коэффициента полезного действия и негативно повлиять на долговечность надежной эксплуатации установки.

С целью количественной оценки гармонического состава анодного тока использовался модуль Fourier Analysis программы LTspice. Коэффициент гармонических искажений определяется следующим выражением:

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2}}{i_1} \times 100\%$$

где I_1 — амплитуда компоненты основной частоты, а I_n — амплитуда высших гармоник n -го порядка [14]. Этот показатель характеризует качество сигнала в системе: чем ниже коэффициент THD_I , тем эффективнее работает преобразование энергии магнетроном и тем ниже уровень электромагнитных помех (ЕМИ). Результаты симуляции показывают, что при отклонении сопротивления нагрузки от номинального значения наблюдается рост показателя THD_I [2]. Это, в свою очередь, обуславливает дополнительные тепловые потери, которые могут привести к уменьшению коэффициента полезного действия (КПД) магнетрона и сокращению срока службы прибора.

С целью количественной оценки гармонических искажений был использован модуль анализа Фурье программы LTspice, а полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты анализа Фурье по току в программе LTspice

Номер гармоники	Частота (Гц)	Компонента Фурье	Нормированная компонента	Фаза (°)	Нормированная фаза (°)
DC (Постоянная составляющая)	—	4295.16 мА	—	—	—
1	1.000×10^2	3.508×10^3	1.000	-94.60°	0.00°
2	2.000×10^2	1.339×10^3	0.3816	-92.30°	$+2.29^\circ$
3	3.000×10^2	8.529×10^2	0.2431	-91.54°	$+3.06^\circ$
4	4.000×10^2	6.298×10^2	0.1795	-91.15°	$+3.44^\circ$
5	5.000×10^2	5.002×10^2	0.1426	-90.92°	$+3.67^\circ$
6	6.000×10^2	4.153×10^2	0.1184	-90.77°	$+3.83^\circ$
7	7.000×10^2	3.551×10^2	0.1012	-90.66°	$+3.94^\circ$
8	8.000×10^2	3.103×10^2	0.08845	-90.58°	$+4.02^\circ$
9	9.000×10^2	2.755×10^2	0.07854	-90.52°	$+4.08^\circ$

Примечание: частичные гармонические искажения (Partial Harmonic Distortion) = 54.37 %, суммарные гармонические искажения (THD_I) = 58.98 %.

Заключение

В результате проведенного исследования была комплексно проанализирована высоковольтная схема питания магнетронного генератора, используемого в системах микроволнового нагрева, и определены основные факторы, влияющие на его электрические и энергетические показатели. Из показателей, полученных в итоге анализа, следует, что переходные процессы в цепи питания, импульсный характер анодного напряжения и тока, а также влияние нелинейных элементов напрямую воздействуют на общий режим работы системы и эффективность преобразования энергии. В результате гармонического анализа установлено наличие высокочастотных гармоник и рост гармонических искажений при изменении параметров нагрузки, что, как показано, приводит к снижению коэффициента полезного действия магнетрона, дополнительным тепловым потерям и возникновению электромагнитных помех.

Исследование доказывает, что оптимизация схемы питания магнетронного генератора имеет важное значение для стабильной, более надежной и энергоэффективной работы систем микроволнового нагрева. С этой целью моделирование электрических процессов и гармонический анализ системы были выполнены в программной среде LTspice; полученные результаты симуляции подтвердили теоретические положения и позволили оценить различные режимы работы. Предложенный подход имеет практические возможности применения в направлениях проектирования установок микроволнового нагрева, оптимизации рабочих параметров, повышения энергетической эффективности и обеспечения электромагнитной совместимости.

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: учебник: в 3 ч. – М.: Высшая школа, 2007. – 752 с.
2. В.И. Петровский, Ю.Е. Седельников. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1986.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. Ч.1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
4. Каганов М.И. Электроны, фононы, магноны. – М.: Наука, 1979. – 192 с.
5. Касаткин, А.С., Немцов М.В. Курс электротехники: учебник. – М.: Академия, 2016. – 288 с.
6. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая школа, 1980. – 226 с.
7. Фролов В.Я. Устройства силовой электроники и преобразовательной техники с разомкнутыми и замкнутыми системами управления в среде Matlab – Simulink. – М.: Лань, 2018. – 332 с.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК-Пресс, 2014. – 282 с.
9. Analog Devices. LTspice. Analog Devices. LTspice Official Page Retrived from: [Электронный ресурс]. – 2025. URL: <https://www.analog.com/en/resources/media-center/videos/6375717978112.html> (дата обращения: 09.08.2026).

10. Balanis C.A. Advanced engineering electromagnetics. – 2nd ed.– John Wiley & Sons. – 2012.
11. Basso C. Computer simulation of power electronics and motor drives // Power Electronics Handbook. – 2024.
12. Collin, R.E. Foundations for microwave engineering. – 2nd ed. – IEEE Press. – 2001.
13. Erickson R.W. Maksimović D. Fundamentals of power electronics. – 3rd ed. – Springer. – 2020.
14. IEEE Power & Energy Society [Электронный ресурс]. // IEEE Standard 519. – 2022. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/> (дата обращения: 09.08.2026).
15. Kraus J.D., Marhefka R.J. Antennas for all applications. – 3rd ed. – McGraw-Hill. – 2002.
16. Kubulus P.P., Jørgensen A.B., Beczkowski S.M., Munk-Nielsen S. An LTSpice–MATLAB interface for mitigating convergence problems in circuit optimization with SPICE // IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP). – 2022. – DOI: 10.1109/IWIPP50752.2022.9894135.
17. Mohan N., Undel, T.M., Robbins W.P. Power electronics: Converters, applications, and design. – 3rd ed. – John Wiley & Sons. – 2003.
18. Pozar D.M. Microwave engineering. – 4th ed. – John Wiley & Sons. – 2012.
19. Rashid M.H. Power electronics: Circuits, devices, and applications. – 4th ed. – Pearson. – 2014.

References

1. Bessonov L.A. [Theoretical foundations of electrical engineering]. In 3 parts. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007. 752 P. (In Russ.)
2. Petrovsky V.I., Sedelnikov Yu.E. [Electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. (In Russ.)
3. Zinoviev G.S. [Fundamentals of power electronics]. Part 1. Novosibirsk, NSTU Publ., 1999. 199 P. (In Russ.)
4. Kaganov M.I. [Electrons, phonons, magnons]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 192 P. (In Russ.)
5. Kasatkin A.S., Nemtsov M.V. [Electrical engineering course]. Moscow, Akademiya Publ., 2016. 288 P. (In Russ.)
6. Lebedev I.V. [Microwave technology and devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 226 P. (In Russ.)
7. Frolov V.Ya. [Power electronics and converter equipment with open-loop and closed-loop control systems in the Matlab–Simulink environment]. Moscow, Lan' Publ., 2018. 332 P. (In Russ.)
8. Chernykh I.V. [Modeling of electrical devices in MATLAB: SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK-Press Publ., 2014. 282 P. (In Russ.)
9. Analog Devices. LTspice. Analog Devices. LTspice Official Page Retrieved from:.. – 2025.
10. Balanis C.A. Advanced engineering electromagnetics. 2nd ed. John Wiley & Sons. – 2012.
11. Basso C. Computer simulation of power electronics and motor drives. – In: Power Electronics Handbook. 5th ed. Elsevier, 2024.
12. Collin R.E. Foundations for microwave engineering. 2nd ed. IEEE Press. – 2001.

13. Erickson R.W. Maksimović D. Fundamentals of power electronics. 3rd ed. Springer. – 2020.
14. IEEE Power & Energy Society. IEEE Standard 519–2022: IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE, 2022. Retrieved from: (accessed: 09.08.2026).
15. Kraus J.D., Marhefka R.J. Antennas for all applications. 3rd ed. McGraw-Hill. – 2002.
16. Kubulus P.P., Jørgensen A.B., Beczkowski S.M., Munk-Nielsen S. An LTSpice–MATLAB interface for mitigating convergence problems in circuit optimization with SPICE. – In: IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP), 2022. – DOI: 10.1109/IWIPP50752.2022.9894135.
17. Mohan N., Undel T.M., Robbins W.P. Power electronics: Converters, applications, and design. 3rd ed. John Wiley & Sons. – 2003.
18. Pozar D.M. Microwave engineering. 4th ed. John Wiley & Sons. – 2012.
19. Rashid M.H. Power electronics: Circuits, devices, and applications. 4th ed. Pearson. – 2014.

УДК 624.17+551.51

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23281

Характеристики ветров в Нахчыванской котловине и их влияние на башенные конструкции

Казымов Махбуб Гашим оглы

д-р филос. по техн. наукам, доц., руководитель
лаборатории, Институт природных ресурсов Нахчыванского филиала НАНА
Азербайджанская Республика, Нахичеванская Автономная Республика, г. Нахичевань

Гусейнов Горхмаз Мансур оглы

д-р филос. по химии, доц., Институт природных ресурсов Нахчыванского филиала НАНА
Азербайджанская Республика, Нахичеванская Автономная Республика, г. Нахичевань

Велибекои Илкин Мехман оглы

инженер
Институт природных ресурсов Нахчыванского филиала НАНА
Азербайджанская Республика, Нахичеванская Автономная Республика, г. Нахичевань
E-mail: mahbubkazimov@yahoo.com

Wind characteristics in the Nakhichevan Basin and their impact on tower structures

Kazimov Mahbub Hashim oglu

doctor of Philosophy in Engineering, Assoc. Prof, Head of Laboratory
Institute of Natural Resources
Nakhchivan Branch of ANAS
Azerbaijan, Nakhchivan Autonomous Republic, Nakhchivan

Huseynov Gorkhmaz Mansur oglu

Doctor of Philosophy in Chemistry, Assoc. Prof
Institute of Natural Resources
Nakhchivan Branch of ANAS
Azerbaijan, Nakhchivan Autonomous Republic, Nakhchivan

Velibekoyi Ilkin Mehman oglu

Engineer
Institute of Natural Resources
Nakhchivan Branch of ANAS
Azerbaijan, Nakhchivan Autonomous Republic, Nakhchivan

Библиографическое описание: Казымов М.Г. оглы, Гусейнов Г.М. оглы, Велибекои И.М. оглы Характеристики ветров в Нахчыванской котловине и их влияние на башенные конструкции // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23281>

Аннотация

В статье показаны результаты научных исследований горно-долинных ветров и порывов ветра в Нахчыванской котловине. Рассмотрены особенности горно-долинных ветров, в зависимости от сложных географических условий региона. Определено что наличие невысоких гор внутри котловины способствуют изменению направления и скорости ветров.

Анализировано динамика скорости горно-долинных ветров при зигзагообразном обтекании через горных ущелий и узких проходов и влияние этих потер на характеристику ветрового потока.

Установлено что особое влияние на скорость ветра в Нахчыванской котловине оказывают характер рельефа и формы склонов. За определенное времени через различные сечения ушеле проходит одинаковый объем воздушного потока. При сужении ширину ущелья увеличивается скорость и кинетическая энергия воздушного потока.

Рассмотрены особенности порывов ветров, в зависимости от географических условий региона. Рассмотрены результаты научных исследований процесса формирования, развитие порывов ветра и подтверждено серьезные опасность порывов ветра.

Анализируются нагрузки горно-долинных ветров и порывов ветра на высотные конструкций и сооружения и их устойчивость, прочность к этим нагрузкам. Показаны причины изменения скорости ветра, температуры воздуха, давления и плотности.

Исследованы действие давлений на поверхность конструкций, в зависимости от формы конструкции, при меняющейся температуре наружного воздуха. Установлено что при воздействии порывов ветра на конструкцию возникает избыточное давление на опоры конструкции.

Установлено что порывы ветра обладают большой разрушающей силой и возникают на короткое время, снося конструкции, ломая деревья, уничтожая строение и т.д.

Abstract

The article presents the results of scientific studies of mountain-valley winds and wind gusts in the Nakhchivan Basin. The characteristics of mountain-valley winds depending on the complex geographical conditions of the region are examined. It is established that the presence of low mountains within the basin contributes to changes in wind direction and velocity.

The dynamics of mountain-valley wind velocity during the zigzag flow of air through mountain gorges and narrow passages, as well as the influence of these losses on the characteristics of the wind flow, are analyzed. It is established that the relief characteristics and slope configurations have a significant influence on wind velocity in the Nakhchivan Basin. Over a certain period of time, the same volume of air passes through different cross-sections of a gorge. As the width of the gorge decreases, the velocity and kinetic energy of the airflow increase.

The characteristics of wind gusts depending on the geographical conditions of the region are examined. The results of scientific studies on the formation and development of wind gusts are presented, and the significant hazards posed by wind gusts are confirmed.

The loads caused by mountain-valley winds and wind gusts on high-rise structures and buildings, as well as their stability and strength under such loads, are analyzed. The causes of changes in wind velocity, air temperature, pressure, and density are identified.

The effects of pressure on the surfaces of structures, depending on their shape and variations in outdoor air temperature, are investigated. It is established that when a structure is subjected to wind gusts, excessive pressure occurs on its supporting elements.

It is established that wind gusts possess considerable destructive force and occur over short periods of time, potentially causing structures to collapse, trees to break, buildings to be damaged or destroyed, and other significant damage.

Ключевые слова: горно-долинные ветры порывы ветра, зигзагообразное движение ветра, ураганная сила, рельеф местности, ветровые нагрузки башня конструкция.

Keywords: mountain-valley winds, wind gusts, zigzag airflow patterns, hurricane-force winds, terrain topography, wind loads on tower structures.

Введение

Нахчыванская котловина Азербайджанской Республики занимает южную часть Кавказского перешейка и расположена между 38°51' - 39°52' с. ш. и 44°37' – 46°13' восточной долготы, на юго-западном склоне Малого Кавказа [10,13].

На степень состояния атмосферного воздуха в Нахчыванской котловине влияют облачность, туманы, застой ветра (штиль) и радиационный режим. В Нахчыванской котловине наблюдаются сухие и горячие ветры- «суховеи», по Азербайджански «гарайел». Относительная влажность при суховеях падает до 15÷20 %. Температура воздуха достигает + 45 – 49°С и выше [1].

Окруженный горами Малого Кавказа Нахчыванская котловина является горной страной со сложной структурой. Даралаязско- Зангезурские горные хребты, являются в основном потухшими вулканами.

В Ордубадском районе, на высокогорной зоне Зангезурского хребта горы Капыджыг (3817 м. н. у. м.) расположен нагорно-тундровый климат.

Изменения массовой и весовой плотности воздуха Нахчыванской котловины в зависимости от его температуры и давления до высоты 4 км показаны в таблице 1.:

Таблица 1.

Изменение давления и плотности воздуха в Нахчыванской котловине

№	Название районов	Высота Н (н.у.м.)	Давление мм. рт. ст.	Плотность кгс с ² /м ⁴
1	город Нахчыван	850	700,0	1,16
2	Шарурский район	800	710,0	1,18
3	Бабекский район	850-1000	700,0 -675,0	1,16 -1,13
4	Джульфинский район	1000-2000	675,0 -600,0	1,13 -1,03
5	Шахбузский район	1500-3000	635,0 -530,0	1,08 -0,93
6	Ордубадский район	1500-3000	635,0 -530,0	1,08 - 0,93

Ветры на территории Нахчыванской котловины являются составной частью общей циркуляции атмосферы и определяют климат и погоду на территории Нахчыванской котловины. Рельеф местности способствует усилению ветров в глубоких впадинах и обрывах.

Горы оказывают тормозящее действие на вращательное движение атмосферы. Наличие невысоких гор внутри котловины (Велидаг, Ардыч, Кюкюдаг, Гёйдаг, Иланлыдаг, Дарыдаг, Ордубаддаг и т. д.) способствуют изменению направления и скорости ветра, что происходит в результате обтекания этих гор воздушными потоками [2,6].

Горные рельефы с многочисленными препятствиями создают значительные трение и сильно замедляют скорость ветра. Препятствия на пути ветрового потока способствуют возникновению турбулентной циркуляции воздуха местности [9,14].

Например: в связи с географическими особенностями горы Иланлыдаг (2414м.н.у.м.) достигший горы Иланлыдага воздушный поток в своем движении теряет свою скорость и происходит турбулентность воздушного потока (рис.1):

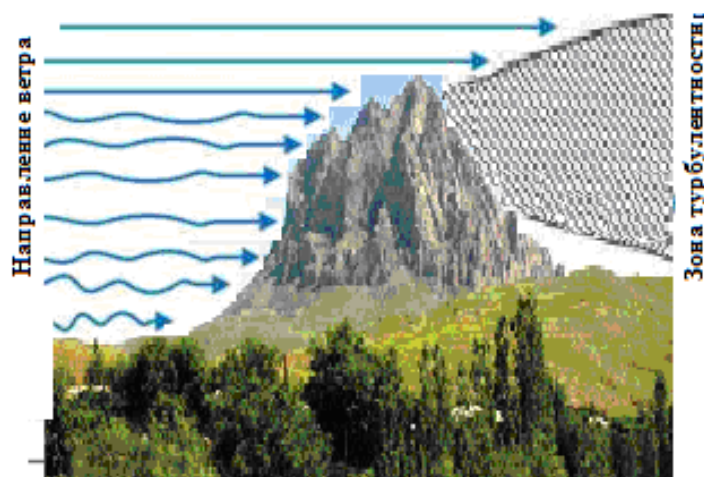


Рисунок 1. Возникновение турбулентной силы в горе Иланлыдаг

Под влиянием неровностей рельефа преимущественно за крупными горными препятствиями, которые воздушный поток обходить с двух сторон, формируются зоны конвекции. В результате значительного градиента скорости движение воздуха становится турбулентным и остается таким на определенном расстоянии.

Экспериментальный процесс

В зависимости от местных условий в Нахчыванской котловине формируются горно-долинные ветры. Горно-долинные ветры, развиты преимущественно по долинам и ущельям гор, которые хорошо освещаются солнцем. Днем дуют зигзагообразными ущельями вверх к вершинам гор, ночью наоборот, сверху вниз.

Двигаясь зигзагообразно по ущельям горно-долинные ветры, устанавливают взаимосвязь между плотностью, скоростью и площадью поперечного сечения ущелья и струи воздушного потока [5].

Скорость этих ветров зависит от ширины, глубины и формы ущелий (рис.2.):

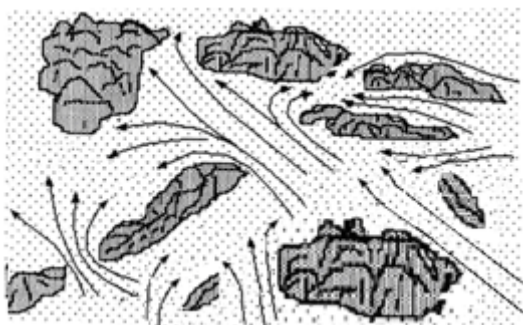


Рисунок 2. Зигзагообразное движение горно-долинных ветров в ущельях

Особое влияние на скорость ветра в Нахчыванской котловине оказывают изрезанность и характер рельефа, формы склонов [4].

Увеличение скорости ветра через различные сечения ущелья в определенную единицу времени проходит одинаковый объем воздуха, но с разными скоростями. При сужении ширину ущелья увеличивается скорость воздушного потока и увеличивается кинетическая энергия воздушного потока.

Увеличение скорости ветра происходит в местах сближения линий течения ветра в узких долинах (г. Джульфа), на вершинах возвышенностей Батабата Шахбузского района и Агдере Ордубадского района [8].

На рис.3. показан распределение скоростей ветра в Нахчыванской котловине:

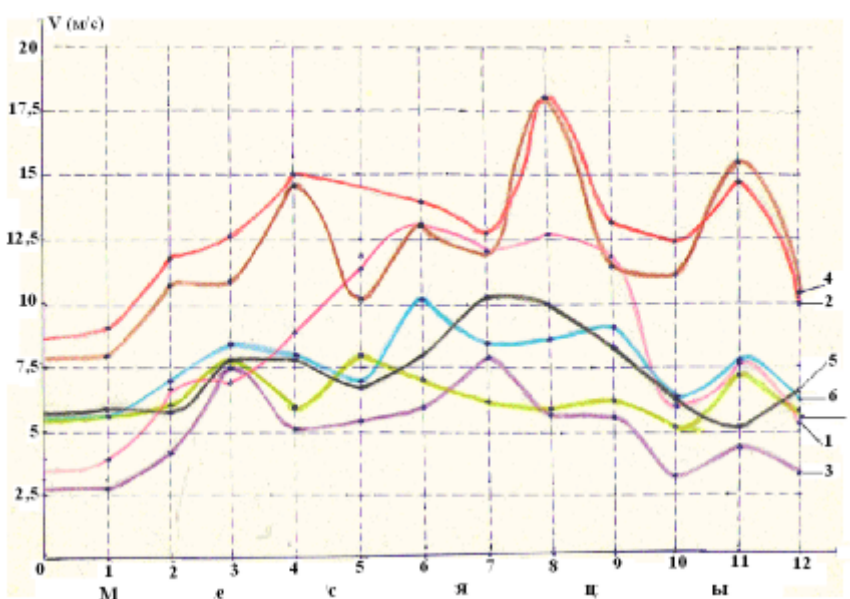


Рисунок 3. Распределение скоростей ветра

1. г. Нахчыван, 2. г. Джульфа, 3. г. Шарур, 4. г. Шахбуз, 5. село Биченег Шахбузского района, 6. г. Ордубад, 7. село Агдере Ордубадского района

Нами был проведен зонирование ветрового потенциала на территории Нахчыванской АР (рис.4.):

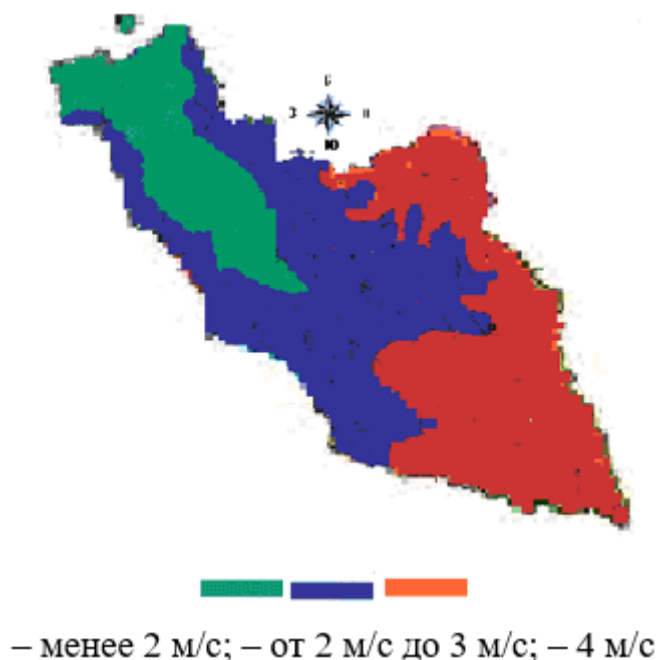


Рисунок 4. Зоны ветрового потенциала Нахчыванской котловины

В узких долинах на шероховатом участке рельефа, вследствие трения возникают сильные завихрения и скорость ветра существенно уменьшается (г. Джульфа, Батабат Шахбузского р-н; Агдере Ордубадский р-н).

При проникновении ветра в ущелье увеличение высоты ущелья с 15 метра до 30 метра приводит к уменьшению скорости ветра на 3 м/с.

Средняя мощность воздушного потока, проходящего через ширину ущелья в определенное время находим по формуле:

$$W = \frac{\rho \cdot V^3 \cdot F}{2}$$

Где: ρ – плотность воздуха;

F – площадь поперечного сечения ущелья м^2 ;

V – скорость воздушного потока, м/с.

Во всем мире стандартом энергии ветра принято данные Датской ассоциации. Исходя из этого, нами были рассчитаны значения энергии ветра для районов Нахчыванской котловины [3] таблица 2

Таблица 2.

Значения энергии ветра в районах Нахчыванской котловины:

Средне - годовой скорость ветра	Стандарт	Бабекский район	Джульфинский район	Шахбузский район	Ордубадский район	Шарурский район
м/с	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²
1	1	0,6	0,54	0,5	0,5	0,6
3	17	15,5	14,5	14	13	16

В Нахчыванской котловине в зависимости от географических условий происходят процессы формирования, развитие порывов ветра.

Порывами ветра являются мощные локализованные вертикальные колонны ветра, которые случаются при очень быстром охлаждении и опускании воздуха к земле. Порыв ветра образуется из-за стекающего вниз по склону более холодного и плотного воздуха, который ниже соприкасается более теплым, менее плотным воздухом [4,12].

Длительность порывов ветра (τ), при (n) количестве определяется по формуле:

$$\tau = \Delta \tau \cdot \sum D(t)$$

Где: τ – длительность порыва ветра;

i – номер один из выбранных порывов ветра;

Δt – интервал времени между двумя порывами;

D(t) – вспомогательный сигнал.

Летом (июль, август) в горах (Шахбузский, Джульфинский и Ордубадские р-ны) после 17-и часов в течении 10–15 минут наблюдаются сильные и резкие порывы ветра с ливневыми осадками и грозами.

Эти ветры в народе называют «карайел», (чёрный ветер). При скорости более 30 – 35 м/с, этот ветер сносит плохо закреплённые конструкции, крыши домов, ломают деревья.

В результате проведенных нами исследований (июль, август 2025 г.) выяснилось, что порывы ветра в Нахчыванской котловине возникают высоко в горах (горы Батабат Шахбузского р-на, горы Лекетаг Джульфинского р-на, горы Агдере Ордубадского р-на), с зоной распространения диаметром от 0,5 до 1 км.

Проведенные нами исследование показали что, при повышении температуры воздуха +35⁰С и выше (температура воздуха измерялось с 10⁰⁰ по 18⁰⁰ часов) в горах накапливаются облака и происходит порыв ветра с грозовым дождями, создающие на поверхности земли ветер разрушительной силы.

Порывы ветра сопровождаются грозовым ливнем и с вихревыми движениями. Вследствие нисходящего движения по склону извилистых горных хребтов движение порыва ветра в Нахчыванской котловине имеет извилистую форму.

Обычно эти сильные кратковременные порывы ветра с грозовыми дождями, происходили, после 17 часов в горных местах. При температуре воздуха +30⁰С и ниже порывы ветра не наблюдалось (Табл. 3,):.

Эти локальные вихревые порывы ветра (по Азербайджанский «бурулган») представляют с собой опасные явление. Облачный столб с диаметром 300 – 400 м., опускается на земную поверхность воронкообразным сужением и из земной поверхности поднимает пыли, создает вертикальные завихрения и кругами распространяется по поверхности земли со скоростью ветра 25 – 35 м/с и на пути своего движения вызывает разрушения [7]:

Таблица 3.

Частота порывов ветра в Нахчыванской котловине (июль, август 2025)

Июль	Средняя температура воздуха (°C) (с 10 ⁰⁰ по 18 ⁰⁰ час)	Примечание
1	26,4 ⁰ C	
2	27,4 ⁰ C	
3	31,1 ⁰ C	
4	32,4 ⁰ C	
5	33 ⁰ C	
6	33 ⁰ C	
7	35 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Джульфинский р-н)
8	33 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Ордубадский р-н)
9	32,5 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Шахбузский р-н)
10	29 ⁰ C	
11	35 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (г.Нахчыван, Шахбузский р-н)
12	36 ⁰ C	
13	36,5 ⁰ C	
14	35,5 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Орвгбадский р-н, Джульфинский р-н)
15	34 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Шахбузский р-н)
16	35 ⁰ C	Сухой порыв ветра в горах (Шахбузский, Джульфинский р-н)
17	35 ⁰ C	
18	36 ⁰ C	
19	36,5 ⁰ C	
20	35,5 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Орвгбадский р-н, Джульфинский р-н)
21	36,4 ⁰ C	
22	38 ⁰ C	
23	37,5 ⁰ C	
24	36,4 ⁰ C	
25	36,5 ⁰ C	
26	34,5 ⁰ C	Сухой порыв ветра в горах (Шахбузский р-н)
27	34 ⁰ C	
28	33,5 ⁰ C	Порыв ветра с сильными ливневыми дождями и с грозой, (г.Нахчыване и в горах Джульфинский р-н)
29	30,5 ⁰ C	
30	38,5 ⁰ C	
31	40 ⁰ C	
Август	Средняя температура воздуха (°C) (с 10 ⁰⁰ по 18 ⁰⁰ час)	Примечание
1	39 ⁰ C	

Июль	Средняя температура воздуха (°C) (с 10 ⁰⁰ по 18 ⁰⁰ час)	Примечание
2	37,5 ⁰ C	
3	38 ⁰ C	Порыв ветра с сильными ливневыми дождями и с грозой, (Джульфинский р-н)
4	35 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Ордубадский р-н)
5	34,5 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Шахбузский р-н)
6	30 ⁰ C	
7	31 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Джульфинский и Ордубадский р-н)
8	27 ⁰ C	
9	29 ⁰ C	
10	31 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Джульфинский и Шахбузский р-н)
11	31 ⁰ C	
12	32 ⁰ C	
13	32,5 ⁰ C	
14	33,5 ⁰ C	
15	36 ⁰ C	
16	37 ⁰ C	
17	35,5 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Джульфинский и Шахбузский р-н)
18	33,5 ⁰ C	
19	35,5 ⁰ C	
20	36,4 ⁰ C	
21	35,5 ⁰ C	
22	38 ⁰ C	
23	38 ⁰ C	
24	36,5 ⁰ C	
25	31 ⁰ C	Порыв ветра с сильными ливневыми дождями и с сильным грозой в горах
26	35 ⁰ C	
27	33 ⁰ C	
28	31 ⁰ C	
29	34 ⁰ C	Порыв ветра с ливневым дождем и с грозой в горах, (Ордубадский р-н)
30	32 ⁰ C	
31	29 ⁰ C	

Эти порывы ветра обладают большой разрушающей силой и возникают на короткое время. Такие порывы ветра сносят плохо закреплённые конструкции, ломает деревья, вызывает обрыв линий электропередач и могут полностью уничтожить строение, разрушать дома.

Результаты

Ветровое давление на конструкцию (W_0) определяется по формуле:

$$W_0 = 0,61 \nu_0^2$$

Где: ν_0 – скорость ветра, для Нахчыванской котловины $w_0 = 48$ кгс/м².

Приведённые нами исследования в Нахчыванской котловине показали что, при давлении ветра воздушный поток сталкивается со стеной высотной конструкций или сооружения и у стены сооружения происходит завихрение потока [4,11].

При исследовании ветрового воздействия на башенные сооружения учитывается и воздействие порывов ветра на башенные сооружение. Так как при воздействии порывов ветра при обтекании конструкцию, возникает избыточное давление. При определении сопротивление конструкции этому давлению в расчетах надо учитывать это избыточное давление.

В зависимости от формы конструкций, давление ветрового потока (W_v) на конструкцию определяется по формуле:

$$W_v = q_h \cdot C_e \cdot C_{vd}$$

Где: q_h – значение ветрового давления;

C_e – коэффициент, учитывающий высоту, форму конструкции и рельефа местности;

C_{vd} – коэффициент внешнего давления на конструкции.

– для низких конструкций с площадью 10м² с наветренной стороны $C_{vd} = 0,6$; с подветренной стороны $C_{vd} = 0,3$.

– для высоких конструкций с площадью 10м², с наветренной стороны $C_{vd} = 0,8$; с подветренной стороны $C_{vd} = 0,3$.

В связи с тем, что на территории Нахчыванской Автономной Республике направление ветра часто меняется, то при расчетах давления на башенные конструкции и сооружения, расчеты надо проводить с учетом направлений ветра.

Выводы

В результате проведенных нами научных исследований были рассмотрены зигзагообразные движения горно-долинных и порывов ветров в Нахчыванской котловине. Рассмотрены особенности этих ветров в зависимости от сложных географических особенностей Нахчыванской котловины.

Анализировано динамика скорости этих ветров при зигзагообразном обтекании через горных ущелий и узких проходов и влияние этих потер на характеристику ветрового потока.

Были выяснены, что окружающие горы и горы внутри котловины оказывают тормозящее действие на движение ветров и способствуют изменению направления и скорости ветра. На скорость ветра также оказывают влияние изрезанность и характер рельефа, формы склонов.

Рассмотрены особенности порывов ветра в зависимости от рельефа местности и географической особенности.

Анализируется динамика возникновения порывов ветра и их негативные последствия. Определены интенсивность возникновения порывов в зависимости от теплового баланса Нахчыванской котловины.

В результате проведенных нами исследований (июль, август 2022г) выяснилось, что порывы ветра в Нахчыванской котловине возникают высоко в горах Батабат Шахбузского р-на, Лекетаг Джульфинского р-на, Агдере Ордубадского р-на.

Они продолжаются 15 – 20 мин, с зоной распространения диаметром от 0,5 до 1 км. Поток нисходящего из грозового облака воздуха (от 25 м/с, до 35 м/с).

Исследованы воздействие порывов ветра на башенные сооружения и конструкции. В результате проведенных нами исследований выяснилось, что при воздействии порывов ветра, возникает избыточное давление на конструкцию

Список литературы

1. Андрейчик, М.Ф. Диагностика удельного экологического потенциала приземного слоя воздуха котловины / М.Ф. Андрейчик, С.А. Чупикова. – Москва, 2021. – С. 117.
2. Баденков, Ю.П. Устойчивое развитие горных территорий / Ю.П. Баденков // Известия РАН. – 1999. – № 6. – С. 7–21.
3. Васильев, Ю.С. Экология использования возобновляющихся энергоисточников / Ю.С. Васильев, Н.И. Хрисанов. – Москва, 2011. – С. 37–61.
4. Горохов, Е.В. Аэродинамика высотных конструкций / Е.В. Горохов, М.И. Казакевич, С.Н. Шаповалов, Я.В. Назим. – Донецк. – 2000. – 336 с.
5. Горшков, В.Г. Сила ветра в земной атмосфере / В.Г. Горшков, А.М. Макарьева; Российская академия наук, Петербургский институт ядерной физики. – 2008. – 21 с.
6. Егорина, А.В. Барьерный фактор в развитии природной среды гор / А.В. Егорина. – Горно-Алтайск, 2021. – С. 114–143.
7. Лешуков, Т.В. Оценка загрязнённости и самоочищающейся способности атмосферы / Т.В. Лешуков, Ю.В. Лесин. – С. 34–47. – 2020.
8. Лукутин, Б.В. Возобновляемые источники энергии / Б.В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.
9. Попов, А.М. О турбулентном переносе в слое шероховатости / А.М. Попов // Физика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 12. – С. 1095–1097.
10. Рзаев, О.А. Глубинная структура и тектонические особенности Нахчыванской котловины / О.А. Рзаев. – Баку. – 2015. – 33 с.
11. Савицкий, Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г.А. Савицкий. С. 34–75. – Москва: Стройиздат, 1998.
12. Сухова, М.Г. Климатические условия формирования межгорно-котловинных и горно-долинных ландшафтов Алтая / М.Г. Сухова, Е.О. Гармс. – С. 176–194. – 2012.
13. Физическая география Нахчыванской Автономной Республики. В 2 т. Т. 1. – Нахчыван, 2017. – 456 с.
14. Фрик, П.Г. Турбулентность и сдвиг ветра / П.Г. Фрик. – 2003. – 292 с.

References

1. Andreichik M.F., Chupikova S.A. Diagnostics of the Specific Environmental Potential of the Surface Air Layer of a Basin. Moscow, Russian Federation, 2021, P. 117.
2. Badenkov Yu.P. Sustainable Development of Mountain Territories. Moscow, Russian Federation, Proceedings of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya RAS), 1999, No. 6, P. 7–21.
3. Vasilyev Yu.S., Khrisanov N.I. Ecology of the Use of Renewable Energy Sources. Moscow, Russian Federation, 2011, P. 37–61.
4. Gorokhov E.V., Kazakevich M.I., Shapovalov S.N., Nazim Ya.V. Aerodynamics of High-Rise Structures. Donetsk, 2000, P. 336.
5. Gorshkov V.G., Makaryeva A.M. The Force of Wind in the Earth's Atmosphere. Russian Academy of Sciences, Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, 2008, P. 21.
6. Egorina A.V. The Barrier Factor in the Development of Mountain Natural Environment. Gorno-Altaysk, 2021, P. 114–143.
7. Leshukov T.V., Lesin Yu.V. Assessment of Atmospheric Pollution and the Atmosphere's Self-Purification Capacity. 2020, P. 34–47.
8. Lukutin B.V. Renewable Energy Sources. P. 187. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2008.
9. Popov A.M. On Turbulent Transport in the Roughness Layer. Physics of the Atmosphere and Ocean, Moscow, 2006, Vol. 12, P. 1095–1097.
10. Rzayev O.A. Deep Structure and Tectonic Features of the Nakhchivan Basin. Baku, 2015, P. 33.
11. Savitsky G.A. Wind Load on Structures. P. 34–75. – Moscow: Stroyizdat, 1998.
12. Sukhova M.G., Harms E.O. Climatic Conditions for the Formation of Intermountain Basin and Mountain-Valley Landscapes of Altai. 2012, P. 176–194.
13. Physical Geography of the Nakhchivan Autonomous Republic. Vol. I. Nakhchivan, 2017.
14. Frik P.G. Turbulence and Wind Shear. 2003, P. 292.

УДК 621.311.24:621.313.33

Математическое моделирование и исследование векторного управления ветроэнергетической системой на основе асинхронного генератора двойного питания**Туйчиев Фуркат Нумонович**

PhD

доц. кафедры Электроснабжение, Ташкентский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: tuychievfn@gmail.com

Рашидов Нурали Хайриддинович

докторант

Ташкентский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Абдухалилов Абдуманнон Гайратжон угли

докторант

Ташкентский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Mathematical modeling and investigation of vector control of a wind energy system based on a doubly fed induction generator**Tuychiev Furqat Numonovich**

PhD, Associate Professor

Department of Electrical Supply, Tashkent State Technical University

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Rashidov Nurali Khayriddinovich

Doctoral Student

Tashkent State Technical University

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Abdukhalilov Abdumannop Gayratjon ugli

Doctoral Student

Tashkent State Technical University

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В работе разработана и исследована математическая модель сетевой ветроэнергетической системы номинальной мощностью 2 МВт на основе асинхронного генератора двойного питания (АГДП) с переменной скоростью вращения. Цель исследования состоит в оценке динамической устойчивости и качества регулирования при ступенчатом изменении скорости ветра. Методика включает совместное моделирование аэродинамической модели турбины, электромагнитной модели АГДП в синхронной системе

Библиографическое описание: Туйчиев Ф.Н., Рашидов Н.Х., Абдухалилов А.Г.У. Математическое моделирование и исследование векторного управления ветроэнергетической системой на основе асинхронного генератора двойного питания // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/23314>

координат dq и двухконтурной векторной системы управления роторным и сетевым преобразователями в MATLAB/Simulink. Исследованы скорость ротора, статорные и роторные токи, активная мощность и электромагнитный момент при изменении скорости ветра от 7 до 12 м/с. При 12 м/с амплитуда статорного тока достигает ± 2440 А, действующее значение - около 1,72 кА, роторного тока ± 805 А. Максимальная активная мощность статора достигает 2 МВт, электромагнитный момент отслеживает заданное значение с небольшими пульсациями. Коэффициент общих гармонических искажений статорного тока составляет 0,87 %. Результаты подтверждают работоспособность разработанной структуры управления и возможность её применения для дальнейшего анализа режимов сетевых ветроэнергетических установок на основе АГДП.

Abstract

A mathematical model of a 2 MW grid-connected wind energy system based on a doubly fed induction generator (DFIG) with variable-speed operation is developed and investigated. The objective is to evaluate dynamic stability and control performance under stepwise wind-speed variations. The methodology combines an aerodynamic wind-turbine model, an electromagnetic DFIG model in a synchronous dq reference frame, and a dual-loop vector-control system for the rotor-side and grid-side converters implemented in MATLAB/Simulink. The transient behavior of rotor speed, stator and rotor currents, active power, and electromagnetic torque is analyzed for wind speeds from 7 to 12 m/s. At 12 m/s, the stator-current amplitude reaches approximately ± 2440 A, corresponding to an RMS value of about 1.72 kA, while the rotor-current amplitude reaches about ± 805 A. The maximum stator active power is approximately 2 MW, and the electromagnetic torque follows its reference with small oscillations. The total harmonic distortion of the stator current is 0.87 %. The results confirm the operability of the proposed control structure and its suitability for further studies of grid-connected DFIG wind energy systems.

Ключевые слова: асинхронный генератор двойного питания, ветровая турбина, ветроэнергетическая система, MATLAB/Simulink, математическое моделирование, векторное управление, роторный преобразователь, сетевой преобразователь.

Keywords: doubly fed induction generator, wind turbine, wind energy system, MATLAB/Simulink, mathematical modeling, vector control, rotor-side converter, grid-side converter.

Введение

Энергия является одним из ключевых факторов технологического и социально-экономического развития. Рост промышленного производства и потребления электроэнергии, а также ограниченность ископаемых ресурсов обуславливают необходимость развития возобновляемой энергетики. Особое значение приобретают ветровая и солнечная энергетика, позволяющие увеличить производство экологически чистой электроэнергии и снизить негативное воздействие на окружающую среду [3, 5, 8].

Ветроэнергетика является одним из наиболее динамично развивающихся направлений возобновляемой энергетики. По данным Глобального совета по ветроэнергетике (GWEC), в 2025 году в мире было введено 165 ГВт новых ветровых мощностей, а суммарная установленная мощность достигла 1299 ГВт [6]. Это подтверждает возрастающую роль ветроэнергетических установок в современной энергетической системе.

Развитие силовой электроники и систем управления способствовало переходу от ветроустановок с постоянной скоростью вращения к системам с регулируемой скоростью. Среди применяемых электрических машин особое место занимает асинхронный генератор двойного питания (АГДП), обеспечивающий регулирование скорости в широком диапазоне при относительно небольшой мощности силового преобразователя [1, 4].

Ветроэнергетическая система на основе АГДП включает ветровую турбину, генератор, роторный и сетевой преобразователи, звено постоянного тока, систему управления и электрическую сеть. Статор генератора непосредственно подключается к сети, а ротор – через двунаправленный преобразователь. Такая структура обеспечивает независимое регулирование активной и реактивной мощностей и позволяет работать как в подсинхронном, так и в сверхсинхронном режимах [7, 9]. Применение преобразователей и алгоритмов МРРТ позволяет изменять скорость вращения генератора в зависимости от скорости ветра, повышая эффективность преобразования энергии и снижая механические нагрузки [10]. Несмотря на значительное количество исследований, актуальной остаётся задача комплексного моделирования аэродинамической и электромеханической частей АГДП с системой векторного управления при изменяющейся скорости ветра.

Целью настоящей работы является разработка математической модели и исследование динамических характеристик ветроэнергетической системы мощностью 2 МВт на основе АГДП с векторным управлением при изменении скорости ветра.

Материалы и методы

Исследуемая система рассматривается как взаимосвязанная электромеханическая структура, в которой аэродинамическая мощность турбины преобразуется в механический момент, передаваемый через механическую передачу на вал АГДП. Статор генератора непосредственно связан с сетью, а ротор – с роторным преобразователем (RSC). Роторный преобразователь и сетевой преобразователь (GSC) объединены общим звеном постоянного тока. В состав модели также включены роторный и сетевой фильтры, МРРТ-контроллер и конденсатор звена постоянного тока. Структурная схема системы приведена на рисунке 1.

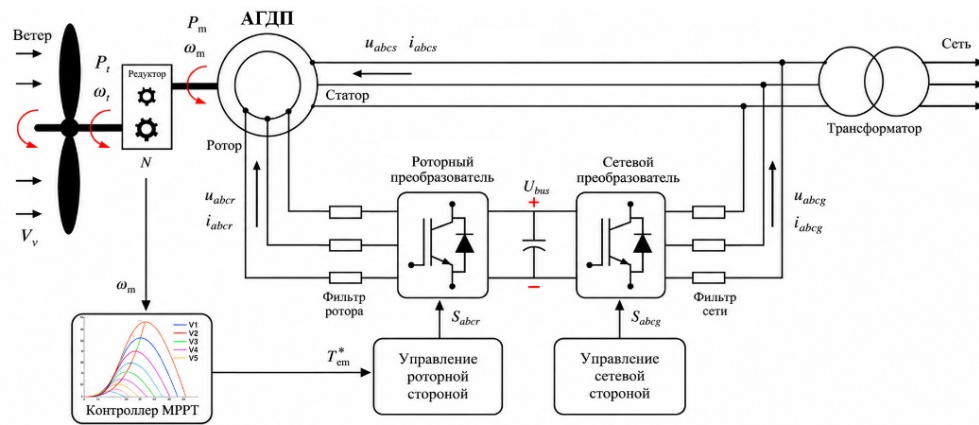


Рисунок 1. Структурная схема ветроэнергетической установки

Модель ветровой турбины

Кинетическая мощность воздушного потока определяется плотностью воздуха, площадью ометания и кубом скорости ветра. Для идеализированного потока она рассчитывается по выражению:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V_v^3 \quad (1)$$

где A -площадь, ометаемая лопастями турбины, м^2 ; ρ -плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; V_v -скорость ветра, $\text{м}/\text{с}$.

Механическая мощность, извлекаемая турбиной, учитывает коэффициент использования энергии ветра:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

где R -радиус ротора турбины, м ; $C_p(\lambda, \beta)$ -коэффициент использования энергии ветра; λ -быстроходность турбины, представляющая собой отношение линейной скорости конца лопасти к скорости ветра; β -угол поворота лопасти:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{\frac{-c_7}{\lambda_i}} \quad (3)$$

Для описания аэродинамической характеристики использована аппроксимация $C_p(\lambda, \beta)$ с коэффициентами $c_1=0,73$; $c_2=151$; $c_3=0,58$; $c_4=0,002$; $c_5=2,4$; $c_6=13,2$; $c_7=18,4$. Для рассматриваемой турбины при $\beta=0^\circ$ максимальный коэффициент мощности составляет $C_{p,\max}=0,44$ и достигается при $\lambda=7,2$.

Быстроходность связывает механическую скорость ротора с аэродинамическим режимом и выступает одним из основных параметров оптимизации отбора мощности:

$$\lambda = \frac{R \omega_t}{V_v} \quad (3)$$

где ω_t -угловая скорость вращения ротора ветровой турбины, рад/с.

Механический момент турбины определяется отношением механической мощности к угловой скорости:

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} \quad (4)$$

Математическая модель ветровой турбины позволяет установить взаимосвязь между скоростью ветра, угловой скоростью вращения, коэффициентом мощности и механическим моментом.

Математическая модель АГДП

В динамической модели АГДП трёхфазные величины статора и ротора преобразуются в синхронную систему координат dq, ориентированную по потокоцеплению статора. Применение преобразований $abc \rightarrow \alpha\beta \rightarrow dq$ уменьшает число независимых переменных и позволяет представить электромагнитные процессы в форме, удобной для синтеза регуляторов. При этом скорость вращения системы координат определяется частотой сети, а относительная частота роторных величин зависит от скольжения генератора:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs}; \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds}; \end{cases} \begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_r \psi_{qr}; \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr}. \end{cases} \quad (5)$$

где $u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}$ -соответственно составляющие напряжений статора и ротора по осям d и q; $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ -соответственно составляющие токов статора и ротора по осям d и q; где $\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi_{dr}, \psi_{qr}$ -соответственно составляющие потокоцеплений статора и ротора по осям d и q. R_s, R_r -фазные сопротивления обмоток статора и ротора; ω_s, ω_r -угловые скорости вращения магнитного поля статора и ротора соответственно.

Потокоцепления определяются через индуктивности рассеяния и взаимную индуктивность:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}; \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}. \end{cases} \begin{cases} \psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr}; \\ \psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr}. \end{cases} \quad (6)$$

где ψ_s, ψ_r -соответственно векторы потокоцепления статора и ротора; ψ_{ds}, ψ_{qs} -составляющие потокоцепления статора по осям dq; ψ_{dr}, ψ_{qr} -составляющие потокоцепления ротора по осям dq; L_s, L_r -соответственно индуктивности рассеяния фазных обмоток статора и ротора; L_m -взаимная индуктивность между статором и ротором; p-число пар полюсов генератора.

Электромагнитный момент генератора определяется следующим выражением:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\psi_{qs} i_{dr} - \psi_{ds} i_{qr}) \quad (7)$$

Активная и реактивная мощности статора определяются уравнениями:

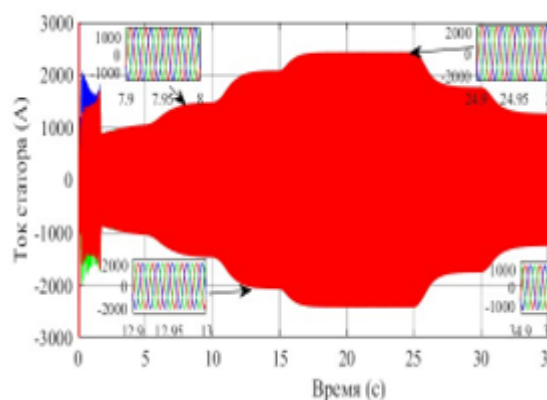


Рисунок 4. Изменение тока статора АГДП

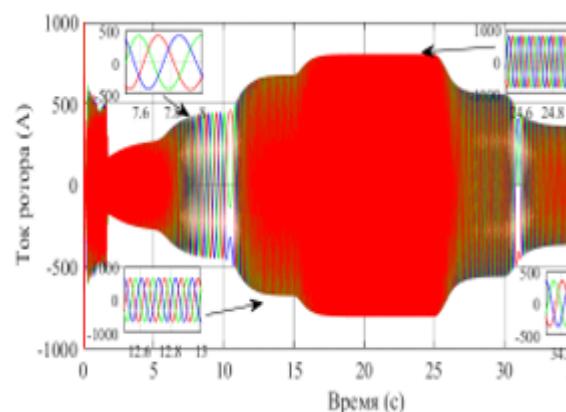


Рисунок 5. Изменение тока ротора АГДП

На рисунке 6 представлена динамика активной мощности статора АГДП во времени. В начальный момент (0-2 с) наблюдаются выраженные переходные колебания мощности, связанные с запуском и установлением рабочего режима. После этого мощность постепенно увеличивается: к 9,3 с достигает около 0,83 МВт, а к 14,4 с – 1,54 МВт. В диапазоне 18-25 с активная мощность стабилизируется и достигает максимального значения около 2 МВт.

На рисунке 7 представлено сравнение эталонного и фактического электромагнитного момента генератора АГДП при переменной скорости ветра. После переходного процесса фактический момент быстро отслеживает эталонный. В интервалах 6 – 15 с момент изменяется от -7000 до -10500 Н·м, а в диапазоне 16 – 25 с достигает примерно -12500 Н·м.

Качество электрической энергии оценено по коэффициенту общих гармонических искажений (THD) статорного тока в диапазоне 0-1 кГц относительно основной частоты 50 Гц. Полученное значение THD составляет 0,87 %. Низкий уровень искажений указывает на близкую к синусоидальной форму статорного тока и корректное формирование токовых управляющих воздействий.

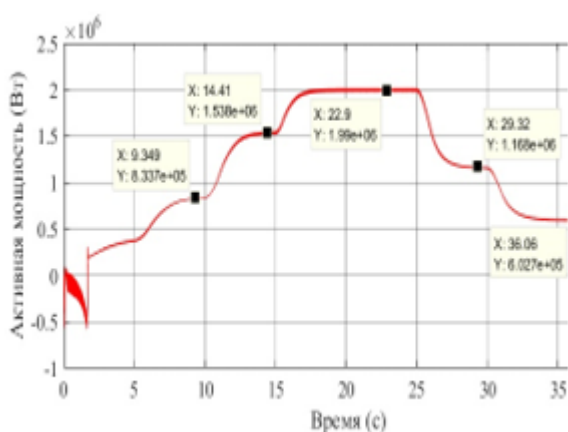


Рисунок 6. Изменение активной мощности

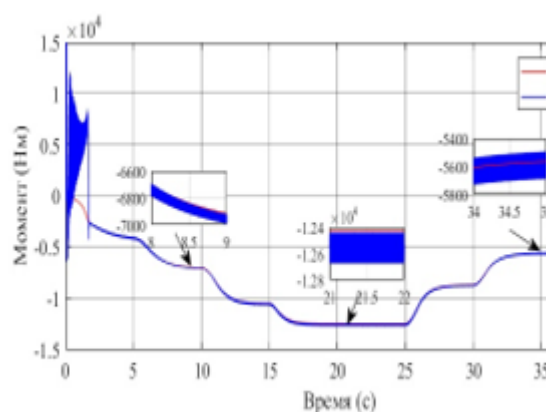


Рисунок 7. Сравнение эталонного и фактического электромагнитного момента

В совокупности с устойчивой динамикой мощности и момента этот показатель характеризует приемлемое качество работы сетевой ветроэнергетической системы в исследуемом режиме.

Заключение

В работе разработана и исследована математическая модель ветроэнергетической системы мощностью 2 МВт на основе АГДП с векторным управлением. Результаты моделирования при изменении скорости ветра 7-12 м/с показали устойчивую работу системы и эффективное регулирование активной мощности и электромагнитного момента. В номинальном режиме мощность достигает около 2 МВт, электромагнитный момент - 12,7 кН·м, а амплитуда статорного тока составляет около 2440 А. Полученное значение THD статорного тока 0,87 % свидетельствует о высоком качестве электрической энергии. В целом результаты подтверждают корректность разработанной модели и эффективность выбранной структуры векторного управления при переменной скорости ветра.

Список литературы

1. Abad, G. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation / G. Abad, J. Lopez, M.A. Rodriguez, L. Marroyo, G. Iwanski. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. – 640 P.
2. Abad, G. Direct power control of doubly-fed induction generator-based wind turbines under unbalanced grid voltage / G. Abad, M.A. Rodriguez, G. Iwanski, J. Poza // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. – № 2. – P. 442–452. – DOI: 10.1109/TPEL.2009.2027438.
3. Ahmad, T. Renewable energy in the 21st century: A review of wind and solar energy / T. Ahmad, D. Zhang, D. Huang, H. Zhang, N. Dai // Energy Reports. – 2021. – P. 6939–6953.
4. Carlin, P.W. The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology / P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi // Wind Energy. – 2003. – № 2. – P. 129–159. – DOI: 10.1002/we.77.
5. Chhipa, A.A. Role of Power Electronics and Optimization Techniques in Renewable Energy Systems / A.A. Chhipa, S. Vyas, V. Kumar, R.R. Joshi // Intelligent Algorithms for Analysis and Control of Dynamical Systems. – 2021. – P. 167–175. – DOI: 10.1007/978-981-15-8045-1_17.
6. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2025: Record Installations Amid Policy Instability. – Brussels: Global Wind Energy Council, 2025.
7. Hansen, A.D. Control of Variable Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators / A.D. Hansen, P. Sorensen, F. Iov, F. Blaabjerg // Wind Engineering. – 2004. – № 4. – P. 411–432. – DOI: 10.1260/0309524042886441.
8. Qazi, A. Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions / A. Qazi, F. Hussain, N.A. B.D. Rahim, G. Hardaker, D. Alghazzawi, K. Shaban, K. Haruna // IEEE Access. – 2019. – P. 63837–63851. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2906402.

-
9. Rezaei, E. Dynamic Model and Control of DFIG Wind Energy Systems Based on Power Transfer Matrix / E. Rezaei, A. Tabesh, M. Ebrahimi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – № 3. – P. 1485–1493.

ТРАНСПОРТ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Статья поступила в редакцию: 28.07.2026

Статья принята к публикации: 01.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 622.8+004.9

Сравнительный анализ и направления автоматизации расчёта параметров анкерной крепи горных выработок

Жалбыров Жанибек Даулетханович

инженер, магистр технических наук, главный инженер
Товарищества с ограниченной ответственностью Karaganda Komir
Республика Казахстан, г. Караганда

Рахматуллаев Рустам Рахимович

инженер, магистр технических наук, начальник
отдела геопрогноза и геомеханики Акционерного общества Qarmet
Республика Казахстан, г. Темиртау

Ефанин Максим Викторович

инженер, магистр технических наук, главный технолог
шахты имени И.А. Костенко Товарищества с ограниченной ответственностью Karaganda
Komir

Республика Казахстан, г. Караганда

Джусупов Нурбол Даулетханович

мл. науч. сотр., магистр технических наук, ассистент
кафедры Разработка месторождений полезных ископаемых Некоммерческого акционерного
общества Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова
Республика Казахстан, г. Караганда

E-mail: shulepin_an@mail.ru

Comparative analysis and directions of automation of calculation of parameters of anchor support of mining workings

Zhalbyrov Zhanibek Dauletkhanovich

Engineer, Master of Technical Sciences, Chief Engineer of Limited Liability Partnership
'Karaganda Komir'
Republic of Kazakhstan, Karaganda

Rakhmatullaev Rustam Rakhimovich

Engineer, Master of Technical Sciences, Head of the Department of Geo-forecasting and
Geomechanics of Joint Stock Company 'Qarmet'
Republic of Kazakhstan, Temirtau

Efanin Maksim Viktorovich

Engineer, Master of Technical Sciences, Chief Technologist of I.A. Kostenko Mine of Limited
Liability Partnership 'Karaganda Komir'
Republic of Kazakhstan, Karaganda

Dzhusupov Nurbol Dauletkhanovich

Junior Researcher
master of Technical Sciences, Assistant of the Department 'Mining of Mineral Deposits' of Non-
commercial Joint Stock Company 'Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov'
Republic of Kazakhstan, Karaganda

Аннотация

В статье представлен сравнительный анализ нормативного, программно-аналитического, численного и мониторингового подходов к определению параметров анкерной крепи горных выработок. Цель исследования состоит в обосновании структуры автоматизированного расчёта, позволяющего учитывать геометрию выработки, глубину разработки, прочностные и структурные характеристики массива, соотношение горизонтальных и вертикальных напряжений, зоны повышенного горного давления и прогнозируемые деформации контура. В качестве методов использованы сопоставление действующей нормативной методики с программной проверкой Conversys, анализ возможностей численного моделирования и обобщение принципов геомеханического мониторинга. Установлено, что ручной расчёт обеспечивает назначение базовой плотности крепления, однако ограниченно отражает влияние трещиноватости, межслоевых контактов, направления проведения выработки и изменения напряжённого состояния при приближении очистного фронта. Предложен алгоритм, включающий контроль полноты исходных данных, расчёт напряжений и индекса прочности кровли, определение высоты и массы потенциальной зоны разрушения, подбор длины, шага и несущей способности анкеров, а также проверку схемы по критериям разрыва, выдергивания и податливости. Практическая значимость решения заключается в возможности оперативного сравнения вариантов крепления и корректировки паспорта по результатам измерений конвергенции, пучения почвы и нагрузок в анкерах. Применение алгоритма повышает обоснованность выбора одноуровневой, двухуровневой или комбинированной крепи.

Abstract

The article presents a comparative analysis of regulatory, software-based analytical, numerical, and monitoring approaches to determining rock-bolting parameters for underground mine workings. The purpose of the study is to substantiate the structure of an automated calculation procedure that accounts for roadway geometry, mining depth, strength and structural characteristics of the rock mass, the ratio of horizontal to vertical stresses, zones of increased rock pressure, and predicted contour deformation. The methods include comparison of the current regulatory procedure with the Conversys software verification approach, assessment of numerical modelling capabilities, and generalization of geomechanical monitoring principles. Manual calculations were found to provide a basic support density, but to reflect only to a limited extent the effects of fracturing, bedding contacts, roadway orientation, and stress redistribution near the approaching extraction front. An algorithm is proposed that includes validation of input data, calculation of stresses and the roof strength index, determination of the height and weight of the potential failure zone, selection of bolt length, spacing, and load-bearing capacity, and verification against tensile failure, pull-out, and deformation criteria. The practical significance of the proposed approach lies

Библиографическое описание: Сравнительный анализ и направления автоматизации расчёта параметров анкерной крепи горных выработок // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Жалбыров Ж.Д. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23287>

in enabling rapid comparison of support alternatives and adjustment of the support plan using measurements of convergence, floor heave, and bolt loading. Its application improves the justification for selecting single-level, two-level, or combined support systems.

Ключевые слова: анкерная крепь, горная выработка, автоматизированный расчёт, геомеханика, зона разрушения, конвергенция, мониторинг.

Keywords: anchor support, underground workings, automated calculation, geomechanics, destruction zone, convergence, monitoring.

Введение

Увеличение глубины разработки угольных месторождений сопровождается ростом напряжений и усложнением деформирования приконтурного массива. Для слоистых пород Карагандинского угольного бассейна устойчивость кровли определяется не только пределом прочности при сжатии, но и трещиноватостью, мощностью слабых прослоев, обводнённостью, направлением проведения выработки и влиянием очистных работ. При глубинах 600–1000 м изменение одного из этих факторов способно увеличить зону неупругих деформаций и сделать типовой паспорт крепления недостаточным [8, с. 54–61; 9, с. 1475–1490].

Анкерная крепь формирует в кровле армированный грузонесущий слой. Её работоспособность зависит от согласованного выбора длины анкеров, глубины закрепления, шага установки, несущей способности и податливости. Недостаточная длина приводит к закреплению внутри разрушенной области, а простое увеличение количества анкеров не исключает вторичного сводообразования. Поэтому расчёт должен определять не только плотность крепления, но и положение устойчивого слоя, массу потенциально неустойчивого блока и запас системы «анкер - закрепляющий материал - массив».

Цель работы - обосновать структуру автоматизированного расчёта параметров анкерной крепи на основе сопоставления существующих инженерных методов.

Материалы и методы

Сопоставлены расчёт по действующим инструкциям, программная проверка Conversys, численное моделирование и проектирование по данным геомеханического мониторинга. Полнота метода оценивалась по учёту геометрии и глубины выработки, прочности кровли, почвы и боков, трещиноватости, коэффициента бокового давления, зон повышенного горного давления, характеристик анкеров и прогнозируемых деформаций. Для формализованной оценки структурного состояния массива дополнительно учитываются принципы классификаций RMR, Q и CMRR, позволяющие связать трещиноватость и качество кровли с выбором системы поддержания [2, 3, 7].

Для первичной оценки принимаются вертикальное напряжение $\sigma_v = \gamma H$ и коэффициент бокового давления $K = \sigma_h / \sigma_v$. Отношение прочности кровли к вертикальному напряжению выражается индексом $I_r = \sigma_c / \sigma_v$. Снижение I_r и рост K увеличивают размеры зоны разрушения. Расчётная длина анкера определяется как $L_a = h_f + l_z$, где h_f – высота

нарушенной зоны, l_z – длина закрепления в устойчивом слое. Требуемое количество анкеров проверяется условием $n \geq G_f / (R_a \eta)$, где G_f – вес неустойчивых пород на один погонный метр, R_a – расчётная несущая способность анкера, η – коэффициент условий работы.

Результаты исследования

Главное различие между нормативной методикой и Conversys состоит в логике проектирования. В ручном расчёте плотность анкеров определяется по исходным условиям. В программе проектировщик задаёт предполагаемую схему, после чего система проверяет её работоспособность. Программная проверка учитывает большее число факторов и позволяет быстро сравнивать варианты без повторения всех операций вручную.

Таблица 1.

Сравнение подходов к расчёту анкерной крепи

Критерий	Нормативный расчёт	Программная проверка
Трещиноватость и расстояние между отдельностями	Учитываются укрупнённо	Вводятся отдельными параметрами
Горизонтальные напряжения и направление проходки	Учитываются ограниченно	Учитываются непосредственно
Зоны повышенного давления и нарушения	Вводятся поправочными коэффициентами	Проверяются по отдельным сценариям
Плотность анкеров	Определяется расчётом	Задаётся и проверяется
Податливость и запас анкера	Оцениваются по типовым данным	Проверяются расчётно
Конвергенция и остаточное сечение	Как правило, не прогнозируются	Выдаются как результат

Автоматизация требует контроля достоверности исходных данных. Для каждого параметра необходимо фиксировать источник: лабораторное испытание, геологическое описание, инструментальное измерение или экспертную оценку. При отсутствии обязательного значения либо выходе за допустимый диапазон программа должна блокировать расчёт и формировать перечень уточнений. Это снижает риск получения формально точного, но геомеханически необоснованного результата.

Численные модели позволяют определять пластические зоны, раскрытие трещин, сдвиг по межслоевым контактам и изменение состояния выработки при приближении очистного фронта. Однако их результаты чувствительны к модели среды и граничным условиям. Поэтому метод конечных элементов следует применять как проверочный этап для сложных участков, а расчётные параметры уточнять по натурным измерениям [6, с. 282–296; 5, с. 267–273].

Для выработки высотой 3,5 м и шириной 5,0 м на глубине 650 м при прочности кровли 37 МПа была проверена схема с анкерами диаметром 25 мм, длиной закреплённой части 2,3 м и несущей способностью 320 кН. При плотности 2,5 анкера на погонный метр прогнозируемая конвергенция кровли составила 10 мм, расчётное пучение почвы – 25 мм, остаточная ширина – 4991 мм, минимальная высота – 3458 мм. Фактическое максимальное пучение 32 мм показало необходимость калибровки модели, но подтвердило приемлемую точность инженерного прогноза.

Структура автоматизированного расчёта

Предлагаемый алгоритм включает шесть последовательных модулей: 1) ввод геометрических, геологических и технических данных; 2) автоматическую проверку полноты, размерности и допустимых диапазонов; 3) расчёт вертикальных и горизонтальных напряжений, индекса прочности кровли и коэффициентов концентрации; 4) определение высоты и массы потенциальной зоны разрушения; 5) подбор длины, плотности и схемы расположения анкеров с проверкой разрыва, выдергивания и податливости; 6) формирование технологической схемы, отчёта и программы мониторинга.

После начала проведения выработки в систему загружаются измеренные смещения кровли, почвы и боков, нагрузки в анкерах и результаты глубинных реперов. При превышении допустимой скорости деформаций алгоритм должен рекомендовать уменьшение шага, увеличение длины, установку второго уровня либо переход к комбинированной крепи. Таким образом, паспорт становится не разовым документом, а обновляемой цифровой моделью участка.

Обсуждение результатов

Эффективная автоматизация не сводится к переносу формул в электронную таблицу. Она должна показывать чувствительность решения к неопределённости. Проектировщику важно видеть, как изменятся высота зоны разрушения и длина анкера при снижении прочности кровли, росте коэффициента K или появлении слабого прослоя. Для условий Карагандинского бассейна длина анкера должна определяться положением устойчивого слоя. Если нарушенная зона превышает стандартную длину стержневых анкеров, необходимо автоматически рассматривать двухуровневую схему или канатные анкеры [10, с. 74–83; 1, с. 1–19].

Ограничением остаётся качество геомеханической информации. Программа устраняет арифметические и процедурные ошибки, но не устраняет природную неоднородность массива. Поэтому результат должен сопровождаться областью применимости, оценкой достоверности и обязательной программой наблюдений.

Заключение

Нормативный расчёт является необходимой основой проектирования, но его информативность недостаточна для сложного трещиноватого массива. Программная проверка расширяет перечень учитываемых факторов, прогнозирует деформации и позволяет оперативно сравнивать варианты крепления.

Предложенный алгоритм объединяет контроль исходных данных, оценку напряжённого состояния, расчёт зоны разрушения, подбор параметров анкеров, проверку несущей способности и калибровку по мониторингу. Его применение сокращает время проектирования, повышает прослеживаемость решений и создаёт основу для обоснованного выбора одноуровневой, двухуровневой или комбинированной крепи.

Благодарность: Данное исследование выполнено при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по реализации научной и научно-технической программы ИРН BR28712407

Список литературы

1. Akhmatnurov D., Zamaliyev N., Mussin R., Demin V., Ganyukov N., Zagórski K., Skrzypkowski K., Korzeniowski W., Stasica J. Optimization of reinforcement schemes for stabilizing the working floor in coal mines based on an assessment of its deformation state. *Materials*. 2025. Vol. 18. Article 3094. DOI: 10.3390/ma18133094.
2. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // *Rock Mechanics*. – 1974. – Т. 6, № 4. – DOI: 10.1007/BF01239496.
3. Bieniawski Z.T. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. – New York: John Wiley & Sons, 1989. – 272 P.
4. Brady B.H.G., Brown E.T. *Rock Mechanics for Underground Mining*. 3rd ed. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. – 628 P.
5. Hoek E. Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek–Brown failure criterion edition // *Proceedings of the North American Rock Mechanics Symposium*. Toronto,. – 2002. – P. 267–273.
6. Kang H., Wang J., Wu Y. In-situ stress measurements and roadway support practice in deep coal mines of China // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2015. – № 3. – P. 317–328.
7. Molinda G.M., Mark C. *Coal Mine Roof Rating (CMRR): A Practical Rock Mass Classification for Coal Mines*. U.S. Bureau of Mines Information Circular 9387. Washington, DC. – 1994. – 83 P.
8. Peng S.S. *Coal Mine Ground Control*. – Morgantown: West Virginia University Press, 2015. – 480 P.
9. Xie H., Gao M., Zhang R., Peng G., Wang W., Li A. Study on the mechanical properties and mechanical response of coal mining at 1000 m or deeper. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019. Vol. 52. P. 1475–1490. DOI: 10.1007/s00603-018-1509-y.
10. Zholmagambetov N., Khalikova E., Demin V., Balabas A., Abdrashev R., Suiintayeva S. Ensuring a safe geomechanical state of the rock mass surrounding the mine workings in the Karaganda coal basin, Kazakhstan. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. No. 1. P. 74–83.

Статья поступила в редакцию: 13.08.2026

Статья принята к публикации: 20.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 656.6+004.9

Обзор подходов к управлению порожним контейнерным парком

Кочнева Дарья Ивановна

канд. техн. наук

доц., Уральский государственный университет путей сообщения

Российская Федерация, г. Екатеринбург

E-mail: DKochneva@usurt.ru

Review of approaches to empty container fleet management

Kochneva Daria

candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering)

Associate Professor, Ural State University of Railway Transport

Russia, Yekaterinburg

Аннотация

Статья посвящена обзору современных подходов к управлению порожним контейнерным парком в глобальных логистических системах. Проблема порожнего пробега контейнеров является одной из ключевых в контейнерных перевозках, приводя к значительным экономическим потерям и нерациональному использованию ресурсов. В работе рассматриваются два взаимодополняющих уровня решения этой проблемы – стратегический и оперативный. На стратегическом уровне проанализированы долгосрочные меры, такие как оптимизация пространственной конфигурации сети терминалов и депо, расширение номенклатуры контейнеропригодных грузов для балансировки встречных грузопотоков, а также внедрение инновационных складных контейнеров. На оперативном уровне особое внимание уделено стратегии оперативной передислокации порожних контейнеров (контейнершеринг), реализуемой на основе цифровых платформ и математических моделей назначения с пространственно-временными ограничениями. Проведён критический анализ существующих математических моделей, выделены их преимущества и ограничения. Выявлены основные пробелы в современных исследованиях: недостаточная адаптация алгоритмов к реальным условиям с неопределённостью, отсутствие механизмов согласования экономических интересов участников, нерешённые юридические и интеграционные аспекты. Обозначены перспективные направления дальнейших исследований, включая разработку гибридных моделей, применение теории игр и экспериментальную апробацию на реальных данных.

Библиографическое описание: Кочнева Д.И. Обзор подходов к управлению порожним контейнерным парком // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23331>

Abstract

The article provides a review of current approaches to empty container fleet management in global logistics systems. The problem of empty container repositioning is one of the key challenges in container shipping, leading to substantial economic losses and inefficient resource utilisation. The study considers two complementary levels of addressing this issue – strategic and operational. At the strategic level, long-term measures are analysed, including optimisation of the terminal and depot network configuration, expansion of the range of containerisable goods to balance counter flows, and the introduction of innovative foldable containers. At the operational level, special attention is paid to the strategy of operational empty container relocation (street-turn, container sharing), implemented through digital platforms and mathematical assignment models with spatio-temporal constraints. A critical review of existing mathematical models is conducted, highlighting their strengths and limitations. The main gaps in current research are identified: insufficient adaptation of algorithms to real-world uncertainty, lack of mechanisms for aligning the economic interests of stakeholders, unresolved legal and integration issues. Promising directions for further research are outlined, including the development of hybrid models, application of game theory, and experimental validation on real data.

Ключевые слова: управление порожним контейнерным парком, порожний пробег контейнеров, стратегический уровень, оперативный уровень, контейнершеринг, цифровые платформы, математическое моделирование, пространственно-временные ограничения.

Keywords: empty container fleet management, empty container repositioning, strategic level, operational level, container sharing, digital platforms, mathematical modeling, spatio-temporal constraints.

Введение

Проблема управления порожним контейнерным парком, известная в зарубежной литературе как Empty Container Repositioning (ECR) – одна из наиболее сложных логистических задач, стоящих перед мировой системой контейнерных перевозок. Порожние перевозки контейнеров не генерируют доход, однако поглощают те же ресурсы в связи с транспортировкой, хранением и обработкой, что и грузевые. В настоящее время около 20 % всех морских контейнерных перевозок составляют перемещения порожних контейнеров [15], а на наземном транспорте этот показатель достигает 40–50 % [8]. Ежегодные расходы на перевозку порожних контейнеров в мире исчисляются десятками миллиардов долларов [8, 18].

Основной причиной образования избытка порожних контейнеров является глобальный дисбаланс торговых потоков. Регионы, ориентированные на экспорт, испытывают дефицит порожних контейнеров, тогда как импорто-ориентированные сталкиваются с их избытком. Проблему торгового дисбаланса усугубляет сезонность перевозок, неопределенность спроса и предложения, а также отсутствие информации о местонахождении и статусе контейнеров в реальном времени [15]. В связи с этим поиск эффективных решений проблемы порожнего пробега является актуальной задачей для науки и практики.

Материалы и методы

Для проведения обзора использовался систематический подход к анализу научной литературы, опубликованной в период с 2009 по 2026 год. Поиск источников осуществлялся в реферативных базах данных и в российских научных электронных библиотеках. Отбор материалов проводился по критериям релевантности тематике, наличию математических моделей или эмпирических исследований, а также по публикационной активности авторов. Анализ выполнялся с позиций выделения уровней принятия решений и сравнения предлагаемых методов по таким параметрам, как учёт пространственно-временных ограничений, возможность практической реализации и экономическая обоснованность.

Результаты и обсуждение

Анализ научной литературы позволил выделить два взаимодополняющих уровня решения проблемы порожнего пробега контейнеров – стратегический и оперативный.

На стратегическом уровне рассматриваются долгосрочные решения: оптимизация пространственной конфигурации сети контейнерных терминалов и депо [7, 12]; балансировка спроса и предложения через расширение номенклатуры контейнеропригодных грузов, что позволяет создавать встречные грузопотоки [3]; внедрение инновационных типов подвижного состава – складных контейнеров [1, 11], которые при порожнем рейсе занимают в 4–6 раз меньше места. Вместе с тем, как отмечается в зарубежных исследованиях [14], складные контейнеры до сих пор не получили широкого коммерческого распространения из-за сложности процессов складывания и раскладывания и проблем интеграции в существующие цепочки поставок.

Главное преимущество названных стратегических мер – системный и долгосрочном эффекте, способный существенно изменить структуру издержек. Однако они требуют значительных капитальных вложений и несут рыночные риски, связанные с изменением внешнеэкономической конъюнктуры.

На оперативном уровне решаются задачи краткосрочного планирования, которые не требуют перестройки инфраструктуры, но позволяют гибко реагировать на текущий дисбаланс. Ключевые направления здесь – совершенствование информационного обмена между участниками [2, 11]; оперативная передислокация порожних контейнеров между конечными грузополучателями и грузоотправителями [4, 5, 9, 17]; оптимизация назначений контейнеров на основе имитационного моделирования [11], сетевых потоковых моделей [10], моделей управления запасами [16], линейного [13] и смешанного целочисленного программирования [6].

Особого внимания среди подходов оперативного уровня заслуживает стратегия оперативной передислокации порожних контейнеров. В зарубежной литературе такая стратегия обозначается терминами «Street-turn» [9] и «ContainerSharing» [17]. Впервые в российской науке эта стратегия была обоснована и формализована Пономаревым Н.Ю. под названием «контейнершеринг» [4], а в последующих работах – как «контейнерообмен» [6]. Технология предполагает передачу порожнего контейнера, освободившегося после выгрузки у одного грузополучателя, непосредственно грузоотправителю под новую загрузку, минуя возврат на контейнерный терминал или депо. Реализация данного подхода возможна

благодаря организации открытого информационного обмена между всеми участниками логистической цепи (перевозчиками, грузоотправителями, грузополучателями, операторами терминалов) на базе единой цифровой платформы, которая аккумулирует данные о наличии, местонахождении, типе и времени освобождения контейнеров. Для решения задачи оперативного сопоставления предложения и спроса используется математический аппарат на основе расширенной задачи о назначениях с пространственно-временными ограничениями, а также модифицированные венгерские алгоритмы и методы кластеризации.

Вместе с тем, в современных исследованиях имеются пробелы, связанные с недостаточной проработкой вопросов адаптации алгоритмов оперативного перераспределения к реальным условиям функционирования логистических систем. Большинство существующих моделей опираются на детерминированные значения времени доставки и доступности контейнеров, тогда как на практике многие параметры носят случайный характер. Кроме того, недостаточно внимания уделяется согласованию экономических интересов участников контейнершеринга: остаются непроработанными механизмы компенсации и распределения выгод между участниками логистической цепи. Также практически не рассматриваются юридические аспекты передачи контейнеров между независимыми агентами, включая вопросы ответственности за сохранность, страховое покрытие и переход права собственности. Открытым является и вопрос интеграции предлагаемых математических алгоритмов с существующими транспортными управляющими системами (TMS) и корпоративными платформами логистических операторов, которые используют собственные форматы данных и протоколы обмена. Отметим также, что большинство разработок проходят апробацию лишь на синтетических тестовых выборках или в имитационных экспериментах, тогда как пилотные проекты в реальной практике отсутствуют.

Заключение

Проведенный обзор подтверждает, что управление порожним контейнерным парком является многоуровневой задачей, требующей сочетания стратегических и оперативных мер. Стратегические подходы, такие как оптимизация сети и внедрение складных контейнеров, обещают долгосрочное снижение издержек, но сопряжены с высокими инвестиционными рисками. Оперативные методы обеспечивают гибкость и быстроту реакции, однако их практическая реализация сдерживается отсутствием адаптированных к неопределенности моделей, нерешенными экономическими и правовыми вопросами, а также слабой интеграцией с существующими ИТ-системами.

Устранение указанных пробелов требует междисциплинарного подхода, объединяющего методы оптимизации, теорию игр, цифровые платформенные решения и экспериментальные исследования на реальных данных, что открывает направление последующих исследований.

Список литературы

1. Иванова Е.В. Мазуренко О.И. Русинов И.В. Анализ эффективности внедрения складных контейнеров для решения проблемы дефицита порожних контейнеров // Транспортное дело России. – 2020. – № 6.
2. Кочнева Д.И. Организация движения порожнего контейнеропотока в региональной контейнерной транспортно-логистической системе // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 1.
3. Москвичев О.В. Многокритериальная оценка контейнеропригодности производимой продукции как один из факторов, определяющих размещение терминально-логистической инфраструктуры // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 1.
4. Пономарев Н.Ю., Кочнева Д.И. Оптимизация схемы возврата порожних контейнеров путем использования системы контейнершеринга // Инновационный транспорт. – 2023. – № 3.
5. Пономарев Н.Ю. Стратегия совместного использования ресурсов в логистике контейнерных перевозок // Актуальные проблемы современного транспорта. – 2024. – № 4.
6. Пономарев Н.Ю., Кочнева Д.И. Оптимизация оперативного перераспределения контейнеров в логистических сетях с учетом пространственно-временных ограничений // Транспорт Урала. – 2026. – № 2.
7. Сметанина А.В. Обзор методов и подходов к размещению контейнерных терминалов в регионе // Железнодорожный транспорт и технологии: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Екатеринбург, 29–30 октября 2025 года. – 2026.
8. Braekers K., Janssens G.K., Caris A. Challenges in Managing Empty Container Movements at Multiple Planning Levels // Transport Reviews. –. – 2011. – Т. 31, № 6.
9. Braekers K. Optimization of empty container movements in intermodal transport // 4OR. –. – 2012. – Т. 11, № 3.
10. Braekers K., Janssens G.K., Caris A. Braekers K., Janssens G.K., Caris A. Challenges in Managing Empty Container Movements at Multiple Planning Levels // Transport Reviews. –. – 2011. – Т. 31, № 6.
11. Islam S., Olsen T., Daud Ahmed M. Reengineering the seaport container truck hauling process // Business Process Management Journal. –. – 2013. – Т. 19, № 5.
12. Lei T.L., Church R.L. Locating shortterm empty-container storage facilities to support port operations: A user optimal approach // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. –. – 2011. – Т. 47, № 5.
13. Liao X. Strategy and Optimization of Empty Container Transportation // ICTE. – 2013.
14. Moon I., Do Ngoc A.-D., Konings R. Foldable and standard containers in empty container repositioning // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. –. – 2013. – Т. 49, № 1.
15. Song D.-P., Carter J. Empty container repositioning in liner shipping // Maritime Policy & Management. –. – 2009. – Т. 36, № 4.

16. Song D.P., Dong J. Modelling Empty Container Repositioning Logistics. – Cham: Springer, 2022.
17. Sterzik S. Kopfer H., Yun W.Y. Reducing hinterland transportation costs through container sharing // Flexible Services and Manufacturing Journal. – 2015. – № 2.
18. Sun M. Study on Empty Container Repositioning Problem under Sea-Rail through Transport // 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation: IEEE. – 2009.

References

1. Ivanova E.V. [Mazurenko O.I. Rusinov I.V. Analysis of the Efficiency of Implementing Collapsible Containers to Solve the Problem of Empty Container Deficit] // Transportnoe delo Rossii. – 2020. – № 6. (In Russ.)
2. Kochneva D.I. [Organization of Empty Container Flow Movement in a Regional Container Transport and Logistics System] // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. – 2012. – № 1. (In Russ.)
3. Moskvichev O.V. [Multi-Criteria Assessment of Container-Suitability of Manufactured Products as One of the Factors Determining the Placement of Terminal-Logistics Infrastructure] // Vestnik transporta Povolzh'ya. – 2015. – № 1. (In Russ.)
4. Ponomarev N.Yu., Kochneva D.I. [Optimization of Empty Container Return Scheme through the Use of a Container Sharing System] // Innovatsionnyj transport. – 2023. – № 3. (In Russ.)
5. Ponomarev N.Yu. [Strategy of Joint Resource Utilization in Container Transportation Logistics] // Aktual'nye problemy sovremennogo transporta. – 2024. – № 4. (In Russ.)
6. Ponomarev N.Yu., Kochneva D.I. [Optimization of Operational Redistribution of Containers in Logistics Networks Taking into Account Spatio-Temporal Constraints] // Transport Urala. – 2026. – № 2. (In Russ.)
7. Smetanina A.V. [Review of Methods and Approaches to the Placement of Container Terminals in a Region] // Zheleznodorozhnyj transport i tekhnologii: sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Ekaterinburg, 29–30 oktyabrya 2025 goda. – 2026. (In Russ.)
8. Braekers K., Janssens G.K., Caris A. Challenges in Managing Empty Container Movements at Multiple Planning Levels // Transport Reviews. –. – 2011. – T. 31, № 6.
9. Braekers K. Optimization of empty container movements in intermodal transport // 4OR. –. – 2012. – T. 11, № 3.
10. Braekers K., Janssens G.K., Caris A. Braekers K., Janssens G.K., Caris A. Challenges in Managing Empty Container Movements at Multiple Planning Levels // Transport Reviews. –. – 2011. – T. 31, № 6.
11. Islam S., Olsen T., Daud Ahmed M. Reengineering the seaport container truck hauling process // Business Process Management Journal. –. – 2013. – T. 19, № 5.

12. Lei T.L., Church R.L. Locating shortterm empty-container storage facilities to support port operations: A user optimal approach // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2011. – Т. 47, № 5.
13. Liao X. Strategy and Optimization of Empty Container Transportation // *ICTE*. – 2013.
14. Moon I., Do Ngoc A.-D., Konings R. Foldable and standard containers in empty container repositioning // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2013. – Т. 49, № 1.
15. Song D.-P., Carter J. Empty container repositioning in liner shipping // *Maritime Policy & Management*. – 2009. – Т. 36, № 4.
16. Song D.P., Dong J. *Modelling Empty Container Repositioning Logistics*. – Cham: Springer, 2022.
17. Sterzik S. Kopfer H., Yun W.Y. Reducing hinterland transportation costs through container sharing // *Flexible Services and Manufacturing Journal*. – 2015. – № 2.
18. Sun M. Study on Empty Container Repositioning Problem under Sea-Rail through Transport // *2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation: IEEE*,. – 2009.

Статья поступила в редакцию: 31.07.2026

Статья принята к публикации: 21.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 656.13:629.3.083.7

Анализ характерных неисправностей электрических самокатов и пути совершенствования системы их технического обслуживания в городской среде

Световой Максим Андреевич

соискатель кафедры

Наземные транспортно-технологические средства и комплексы, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)

Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

E-mail: svetovoim@gmail.com

Analysis of typical malfunctions of electric scooters and ways to improve their maintenance system in the urban environment

Svetovoy Maxim Andreevich

PhD Candidate

Department of Ground Transport and Technological Vehicles and Complexes, Saint Petersburg

State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

Russia, Saint Petersburg

Аннотация

В статье рассмотрены основные виды отказов электрических самокатов, эксплуатируемых в системах городского проката и личного пользования. Актуальность исследования обусловлена быстрым ростом парка средств индивидуальной мобильности и отсутствием регламентированной системы технического обслуживания. На основе анализа статистики обращений в сервисные центры за 2023–2025 гг., обезличенных отчётов операторов кикшеринга и опроса независимых мастерских выделены наиболее частые неисправности: деградация литий-ионных аккумуляторов (38 %), повреждения контроллеров (25 %), износ мотор-колёс (12 %) и механические поломки складывающихся узлов (18 %). Установлено, что около 75 % отказов приходится на электрическую часть — батарею и контроллер. Предложена трёхуровневая модель планово-предупредительного технического обслуживания (ППТО) с ежедневным, двухнедельным и месячным циклами, учитывающая интенсивность эксплуатации. Определён перечень операций для каждого уровня: от внешнего осмотра до тепловизионной диагностики контроллера и измерения сопротивления изоляции. Показано, что внедрение предложенной системы позволит сократить число внезапных отказов электрической части на 30–35 % и продлить общий срок службы самоката на 15–20 %. Рассмотрены технические решения по повышению надёжности, включая модуль

Библиографическое описание: Световой М.А. Анализ характерных неисправностей электрических самокатов и пути совершенствования системы их технического обслуживания в городской среде // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23332>

бортовой диагностики на базе Arduino, контролирующий температуру, токи, ёмкость батареи и вибрацию. Сформулированы перспективы перехода к обслуживанию по фактическому состоянию. Статья предназначена для инженерно-технических работников транспортных предприятий и городских сервисов микромобильности.

Abstract

The article considers the main types of failures of electric scooters operated in urban rental systems and personal use. The relevance of the study is due to the rapid growth of the fleet of personal mobility devices and the lack of a regulated maintenance system. Based on the analysis of service center requests for 2023–2025, anonymized reports of kick-sharing operators and a survey of independent workshops, the most frequent malfunctions are identified: degradation of lithium-ion batteries (38 %), damage to controllers (25 %), wear of motor-wheels (12 %) and mechanical breakdowns of folding units (18 %). It is established that about 75 % of failures occur in the electrical part – the battery and controller. A three-level scheduled preventive maintenance (SPM) model with daily, biweekly and monthly cycles is proposed, taking into account the intensity of operation. The list of operations for each level is defined: from visual inspection to thermal imaging diagnostics of the controller and insulation resistance measurement. It is shown that the implementation of the proposed system will reduce the number of sudden failures of the electrical part by 30–35 % and extend the total service life of the scooter by 15–20 %. Technical solutions to improve reliability are considered, including an on-board diagnostic module based on Arduino that monitors temperature, currents, battery capacity and vibration. Prospects for transition to condition-based maintenance are formulated. The article is intended for engineering and technical workers of transport enterprises and urban micromobility services.

Ключевые слова: электросамокат, городской транспорт, техническое обслуживание, неисправность, аккумуляторная батарея, контроллер, микромобильность, средство индивидуальной мобильности.

Keywords: electric scooter, urban transportation, maintenance, malfunction, battery, controller, micromobility, personal mobility device.

Введение

Активное развитие средств индивидуальной мобильности (СИМ), прежде всего электрических самокатов, стало заметным явлением в транспортной системе современных городов. По данным Министерства транспорта РФ, парк прокатных самокатов в российских городах-миллионниках ежегодно увеличивается на 20–30 % [6]. Одновременно обостряются вопросы безопасности и надёжности технической эксплуатации: износ узлов, отказы электрооборудования и несовершенство сервисного обслуживания ведут к росту числа дорожно-транспортных происшествий с участием СИМ и снижению потребительских качеств услуги. Действующая нормативная база, включая ГОСТ Р 70514-2022, устанавливает лишь общие требования безопасности, но не регламентирует периодичность и содержание технического обслуживания (ТО) электрических самокатов [1]. Цель настоящей работы — систематизировать типичные отказы электросамокатов и предложить структуру планово-предупредительного ТО, адаптированную к реальным условиям городской эксплуатации.

Материалы и методы

Исходными данными послужили обезличенные отчёты операторов кикшеринга за 2023–2025 гг. (Whoosh, Urent и др.) [5], открытая статистика ГИБДД о ДТП с участием СИМ [10], а также результаты опросов независимых сервисных мастерских, проведённых автором в 2024–2025 гг. [8]. Дополнительно анализировались нормативные документы [1, 2] и научные публикации по надёжности электротранспорта [3, 4, 9, 7]. Методика включала статистическую обработку распределения отказов, экспертную оценку причин на основе дефектации узлов, а также имитационное моделирование периодичности ТО с использованием типовых графиков загрузки прокатного парка. Для иллюстрации характерных дефектов использованы фотографии, выполненные автором в процессе ремонта.

Результаты и обсуждение

Статистика и классификация отказов. Анализ обращений в сервисные центры позволил выделить основные категории неисправностей (табл. 1). Около 75 % отказов приходится на электрическую часть — батарею и контроллер. Это объясняется высокой частотой циклов заряда-разряда при коммерческой эксплуатации (до 5–8 раз в сутки) и отсутствием активного охлаждения силовых элементов. Механические поломки чаще всего связаны с усталостными разрушениями алюминиевых сплавов в шарнире складывания, что подтверждается и наблюдениями автора за разбором аварийных узлов.

Таблица 1.

Распределение отказов электросамокатов по видам (средние значения за 2023–2025 гг.)

Вид неисправности	Доля в %
Аккумуляторная батарея (потеря ёмкости, дисбаланс ячеек, разрушение BMS)	38
Электронный контроллер (пробой MOSFET-ключей, отказ драйверов)	25
Мотор-колесо (износ подшипников, обрыв обмоток, размагничивание)	12
Механические элементы (складывающийся узел, рулевая колонка, тормозной трос)	18
Колёса и шины (проколы, износ протектора)	5
Прочее (обрыв проводки, поломка дисплея)	2

Как видно из таблицы, около 75 % отказов приходится на электрическую часть — батарею и контроллер. Это объясняется высокой частотой циклов заряда-разряда при коммерческой эксплуатации (до 5–8 раз в сутки) и отсутствием активного охлаждения силовых элементов. Механические поломки чаще всего связаны с усталостными разрушениями алюминиевых сплавов в шарнире складывания, что подтверждается и наблюдениями автора за разбором аварийных узлов.

Анализ причин типичных неисправностей

Аккумуляторная батарея. Деградация литий-ионных ячеек в условиях частых быстрых подзарядок (токи до 2–3С) и глубокого разряда приводит к разбалансировке параллельно-последовательных групп и преждевременному выходу из строя платы управления (BMS). Дополнительным фактором является вибрационная нагрузка, вызывающая микротрещины в паяных соединениях никелевых шин.



Рисунок 1. Аккумуляторная батарея электрического самоката

(фото автора)

Контроллер. Практика показывает, что наиболее частый дефект — тепловой пробой силовых MOSFET-транзисторов в фазных стойках инвертора. Причинами выступают длительная работа на затяжных подъёмах, блокировка колеса при наезде на препятствие, а также недостаточный теплоотвод от печатной платы. В отдельных случаях отказ вызывается попаданием влаги через негерметичный корпус.



Рисунок 2. Электронный контроллер самоката: вид со стороны печатной платы (фото автора)

Мотор-колесо. Основной износ связан с подшипниками качения, на которые действуют радиальные и осевые ударные нагрузки. Обрыв обмоток статора встречается реже и, как правило, является следствием перегрева при частичном заклинивании колеса.

Механические узлы. Складывающийся механизм испытывает знакопеременные нагрузки, концентрируемые в одной точке, что приводит к появлению усталостных трещин в алюминиевом корпусе. Конструктивное усиление этого узла производителями происходит медленно из-за стремления сохранить минимальную массу изделия.

Предлагаемая модель планово-предупредительного ТО

На основе полученных данных целесообразно внедрение трёхуровневой системы планово-предупредительного технического обслуживания (ППТО), адаптированной для прокатного и частного парков (табл. 2).

Таблица 2.

Рекомендуемая периодичность и состав работ ППТО электросамокатов

Уровень	Периодичность	Перечень операций
ЕО (ежедневное обслуживание)	Ежедневно (для проката)	Внешний осмотр на отсутствие механических повреждений, проверка тормозной системы, давление в шинах, контроль уровня заряда и напряжения батареи
ТО-1	1 раз в 2 недели	Диагностика BMS (балансировка ячеек), очистка контроллера от пыли, смазка шарниров, подтяжка резьбовых соединений рулевой колонки и складывающегося узла, проверка состояния подшипников мотор-колеса
ТО-2	1 раз в месяц (или через 500 км пробега)	Полная диагностика контроллера с тепловизионным контролем, замена термопасты, измерение сопротивления изоляции обмоток мотор-колеса, дефектоскопия алюминиевых узлов, тест ёмкости аккумулятора под нагрузкой

Внедрение предложенной схемы позволит снизить количество внезапных отказов электрической части за счёт раннего выявления деградации ячеек и перегрева контроллера, а также продлить общий срок службы самоката. Оценки, основанные на эксплуатационных данных [5, 8], показывают сокращение внезапных отказов на 30–35 % и увеличение ресурса на 15–20 %.

Дальнейшее повышение эксплуатационной надёжности возможно путём интеграции в конструкцию электросамоката модуля бортовой диагностики, аналогичного OBD-II в автомобилях. Модуль в реальном времени контролирует:

- температуру силовых ключей и двигателя;
- напряжение и ток по каждой фазе;
- остаточную ёмкость батареи и её внутреннее сопротивление;
- виброакустические характеристики подшипниковых узлов.

При выходе параметров за пределы допуска модуль формирует предупредительный сигнал и передаёт его в диспетчерский центр оператора кикшеринга. Прототип такого устройства был испытан автором на базе платформы Arduino и токовых датчиков ACS712. Полученные данные планируется представить в отдельной публикации.

Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что доминирующую долю отказов электросамокатов составляют неисправности электрической части — аккумуляторов и контроллеров. Применение трёхуровневой системы планово-предупредительного ТО с ежемесячным циклом позволяет сократить число внезапных отказов примерно на треть и повысить общий ресурс техники. Перспективным направлением является оснащение самокатов элементами бортовой диагностики, что создаёт предпосылки для перехода к обслуживанию «по состоянию». Практическая реализация предложенных мер будет способствовать как повышению безопасности дорожного движения, так и экономической эффективности сервисов кикшеринга.

Список литературы

1. ГОСТ Р 70514-2022. Средства индивидуальной мобильности. Технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2022. – 24 с.
2. ГОСТ Р 58651-2019. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2019. – 12 с.
3. Иванов А.А., Петров Б.Б. Анализ отказов литий-ионных аккумуляторов в условиях интенсивной эксплуатации // Электрохимическая энергетика. – 2024. – Т. 24, № 2. – С. 112–118.
4. Кузнецов Е.В. Методы диагностики бесколлекторных двигателей постоянного тока // Известия вузов. Электромеханика. – 2023. – № 5. – С. 45–51.
5. Отчёт по надёжности парка самокатов Whoosh за 2024 год / Пресс-служба Whoosh [Электронный ресурс]. – 2024. URL: <https://whoosh-bike.ru/reliability-2024> (дата обращения: 29.07.2026).
6. Официальный сайт Министерства транспорта Российской Федерации. Развитие средств индивидуальной мобильности в 2024 году [Электронный ресурс]. – 2024. URL: <https://mintrans.gov.ru/activities/sim> (дата обращения: 29.07.2026).
7. Павлов И.С. Применение Arduino в системах мониторинга технического состояния транспортных средств // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 3. – С. 28–33.
8. Сергеев В.А., Кузнецов П.Н. Анализ повреждаемости электронных компонентов лёгкого электротранспорта // Транспорт Российской Федерации. – 2024. – № 3. – С. 18–23.
9. Смирнов Д.А. Микромобильность в городской транспортной системе: проблемы и перспективы // Транспорт Российской Федерации. – 2024. – № 1. – С. 34–40.
10. Статистика ДТП с участием средств индивидуальной мобильности в РФ за 2024 год. – М.: ГИБДД, 2025. – 32 с.

References

1. Personal Mobility Devices. Technical Requirements and Test Methods*. Moscow, Standartinform, 2022. 24 P. (In Russ.)

2. State Standard R 58651-2019. System of Technical Maintenance and Repair of Equipment. Terms and Definitions. Moscow, Standartinform, 2019. 12 P. (In Russ.)
3. Ivanov A.A., Petrov B.B. Analysis of Failures of Lithium-Ion Batteries under Intensive Operation. *Elektrokhimicheskaya Energetika**, 2024, vol. 24, no. 2, P. 112–118. (In Russ.)
4. Kuznetsov E.V. Diagnostic Methods for Brushless DC Motors. **Izvestiya Vuzov. Elektromekhanika*, 2023, no. 5, P. 45–51. (In Russ.)
5. Whoosh Scooter Fleet Reliability Report for 2024*. Whoosh Press Service. 2024. Available at: – 2024. – 15 с. – URL: <https://whoosh-bike.ru/reliability-2024> (дата обращения: 29.07.2026). (In Russ.)
6. Development of Personal Mobility Devices in 2024. Ministry of Transport of the Russian Federation. 2025. Available at: – 2025. – 10 с. – URL: <https://mintrans.gov.ru/activities/sim> (дата обращения: 29.07.2026). (In Russ.)
7. Pavlov I.S. Application of Arduino in Vehicle Technical Condition Monitoring Systems. *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol, Diagnostika*, 2024, no. 3, P. 28–33. (In Russ.)
8. Sergeev V.A., Kuznetsov P.N. Analysis of Damage to Electronic Components of Light Electric Transport. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2024, no. 3, P. 18–23. (In Russ.)
9. Smirnov D.A. Micromobility in the Urban Transport System: Problems and Prospects. *Transport Rossiyskoy Federatsii**, 2024, no. 1, P. 34–40. (In Russ.)
10. *Statistics of Road Accidents Involving Personal Mobility Devices in the Russian Federation for 2024. Moscow, GIBDD, 2025. 32 P. (In Russ.)

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Статья поступила в редакцию: 11.05.2026

Статья принята к публикации: 18.05.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 671.5+539.4

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.22802

Задержанный возврат размера дульца гильзы спортивного патрона после отжига и обжима

Жуков Игорь Геннадьевич

двукратный чемпион Европы по бенчресту

Российская Федерация, г. Новосибирск

E-mail: vnbog@mail.ru

Delayed recovery of sporting cartridge case neck diameter after annealing and sizing

Zhukov Igor

Two-time European Benchrest Champion

Russia, Novosibirsk

Аннотация

В статье рассматривается эффект задержанного размерного возврата дульца латунной гильзы спортивного патрона после отжига и последующего обжима. Показано, что наблюдаемое увеличение наружного диаметра дульца через 24–48 часов после обжима нельзя удовлетворительно объяснить только обычным наклёпом или возрастным упрочнением правильно отождённой латуни. На основе опубликованных данных AMP, NIST и работ по комнатно-температурной релаксации дефектной структуры в α -латунях Cu–Zn предложена комбинированная интерпретация эффекта, включающая малый мгновенный упругий возврат сразу после отжига, контактно-пластическую посадку при прохождении через бушинг,anelастический задержанный возврат после обжима и влияние поверхностных оксидных плёнок на трение. Представлен экспериментальный протокол, позволяющий отделить истинный рост среднего диаметра от релаксации овальности. Показано, что практическое наблюдение изменения размера дульца на 0,001 дюйма за сутки–двое имеет правдоподобное материаловедческое объяснение и должно рассматриваться как научно обоснованная гипотеза, требующая дальнейшей количественной проверки на стандартизованных сериях гильз.

Библиографическое описание: Жуков И.Г. Задержанный возврат размера дульца гильзы спортивного патрона после отжига и обжима // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/22802>

Представленное в статье исследование проведено совместно с д.т.н. Богословским В.Н.

Статья будет полезна спортсменам-стрелкам, охотникам, а также всем любителям высокоточной спортивной стрельбы из нарезного оружия.

Работа выполнена в интересах мирового спортивного стрелкового сообщества по инициативе авторов и на их собственные средства, с использованием открытых источников информации.

Abstract

The paper examines the phenomenon of delayed recovery of sporting cartridge case neck diameter after annealing and subsequent sizing. It is shown that the observed increase in neck outer diameter within 24–48 hours after sizing cannot be explained solely by conventional work hardening or by age hardening of properly annealed brass. Drawing on published AMP data, NIST work on springback and anelastic recovery, and studies of room-temperature defect relaxation in Cu–Zn α -brass, a combined interpretation is proposed. The mechanism includes near-zero instantaneous springback immediately after annealing, additional contact-plastic set during passage through the bushing die, delayed anelastic recovery after sizing, and friction changes caused by oxide films. An experimental protocol is presented to distinguish a true increase in mean neck diameter from mere ovality relaxation. The observed 0.001 inch delayed diameter change is argued to have a plausible materials-science basis and is treated as a scientifically grounded hypothesis requiring further quantitative verification.

The article will be useful for shooting athletes, hunters, and all fans of high-precision sports shooting with rifled weapons.

The work was carried out in the interests of the global sports shooting community at the initiative of the authors and at their own expense, using open sources of information.

Ключевые слова: латунная гильза, дульце гильзы, отжиг, обжим, задержанный размерный возврат, упругий возврат, аanelастическое восстановление, α -латунь Cu–30Zn, оксидная плёнка, микротвёрдость.

Keywords: brass cartridge case, case neck, annealing, sizing, delayed dimensional recovery, springback, anelastic recovery, Cu–30Zn α -brass, oxide film, microhardness.

Введение

В практике работы с отожжёнными латунными гильзами иногда наблюдается эффект, который нельзя свести только к обычному наклёпу или к возрастному упрочнению. Если дульце гильзы обжимать в бушинговой матрице сразу после отжига, измеренный наружный диаметр дульца может оказаться меньше номинального размера бушинга. Например, при бушинге 0,287" фактический наружный диаметр дульца сразу после обжима может составлять около 0,286". Если те же гильзы после отжига выдержать 24–48 часов и только затем обжать, то диаметр дульца после обжима оказывается ближе к номиналу бушинга, то есть около 0,287". Аналогично, если дульца были обжаты сразу после отжига до 0,286", то после выдержки в течение суток–двух их диаметр может самопроизвольно увеличиться до 0,287".

Такой результат означает, что речь идёт не только о процессе, происходящем до обжима, но и о процессе, происходящем после обжима. Поэтому корректнее говорить не о простом «старении» отождённой латуни, а о двух связанных механизмах: «обжим → мгновенный размер дульца → задержанный размерный возврат».

Цель статьи заключается в описании эффекта задержанного возврата размера дульца гильзы спортивного патрона после отжига и обжима и в выработке рекомендаций по таймингу операций отжига и обжима. Сделана попытка научного объяснения эффекта, почему после корректного отжига только что отождённое дульце может ощущаться «как пластилин», а после последующего обжима и короткой выдержки снова демонстрировать заметный упругий отклик.

Материалы и методы

В работе использованы индукционная печь АМР для отжига латунной гильзы, резьбовой пресс Turban 105, резьбовая и нажимная матрицы Wilson для обжима гильзы и посадки пули, нажимной пресс Sinclair, микрометр Mitutoyo, депулер Hornady, набор мандрелов 21st Century, гильзы Lapua калибров 6.5×47 Lapua и 6.5×55 SE, пули Berger VLD 130 gr (рис. 1).

Для проверки эффекта задержанного размерного возврата использовались серии одинаковых гильз, разделённых на четыре группы: А — отжиг → немедленный обжим → измерения через 0 мин, 1 ч, 6 ч, 24 ч и 48 ч; В — отжиг → выдержка 24–48 ч → обжим → измерения сразу и через 24 ч; С — отжиг → немедленный обжим со смазкой / без смазки / с графитом; D — отжиг → выдержка → удаление оксидной плёнки / повторная чистка → обжим. Измерялись два взаимно перпендикулярных диаметра дульца, средний диаметр и овальность. Дополнительно контролировалась микротвёрдость до отжига, после отжига, после обжима и через 24–48 часов.

Результаты и обсуждение

1. Почему сразу после отжига дульце может обжиматься меньше номинального размера бушинга

После правильного отжига латунь в области дульца и плеча находится в мягком состоянии с низким сопротивлением пластической деформации. АМР прямо указывает, что после корректного отжига наблюдается практически нулевой упругий возврат из матрицы; при этом производитель предупреждает, что при использовании бушинговой матрицы после отжига следует проверять фактический диаметр дульца, поскольку «нулевой возврат» может означать необходимость иной настройки обжима [1].

Особенно важно, что АМР наблюдала очень похожий эффект в собственном эксперименте. В испытании с бушинговой матрицей без расширительного мандрела использовался бушинг 0,336", причём его фактический внутренний диаметр был проверен и составлял 0,3357". Тем не менее отождённые гильзы после обжима давали наружный диаметр дульца около 0,335"; АМР отдельно отметила, что причина такого результата им не

вполне ясна [2]. Это практически прямой аналог рассматриваемого случая, когда фактический диаметр отожжённого дульца после обжима оказывается меньше номинального размера бушинга.



Рисунок 1. Индукционная печь AMP для отжига латунной гильзы, резьбовой пресс Turban 105, резьбовая и нажимная матрицы Wilson для обжима гильзы и посадки пули, нажимной пресс Sienclar, микрометр Mitutoyo, дедулер Hornady, набор мандрелов 21 st Century, гильзы Lapua в калибре 6.5x47 Lapua и 6.5x55 SE, пули Berger VLD 130 gr

Материаловедчески это можно объяснить сочетанием нескольких факторов. Во-первых, полностью отожжённая латунь имеет малый мгновенный упругий возврат и поэтому сильнее «запоминает» размер, навязанный контактом с инструментом. Во-вторых, при проходе через бушинг дульце не просто радиально сжимается, а одновременно испытывает контактное давление, трение, продольное вытягивание, локальную неравномерность толщины стенки и возможную овальность. В-третьих, у мягкой отожжённой латуни выше склонность к схватыванию и задиру при недостаточной смазке: AMP прямо указывает, что шейки, отожжённые примерно до 100 HV, склонны к задирам без смазки, а смазка делает обжим мягче и стабильнее [2].

Следовательно, размер 0,286" при бушинге 0,287" не обязательно означает ошибку измерения. Это может быть реальным результатом контактной пластической деформации мягкой тонкостенной оболочки в матрице, особенно если трение и геометрия прохода создают дополнительное вытягивание и локальную посадку металла.

2. Почему дульце затем увеличивается с 0,286" до 0,287"

Увеличение диаметра уже обжатого дульца через 24–48 часов нельзя объяснить только оксидной плёнкой, потому что изменение происходит после завершения контакта с матрицей. Основной кандидат здесь — задержанный упругий возврат, или упругое последствие.

В современной механике формоизменения пружинение после разгрузки делят на две части: $\Delta D_{\text{возв}} = \Delta D_{\text{мгн}} + \Delta D_{\text{зад}}(t)$. Здесь $\Delta D_{\text{мгн}}$ — мгновенный упругий возврат сразу после выхода из матрицы, а $\Delta D_{\text{зад}}(t)$ — задержанный, зависящий от времени вклад. NIST прямо выделяет проблему разделения пружинения на мгновенную упругую и зависящую от времениanelастическую составляющую и подчёркивает, что пластическая деформация влияет на механизмыanelастического восстановления и springback, а обычные модели нередко недооценивают величину возврата именно потому, что не учитывают эти эффекты [5].

Для латуни это особенно важно, потому что упругое последствие в медно-цинковых сплавах известно давно. В работе по латуни Л62 показано, что холодная деформация и последующий нагрев существенно изменяют упругое последствие; для описания пружинных свойств латуней одних только характеристик прочности и твёрдости недостаточно — необходимо учитывать также относительный предел упругости и характеристики упругого последствия [8].

Физически задержанный размерный возврат можно связать с перестройкой дефектной структуры после обжима. После отжига дульце становится мягким, но сам обжим снова создаёт свежую холодную деформацию: в металле появляются дислокации, двойники деформации, остаточные микронапряжения и дефекты упаковки. Для холоднодеформированных α -латуней Cu–Zn показано, что даже при комнатной температуре дефекты упаковки продолжают эволюционировать во времени. В частности, для Cu–30Zn описано логарифмическое уменьшение вероятности дефектов упаковки со временем, что интерпретировано как релаксация частичных дислокаций к более энергетически выгодной конфигурации [6]. В феноменологическом виде этот результат корректно записывать так:

$$P_{sf}(t) = P_{sf,0} - A \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right)$$

где: $P_{sf}(t)$ — вероятность дефектов упаковки во времени, $P_{sf,0}$ — её начальное значение сразу после деформации, $A > 0$ — коэффициент скорости релаксации, t_0 — характерное время процесса. Для Cu–30Zn знак перед логарифмом берётся минус, потому что в статье указано именно логарифмическое уменьшение вероятности дефектов упаковки со временем.

Компактная математическая запись тезиса о логарифмической комнатно-температурной релаксации в форме изменения относительно начального состояния имеет вид:

$$\Delta P_{sf}(t) = P_{sf}(t) - P_{sf,0} = -A \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right)$$

Поскольку автор интерпретирует эффект как релаксацию частичных дислокаций к более энергетически выгодной конфигурации, можно дать и энергетическую формулировку:

$$\frac{dE}{dt} < 0, P_{sf}(t) \downarrow$$

то есть с течением времени система переходит к состоянию с меньшей энергией, а вероятность дефектов упаковки уменьшается. В более содержательном виде это можно записать так:

$$P_{sf}(t) \propto w(t),$$

где $w(t)$ — эффективная ширина области дефекта упаковки между частичными дислокациями. Тогда “abnormal narrowing” можно феноменологически представить как

$$w(t) = w_0 - B \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right),$$

где $B > 0$. Это уже инженерная интерпретация, а не дословная формула из статьи, но она хорошо отражает физический смысл наблюдаемого процесса и согласуется с формулировкой автора про «аномальное сужение дефектов упаковки» и «релаксацию частичных дислокаций».

Задержанный размерный возврат дульца после обжима можно описывать либо растянутой экспоненциальной зависимостью

$$D(t) = D_0 + \Delta D_{\infty} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{\tau} \right)^n \right) \right],$$

либо, в более простой феноменологической постановке, логарифмическим законом

$$D(t) = D_0 + A \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right).$$

В обеих формулах D_0 соответствует диаметру дульца сразу после обжима. В первой формуле ΔD_{∞} задаёт предельную величину задержанного возврата, τ — характерное время релаксации, а n — степень растянутости процесса. Во второй формуле параметры A и t_0 являются феноменологическими и определяют соответственно масштаб изменения диаметра и временной масштаб процесса. Обе зависимости отражают один и тот же физический смысл: после обжима диаметр дульца может увеличиваться не мгновенно, а постепенно, в течение часов и суток, вследствиеanelастического восстановления и релаксации дефектной структуры свежedefормированной α -латуни.

Физический смысл первой формулы: При $t = 0$ $D(0) = D_0$, то есть в начальный момент формула даёт исходный диаметр сразу после обжима. При больших временах:

$$D(t) \rightarrow D_0 + \Delta D_{\infty}$$

Это означает, что диаметр постепенно растёт и стремится к предельному значению. Если $n = 1$, процесс имеет обычный экспоненциальный характер. Если $n \neq 1$, процесс становится растянутым во времени, что лучше соответствует сложной релаксации дефектной структуры в латуни.

Физический смысл второй формулы: При $t = 0$: $D(0) = D_0$ то есть начальное условие снова выполняется. Дальше диаметр увеличивается по логарифмическому закону:

$$D(t) - D_0 \sim \ln t$$

Это означает, что сначала изменение идёт быстрее, а затем всё более замедляется.

Для приведённого примера $D_0 = 0,286''$, $D_\infty = 0,287''$, $\Delta D_\infty = 0,001''$. Относительное изменение диаметра составляет около 0,35 %, что по порядку величины соответствует упруго-пластическим деформациям, возможным в тонкостенной латунной оболочке при обжиге. С механической точки зрения изменение на 0,001'' нельзя считать невероятным, особенно если часть возврата задержана во времени.

3. Почему выдержка после отжига до обжига тоже меняет результат

Если гильзы после отжига выдержать сутки–двое и только затем обжать, диаметр после обжига может сразу получиться ближе к 0,287''. Этот факт показывает, что до обжига тоже что-то меняется. Однако это изменение не обязательно является возрастным упрочнением латуни. АМР проверяла старые правильно отождённые гильзы и пришла к выводу, что корректно отождённая и нормально хранящаяся латунь не показывает заметного возрастного упрочнения на практически значимых временах. В архивных образцах правильно отождённые гильзы через годы сохраняли примерно ту же твёрдость; целевая твёрдость отождённой шейки у АМР указана около 98 HV [3]. Поэтому гипотеза «латунь за сутки стала твёрже» в смысле заметного роста HV выглядит слабой.

Более вероятны два других механизма. Первый — поверхностный. После отжига поверхность латуни имеет свежую, изменённую термическим воздействием оксидную и адсорбционную плёнку. В течение часов и суток на воздухе эта плёнка перестраивается. Для латуни показано образование пассивного слоя, содержащего ZnO и медьсодержащие оксиды; во влажном воздухе за несколько суток формируется двойная оксидная структура [7]. Такая плёнка способна существенно менять трение в контакте «дульце — бушинг».

Второй механизм — субкритическая релаксация структуры после отжига, если импульсный отжиг не дал полностью однородной рекристаллизации по всей толщине и длине дульца. В этом случае часть объёма может быть полностью рекристаллизована, а часть — находиться в состоянии возврата с остаточными напряжениями. При выдержке в течение часов или суток часть этих напряжений может релаксировать, меняя реакцию материала на последующий обжим. Однако этот механизм, вероятно, даёт меньший вклад, чем поверхностное трение и задержанный возврат после самого обжига.

4. Почему оксидная плёнка не может быть единственным объяснением

Оксидная плёнка и трение хорошо объясняют, почему гильза, обжатая через сутки после отжига, может вести себя иначе, чем гильза, обжатая сразу после отжига. Но они не объясняют полностью случай, когда дульце уже было обжато сразу после отжига до 0,286", а затем без нового контакта с матрицей увеличилось до 0,287". Для этого обязателен объёмный механизм: остаточные напряжения +anelastическое восстановление + релаксация дефектов → задержанное увеличение диаметра. Поэтому наиболее полная модель должна быть комбинированной: $\Delta D(t) = \Delta D_{\text{мгновенный}} + \Delta D_{\text{задержанный}}(t) + \Delta D_{\text{трибо}}$. Для описываемого феномена удобно записать: $D_{\text{после обжима}}(t) = D_{\text{буш}} - \delta_{\text{конт}} + \Delta D_{\text{мгн}} + \Delta D_{\text{зад}}(t)$, где $D_{\text{буш}}$ — номинальный или фактический диаметр бушинга, $\delta_{\text{конт}}$ — дополнительная посадка из-за контактной пластической деформации, трения, овальности и неидеальной геометрии прохождения, $\Delta D_{\text{мгн}}$ — мгновенный упругий возврат, $\Delta D_{\text{зад}}(t)$ — задержанный возврат. Сразу после отжига $\Delta D_{\text{мгн}} \approx 0$, поэтому $D(0) \approx D_{\text{буш}} - \delta_{\text{конт}}$. Через сутки–двое: $D(t) \approx D_{\text{буш}} - \delta_{\text{конт}} + \Delta D_{\text{зад}}(t)$. Если $\delta_{\text{конт}} \approx 0,001"$ и $\Delta D_{\text{зад}}(24-48 \text{ ч}) \approx 0,001"$, то получается именно наблюдаемый эффект: 0,286" → 0,287".

5. Экспериментальная проверка эффекта

Для еще одной проверки эффекта был реализован простой протокол с четырьмя сериями гильз, отличавшимися моментом обжима после отжига. Измерялись не только один диаметр, а два взаимно перпендикулярных диаметра $D0^\circ$ и $D90^\circ$, чтобы отделить истинное увеличение среднего диаметра от уменьшения овальности.

Были проведены следующие тесты:

1. Обжим гильз после отстрела без отжига. Начальный диаметр дульца гильз был равен 0,298. После обжима бушингом 287 он колебался в пределах 0,2865–0,287. Колебания, по нашему мнению, были вызваны тем, что дульца обжимались за один раз с очень большого нека винтовки Blaser R8. В практике подготовки этих гильз мы обжимаем их одним или двумя бушингами промежуточных размеров. Через двое суток размер 0,287 сохранился, дульца некоторых гильз подросли на 0,0005.

2. Обжим гильз сразу после отжига с этого же размера 0,298. Диаметр дульца составил 0,2855. После двух суток диаметр дульца у всех контрольных гильз увеличился на 0,001 до значений 0,2865.

3. Обжим гильз после отжига и хранения в течение двух суток. Диаметр дульца составил 0,2865.

Средний диаметр рассчитывался как: $D_{\text{ср}} = (D0^\circ + D90^\circ)/2$, а овальность как: $\Omega = |D0^\circ - D90^\circ|$. В наблюдениях через сутки увеличивался именно $D_{\text{ср}}$, тогда как заметного уменьшения Ω не фиксировалось. Следовательно, речь шла не о простой релаксации овальности, а о настоящем задержанном размерном возврате.

Дополнительно измерялась микротвёрдость HV сразу после отжига, после обжима и через 24–48 часов. Диаметр менялся, а HV практически не менялась, что является сильным аргументом в пользуanelastического размерного восстановления, а не обычного возрастного упрочнения.

6. Что можно считать установленным

Во-первых, правильно отождествлённая и просто хранящаяся латунь, по данным АМР, не показывает заметного возрастного упрочнения на практически значимых временах. АМР повторно проверяла ранее отождествлённые образцы и указывала, что целевая твёрдость отождествлённой шейки около 98 HV сохранялась без заметного роста даже через годы хранения [3]. Во-вторых, АМР прямо связывает наклёп дульца и плеча с ростом упругого возврата из матрицы, а правильный отжиг — с устранением или резким снижением этого возврата. После корректного отжига при последующем обжиге может наблюдаться практически нулевой упругий возврат; поэтому производитель рекомендует заново проверять настройку матрицы, осадку плеча и наружный диаметр дульца [2; 1].

В-третьих, данные АМР по микротвёрдости показывают, что сам обжим немедленно повторно наклёпывает дульце. Для однострелянной гильзы без отжига и после обжима получали около 155 HV; для гильзы, отождествлённой, а затем обжатой, — около 138 HV; для гильзы, сначала обжатой по дульцу, а затем отождествлённой, — около 105 HV [2]. Следовательно, главное возвращение сопротивления деформации происходит не во время хранения после отжига, а в момент последующего холодного обжима.

В-четвёртых, в механике формообразования существует не только мгновенный упругий возврат, но и зависящее от времениanelастическое восстановление после пластической деформации. Это даёт научную основу для идеи, что часть размерного возврата дульца может происходить не сразу, а в течение часов или суток [5].

В-пятых, часть гипотезы об изменении свойств поверхности также имеет опору. Для латуни в воздухе и влажном воздухе описано формирование оксидных слоёв, включающих ZnO и Cu₂O-подобные компоненты, способных влиять на трение в контакте «дульце — бушинг» [7].

7. Возможный механизм задержанного размерного возврата дульца после обжима

Наиболее правдоподобная интерпретация феномена состоит в следующем. Сразу после отжига дульце имеет очень малый мгновенный упругий возврат и при проходе через бушинг может получить дополнительную пластическую посадку, связанную с трением, мягкостью металла, поверхностной плёнкой и неидеальной геометрией контакта. Поэтому сразу после обжима диаметр может оказаться меньше номинала бушинга.

Затем в течение часов и суток в свежedefормированной α-латунии идёт задержанноеanelастическое восстановление: релаксируют остаточные напряжения, перестраиваются частичные дислокации и дефекты упаковки, и дульце частично возвращается наружу. Именно поэтому диаметр увеличивается с 0,286" до 0,287". Если же гильза перед обжимом выдерживается после отжига, её поверхность и остаточное состояние стабилизируются, трение при обжиге становится другим, и итоговый диаметр сразу получается ближе к 0,287".

Иными словами, это не один процесс, а сумма трёх процессов: мягкое состояние после отжига + контактное формоизменение в бушинге + задержанный упругий возврат после обжима.

8. Поверхностные процессы в дульце при импульсном отжиге

При обсуждении отжига часто упускают из виду, что стрелок ощущает не только объёмную твёрдость, но и поведение поверхности при контакте с матрицей и пулей. На поверхности латуни при нагреве в воздухе появляются тонкие оксидные плёнки на основе ZnO и Cu_2O . Исследование Qiu и Leygraf по начальному окислению латуни во влажном воздухе показало рост двухслойной оксидной плёнки и участие именно этих оксидов в ранних стадиях поверхностного изменения [7].

Важно и то, что сам по себе нагрев не тождествен децинкофикации. В обзоре Metlab и в исследовании АМР подчёркивается, что нагрев латуни сам по себе не означает «выгорания цинка» или децинкофикации без химически активной среды; характерная зона изменения цвета после отжига должна трактоваться как следствие локального нагрева и окисления, а не как разрушение химического состава [4; 2].

Для практической механики контакта принципиально другое: АМР показала, что усилие извлечения пули определяется не только натягом и твёрдостью дульца, но и состоянием внутренней поверхности дульца; углеродистый слой может действовать как смазка и заметно менять усилие извлечения даже при одинаковой твёрдости [2]. Следовательно, часть того, что пользователь интерпретирует как «больше» или «меньше» упругости после отжига, на самом деле может быть следствием изменённой трибологии, а не только объёмной металлургии.

Наконец, можно отметить такой интересный факт. Отжиг был включен в технологию снаряжения патронов как способ убрать наклеп, образующийся при большой амплитуде расширения-сжатия дульца и плеча гильзы. Например, у винтовки Blaser R8 диаметр дульца гильзы после выстрела составляет 0,298", а диаметр проточенного на равенность дульца с пулей может быть 0,290". Если выбирать натяг 0,002 или больше, суммарная амплитуда расширения-сжатия дульца составит не менее 0,01. При такой амплитуде наклеп появляется уже на первых циклах. Однако если предельно уменьшить амплитуду расширения-сжатия дульца, например, до 0,003", как это сделано у спортивных винтовок 6PPC или 33XC, или любых других калибров, то наклеп не проявляется даже после 10–15 циклов, а теоретически более 30 циклов. Тесный нек патронника является важной особенностью винтовки. Он резко снижает амплитуду расширения-сжатия дульца. Благодаря этому замедляется накопление наклёпа, сохраняются равенность и толщина дульца, стабилизируется усилие посадки пули, а необходимость отжига отодвигается на значительно большее число циклов. Отжиг перестаёт быть регулярной обязательной операцией и становится вынужденной мерой, применяемой только после появления признаков наклёпа или изменения усилия посадки. По результатам испытаний гильз Peterson в патроннике 33XC после 14 циклов не было выявлено необходимости отжига: равенность и толщина дульца сохранялись, а усилие посадки оставалось стабильным. И главное, «лечится» причина, а не следствие. То есть, если отжиг убирает наклеп, то тесный нек и небольшой натяг пули просто его не допускают. Технология снаряжения патронов значительно упрощается, а трудоемкость снижается. Конечно, в тех винтовках, которые предполагают использование заводских патронов, амплитуда неизбежно

будет значительной. Но патронники спортивных винтовок любых калибров можно сразу заказывать с тесным некомп, и тогда отжиг перестанет быть обязательной операцией при самостоятельном снаряжении патронов.

Заключение

В данной статье мы не приводим исчерпывающих теоретических доказательств представленного феномена, а выдвигаем научную гипотезу, пытаясь его объяснить. Более того, мы не уверены, что все стрелки наблюдают такой же эффект и что он повторяется во всех случаях. Но если он есть, тогда спортсменам нужно обратить внимание на то, что в зависимости от того, когда они отождут, обожмут гильзы, посадят в них пули и произведут выстрелы, натяг может быть разный, что может сказаться и на начальной скорости пули, и на кучности. Это важно, потому что определяет более длинный цикл снаряжения патронов.

Показано, что наблюдаемое «возвращение упругости» через 24–48 часов после отжига научно корректнее связывать не с возрастным упрочнением правильно отождённой и просто хранящейся латуни, а с сочетанием свежего наклёпа после последующего обжима, комнатно-температурной релаксации дефектной структуры и изменения трибологии поверхности.

Наблюдаемое увеличение диаметра дульца после обжима отождённой гильзы с 0,286" до 0,287" следует рассматривать как задержанный размерный возврат, а не как простое возрастное упрочнение. Сразу после отжига латунь имеет малый мгновенный упругий возврат и при контакте с бушингом может получать дополнительную пластическую посадку, зависящую от трения, смазки, оксидной плёнки и геометрии контакта. После обжима в свежedefормированной α -латунии Cu–Zn продолжается релаксация остаточных напряжений, частичных дислокаций и дефектов упаковки, что приводит кanelастическому восстановлению диаметра в течение часов и суток.

Таким образом, феномен имеет комбинированную природу: поверхностно-трибологическую во время обжима и объёмно-дефектную после обжима. Предлагаемое объяснение следует рассматривать как научно обоснованную гипотезу. Отдельные элементы механизма — отсутствие заметного возрастного упрочнения правильно отождённой латуни, влияние наклёпа на упругий возврат, наличиеanelастического восстановления после пластической деформации, комнатно-температурная релаксация дефектов в холодnodeформированной α -латунии и влияние оксидной плёнки на контактное трение — подтверждены независимыми источниками. Однако количественная проверка именно для системы «отождённая гильза — бушинговая матрица — изменение диаметра через 24–48 часов» требует дальнейших стандартизованных экспериментов.

Задержанный упругий возврат после отжига усложняет переснаряжение патрона и увеличивает время на операции подготовки гильзы. Это является ещё одним свидетельством того, что отжиг не только тянет за собой достаточно много дополнительных операций по подготовке гильзы, но и создает дополнительные неопределенности в свойствах гильзы, поэтому должен применяться только в случае необходимости.

Отжиг вводится как способ снятия наклёпа с дульца гильзы. Но если уменьшить амплитуду расширения-сжатия дульца гильзы, то скорость образования наклёпа уменьшится, и тем самым будет исключена сама первопричина необходимости отжига.

Список литературы

1. AMP. Frequently Asked Questions: zero spring-back, sizing after annealing and related annealing issues [Электронный ресурс]. // 2026. – 2026. URL: <https://www.ampannealing.com/faq> (дата обращения: 27.04.2026).
2. Findlay A., Peterson D. Age Hardening of Brass. AMP [Электронный ресурс]. // 2020. – 2020. URL: <https://www.ampannealing.com/articles/60/age-hardening-of-brass/> (дата обращения: 27.04.2026).
3. Findlay A., Peterson D. Age Hardening of Brass. AMP [Электронный ресурс]. // 2020. – 2020. URL: <https://www.ampannealing.com/articles/60/age-hardening-of-brass/> (дата обращения: 27.04.2026).
4. Metlab. Report 1231/1B. Discussion of cartridge brass properties. 27 June [Электронный ресурс]. – 2017. URL: <https://www.ampannealing.com/uploads/report17/app1.pdf> (дата обращения: 27.04.2026).
5. NISTIR 7017. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg: NIST [Электронный ресурс]. // 2003. – 2003. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir7017.pdf> (дата обращения: 27.04.2026).
6. Oğurtani T. Ö. The room temperature annealing kinetics of stacking faults in cold worked alpha brasses // Metallurgical Transactions A. – 1975. – Т. 6. – DOI: 10.1007/BF02658407.
7. Qiu P., Leygraf C. Initial oxidation of brass induced by humidified air // Applied Surface Science. – 2011. – Т. 258, № 3. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.09.080.
8. Tsobkallo S.O., Vashchenko Z.A. Effect of cold-work and annealing on the anelasticity of L62 [62 % Cu] brass // Metal Science and Heat Treatment. – 1959. – Т. 1. – DOI: 10.1007/BF00811662.

ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ

ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 10.07.2026

Статья принята к публикации: 17.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 631.4+631.81

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23321

Агрохимическая характеристика почвенных профилей Караузьякского и Тахтакупырского районов республики Каракалпакстан

Асаматдинов Алым Орынбаевич

канд. хим. наук

и.о. доцента кафедры химии, Нукусский государственный педагогический институт им.

Ажинияза

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: asamatdinov1973@gmail.com

Джаксымуратов Караматдин Мустапаевич

д-р геол.-минерал. наук, проф.

кафедры физической географии и гидрометеорологии, Каракалпакский государственный

университет им. Бердаха

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: karamatdindjaksimuratov842@gmail.com

Кудьяров Оралбай Аширбаевич

магистр биол. наук, директор

средняя школа №12

Республика Узбекистан, Канлыккульский район, н.п. Бостан

E-mail: kudiyarovoralbay33@gmail.com

Agroecological characterization of soil profiles in the Karauzyak and Takhtakupyr districts of the republic of Karakalpakstan

Asamatdinov Alim Orynbaevich

*candidate of Chemical Sciences, Acting Associate Professor
of the Department of Chemistry Nukus State Pedagogical Institute named after Ajiniyaz
Uzbekistan, Nukus*

Dzhaksymuratov Karamatdin Mustapayevich

*doctor of Geological and Mineralogical Sciences; Professor of the Department of Physical
Geography and Hydrometeorology
Karakalpak State University named after Berdakh
Uzbekistan, Nukus*

Kudyyarov Oralbay Ashirbaevich

*master of Biological Sciences
Principal of Secondary School No. 12
Uzbekistan, Kanlykul District, Bostan*

Аннотация

В статье представлены результаты комплексного исследования физико-химических свойств почв, отобранных в Караузякском и Тахтакупырском районах Республики Каракалпакстан. Проведена оценка гранулометрического состава, кислотно-щелочных свойств, электропроводности, степени засоления, а также содержания водорастворимых ионов в почвенных профилях глубиной до 250 см. Установлено, что исследуемые почвы характеризуются неоднородным гранулометрическим составом с преобладанием легкосуглинистых, супесчаных и пылевато-суглинистых горизонтов. Значения pH варьировали от 8,4 до 9,4, что свидетельствует о сильнощелочной и очень сильнощелочной реакции среды. Анализ солевого состава показал высокую степень засоления почв, особенно в верхних горизонтах профилей, где электропроводность насыщенного почвенного экстракта достигала 52,96 dS/m, а содержание плотного остатка — 8,78 %. В составе водорастворимых солей преобладают сульфаты и хлориды натрия, определяющие хлоридно-сульфатный характер засоления. Основными токсичными солями являются Na_2SO_4 , NaCl и MgSO_4 , доля которых составляет большую часть общего солевого фонда почвы. Полученные результаты свидетельствуют о неблагоприятном мелиоративном состоянии исследованных земель и необходимости разработки мероприятий по снижению засоления и повышению плодородия почв в условиях Северного Приаралья.

Abstract

This study presents the results of a comprehensive investigation of the physicochemical properties of soils collected from the Karauzyak and Takhtakupyr districts of the Republic of Karakalpakstan. Soil profiles to a depth of 250 cm were evaluated for particle-size distribution, soil reaction (pH), electrical conductivity, salinity level, and the composition of water-soluble ions. The

Библиографическое описание: Асаматдинов А.О., Джаксымуратов К.М., Кудыяров О.А. Агрохимическая характеристика почвенных профилей Караузякского и Тахтакупырского районов республики Каракалпакстан // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23321>

investigated soils exhibited heterogeneous particle-size distribution, with a predominance of loam, sandy loam, and silt loam horizons. Soil pH ranged from 8.4 to 9.4, indicating strongly to very strongly alkaline conditions. Salinity analysis revealed severe soil salinization, particularly in the upper horizons, where the electrical conductivity of the saturated soil extract reached 52.96 dS m⁻¹ and the total dissolved salts (dry residue) content reached 8.78 %. Water-soluble salts were dominated by sodium sulfates and chlorides, resulting in predominantly chloride–sulfate salinity. The principal toxic salts identified were sodium sulfate (Na₂SO₄), sodium chloride (NaCl), and magnesium sulfate (MgSO₄), which accounted for the majority of the total salt content. These findings indicate the unfavorable reclamation status of the studied soils and emphasize the need for integrated soil management measures aimed at reducing salinity and improving soil fertility to ensure the sustainable use of agricultural lands in the Northern Aral Sea region.

Ключевые слова: почва, засоление, гранулометрический состав, электропроводность, водная вытяжка, ионный состав, Северное Приаралье, Каракалпакстан, плодородие почв, агроэкологическая оценка.

Keywords: soil salinity, agroecological assessment, soil profile, particle-size distribution, electrical conductivity, water-soluble ions, Northern Aral Sea region, Republic of Karakalpakstan, soil fertility.

Введение

Республика Каракалпакстан относится к числу наиболее уязвимых территорий Северного Приаралья, где процессы вторичного засоления и осолонцевания получили широкое распространение. В условиях высокой испаряемости и ограниченного естественного дренажа происходит накопление легкорастворимых солей в почвенном профиле, что оказывает негативное влияние на водно-физические свойства почв, доступность элементов питания и развитие растений. В связи с этим особую актуальность приобретает изучение гранулометрического состава, физико-химических характеристик и солевого режима почв различных районов региона [10].

Гранулометрический состав является одним из важнейших показателей, определяющих водный, воздушный и питательный режимы почв. От соотношения песчаных, пылеватых и глинистых частиц зависят влагоемкость, водопроницаемость, способность к аккумуляции питательных веществ и устойчивость почв к деградационным процессам. Наряду с этим показатели кислотности (pH), электропроводности почвенного раствора, содержания водорастворимых ионов и состава солей позволяют оценить степень и характер засоления, а также выявить факторы, ограничивающие сельскохозяйственное использование земель.

В настоящее время комплексные исследования почв Северного Приаралья имеют не только научное, но и практическое значение, поскольку полученные данные служат основой для разработки мероприятий по мелиорации засоленных земель, рациональному землепользованию и восстановлению почвенного плодородия. Особый интерес представляет изучение пространственного распределения солей по почвенному профилю и установление особенностей их накопления в различных генетических горизонтах [11].

Целью настоящего исследования является комплексная оценка гранулометрического состава, физико-химических свойств, степени и характера засоления почвенных профилей, заложенных в Караузьякском и Тахтакупырском районах Республики Каракалпакстан. Для достижения поставленной цели были определены механический состав почв, показатели кислотности, электропроводности, содержание водорастворимых ионов, сумма токсичных солей и состав гипотетических солей с последующей оценкой мелиоративного состояния исследуемых почв.

Материалы и методы исследования

Физические характеристики почв. Механический состав почв (texture) определяли методом седиментации с предварительной диспергацией частиц пирофосфатом натрия. Образец мелкозема почвы с помощью взбалтывания диспергируется реагентом и сливается в мерный цилиндр, емкостью 1 литр. Через стандартные интервалы времени из суспензии пипеткой берут пробы с определенной глубины. Согласно закону Стокса определенным глубинам соответствуют частицы диаметром: 1, 0.25, 0.1, 0.05, 0.01, 0.005, 0.001 и <0,001.мм. Отобранные пробы помещают в чашки, высушивают до постоянного веса и взвешивают.

Определение показателей засоленности и анализ содержания растворимых ионов в почве. Для определения засоленности почв проведены измерения электрической проводимости в водной вытяжке при соотношении объемов почва: вода 1:5 (ЕС 1:5). Измерения проводили в dS/m электрокондуктометром, имеющим электрод с температурным компенсатором.

Метод оценки степени засоления почв по электрической проводимости насыщенных почвенных экстрактов принят в международной практике из-за его простоты, однако в местных условиях ранее широко не применялся. В результате репрезентативного числа измерений ЕС_е и ЕС 1:5, для условий Узбекистана, получен коэффициент пересчета “К”, равный 4,0, который позволяет по измеренным значениям ЕС в водной вытяжке 1:5, оценивать степень засоления почв используя классификацию ФАО [6] Пересчет из ЕС1:5 в ЕС_е рекомендуется проводить по формуле:

$$ЕС_e = 4,0 \times ЕС_{1:5},$$

затем делать оценку степени засоленности для слоев почв по таблице:

Подготовка образцов почвы. Образцы почвы высушиваются на воздухе, размельчаются в форфоровой ступке с помощью пестика и просеиваются через сито с ячейками размером в 1 мм. По международным стандартам широко используется просеивание почвы через сито диаметром 2 мм, так как большинство почв Центральной Азии имеют пик распределения частиц почвы по их размерам, который в международной классификации относится к фракции “пыли”, мало вероятно, что эта разница может послужить причиной получения большой разницы величин при анализах [12].

Результаты и обсуждения

По результатам анализа механического (гранулометрического) состава почв разрезов, профиль почвы неоднородный, имеет слоистое сложение.

В разрезе Р-1 (Караузяк) почвы представлены более лёгким механическим составом. В слое 0 – 50 см залегают лёгкие суглинки, от 50 до 100 см, супеси, ниже, наблюдается чередование средних суглинков и легких суглинков с супесями (таблица 1).

Таблица 1.

Результаты анализа механического состава почвы

Место отбора	Горизонт, см	Количество фракций (мм), в %								Оценка по А.Н. Качинскому
		>0,25	0,25-0,10	0,10-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001	Физическая глина, <0,01	
Р-1 Караузяк	0-25	3,7	24,6	22,4	23,9	4,8	11,9	8,7	25,4	Легкий суглинок
	25-50	2,3	14,1	33,6	22,3	5,6	12,7	9,5	27,8	Легкий суглинок
	50-75	1,7	16,3	47,9	19,9	1,6	7,2	5,6	14,3	Супесь
	75-100	0,5	15,0	52,0	18,7	1,2	7,2	5,6	13,9	Супесь
	100-125	0,4	2,7	12,7	51,7	10,7	12,3	9,5	32,6	Средний суглинок
	125-150	0,1	1,2	24,8	59,6	1,6	6,8	6,0	14,3	Супесь
	150-200	0,2	0,5	10,4	66,0	7,2	9,5	6,4	23,1	Легкий суглинок
Р-2 Тахтакупыр	0-25	3,1	10,1	6,5	27,0	15,9	19,9	17,5	53,3	Тяжелый суглинок
	25-50	0,6	6,9	3,5	27,8	15,9	24,2	21,1	61,2	Глина легкая
	50-75	0,5	6,8	2,9	29,4	15,1	24,6	20,7	60,4	Глина легкая
	75-100	0,5	4,9	4,0	25,4	15,9	26,2	23,1	65,2	Глина легкая
	100-125	0,1	0,5	26,3	58,8	2,4	6,8	5,2	14,3	Супесь
	125-150	0,2	0,6	38,8	46,5	1,2	7,2	5,6	13,9	Супесь
	150-200	0,1	0,4	45,4	41,3	1,6	6,4	4,8	12,7	Супесь

Согласно классификации гранулометрического состава почвы по треугольнику США, принятой ФАО (рисунок), почвы разреза Р-1 (Караузяк) в слое 0 – 50 см представлены суглинком, в слое 50 – 100 см они характеризуются, как опесчаненный суглинок, а в слое 100 – 200 см, пылеватый суглинок [3; 6].

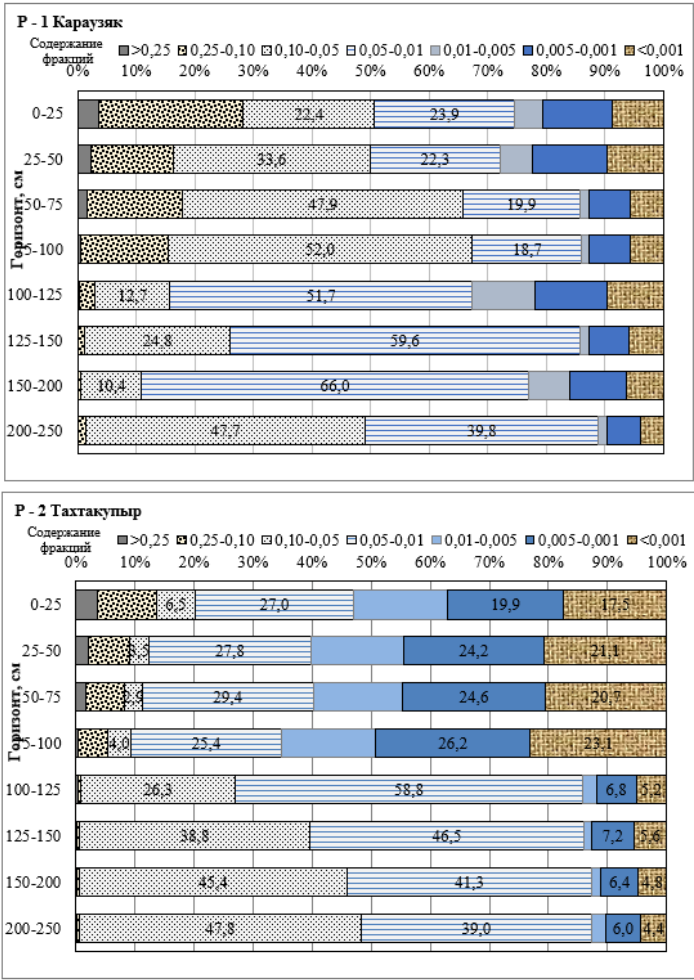


Рисунок 1. Иллюстрация количества фракций в механическом составе почв (по А.Н. Качинскому)

Таблица 2.

Анализ и оценка механического состава почвы по ФАО

Место отбора	Горизонт, см	Содержание фракций (мм) по треугольнику США, в %			Название по ФАО	
		Песок, 0.05-2.0	Пыль, 0.002-0.05	Глина, < 0.002		
Р-1 Караузьяк	0-25	52	36	12	L	Loam
	25-50	50	36	13	L	Loam
	50-75	66	26	8	SL	Sandy Loam
	75-100	67	25	8	SL	Sandy Loam
	100-125	16	71	13	ZL	Silt Loam
	125-150	26	66	8	ZL	Silt Loam
	150-200	11	80	9	ZL	Silt Loam
Р-2 Тахтаку́пир	0-25	21	56	23	ZL	Silt Loam
	25-50	11	61	28	ZCL	Silty Clay Loam
	50-75	10	62	28	ZCL	Silty Clay Loam
	75-100	10	60	31	ZCL	Silty Clay Loam
	100-125	27	66	7	ZL	Silt Loam
	125-150	40	53	8	ZL	Silt Loam
	150-200	46	47	7	SL	Sandy Loam

Почвенный профиль Р-1 (Караузяк). В верхней части профиля (0–50 см) почва характеризуется суглинистым гранулометрическим составом. Содержание песчаной фракции составляет 50–52 %, пылевой 36 %, глинистой 12–13 %. Такое соотношение механических элементов обеспечивает благоприятные водно-физические свойства почвы и достаточную влагоемкость.

В горизонтах 50–100 см наблюдается увеличение доли песка до 66–67 % и снижение содержания пыли до 25–26 %, что соответствует супесчаному составу. Данные горизонты отличаются более высокой водопроницаемостью и меньшей способностью удерживать влагу [9].

На глубине 100–200 см происходит резкое изменение гранулометрического состава. Здесь преобладает пылеватая фракция 66–80 %, при относительно низком содержании песка 11–26 % и глины 8–13 %. По классификации ФАО данные горизонты относятся к пылевато-суглинистым почвам. Максимальное содержание пыли 80 % отмечено в горизонте 150–200 см, что свидетельствует о накоплении тонкодисперсного материала в процессе почвообразования и осадконакопления.

Почвенный профиль Р-2 (Тахтакупыр). Профиль Р-2 отличается более тяжелым механическим составом по сравнению с профилем Караузяка. Верхний горизонт (0–25 см) представлен пылевато-суглинистой почвой, содержащей 56 % пыли, 23 % глины и 21 % песка.

В интервале 25–100 см формируются наиболее тяжелые по механическому составу горизонты, относящиеся к пылевато-глинисто-суглинистым почвам. Содержание глинистой фракции достигает 28–31 %, тогда как доля пыли составляет 60–62 %, а песка всего 10–11 %. Повышенное содержание глины способствует увеличению влагоемкости, однако может ухудшать аэрацию и водопроницаемость почвы. Начиная с глубины 100 см механический состав становится более легким. Горизонты 100–150 см представлены пылевато-суглинистыми почвами, в которых содержание пыли составляет 53–66 %, песка 27–40 %, а глины 7–8 % [2; 7].

В нижней части профиля (150–250 см) возрастает содержание песчаной фракции до 46–48 %, а доля пыли уменьшается до 45–47 %. Эти горизонты классифицируются как супесчаные, характеризующиеся более высокой фильтрационной способностью и меньшей влагоудерживающей способностью.

Общая характеристика. Сравнительный анализ показывает, что почвы Тахтакупырского района имеют более тяжелый гранулометрический состав, особенно в средней части профиля, где содержание глинистой фракции достигает 31 %. Почвы Караузякского района характеризуются большей неоднородностью текстуры и преобладанием легких и средних по механическому составу разновидностей. В обоих профилях отмечается увеличение содержания песчаной фракции в нижних горизонтах, что может быть связано с особенностями аллювиального происхождения почвообразующих пород и изменением условий осадконакопления в прошлом. Такие различия гранулометрического состава оказывают существенное влияние на водный режим, процессы засоления, миграцию солей и общую продуктивность почв.

рН водной вытяжки из образцов почвы Р-1 Караузяк составляет от 8,4 до 9,4. При этих показателях почва образцов почвенного профиля оценивается, как сильно щелочная (рН 8.5 – 9.0) и очень сильно щелочная (рН более 9,0, таблица 3). Обычно все микроэлементы хорошо усваиваются растениями при рН менее 8,4, то есть показатель рН почвы, в обоих почвенных разрезах, – неблагоприятный.

Показатели засоленности почвы. Электропроводность, содержание плотного остатка (суммы солей), отдельных ионов, суммы токсичных солей, а также гипотетический состав солей, показаны в таблице 3 и на рисунках 2.

В исследованной почве содержится высокое содержание солей, определяемое в анализе, как «плотный остаток в водной вытяжке». Значения общего содержания солей в образцах почвы Р-1 Караузяк составляют от 0,60 % (в горизонте 200 – 250 см), до 6,88 -8,78 % к массе почвы (в верхних горизонтах 0 – 25 и 25 – 50 см).

Такое же распределение солей по профилю, как и по плотному остатку, наблюдается по показателю электропроводности насыщенного почвенного экстракта ЕСе. Показания электропроводности отражают содержание солей и составляют в вышеуказанных горизонтах, соответственно: 6, 48 и 52,96 dS/m. Во всех образцах почвы, наиболее высоко содержание ионов: сульфатов натрия и хлора. Согласно таблицы 3 в ионном составе образцов верхних, наиболее засоленных горизонтов почвы, расположение элементов по убыванию, имеет следующий вид (*в мг-экв./100г*):

$\text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K} > \text{Ca} \geq \text{Mg}, > \text{HCO}_3^-$ (Разрез 1 Караузяк)

$\text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{HCO}_3^-$ (Разрез 2 Тахтакүпир)

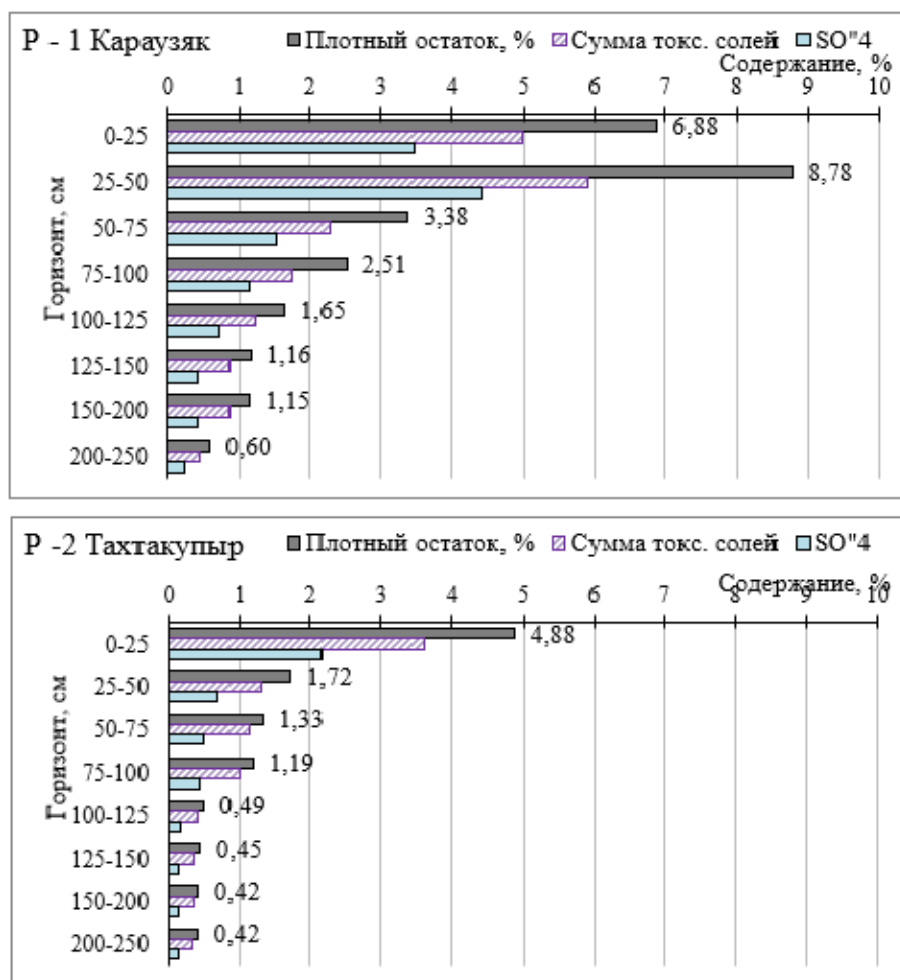


Рисунок 2. Профили содержания плотного остатка, сульфатов, суммы токсичных солей в исследованных почвах

За исключением горизонта 125 – 150 см в профиле почвы преобладает соль, – Na_2SO_4 , содержание которой составляет от 38 до 56 % всех солей. Соль NaCl по содержанию занимает второе место, в основном 21 – 37 %, и является преобладающей солью 41 % от общего содержания солей, только в вышеупомянутом горизонте 125 – 150 см. Количество вредной соли MgSO_4 в горизонтах содержится от 10 до 14 % [1; 7].

Преобладающая соль – сульфат натрия Na_2SO_4 , 40 – 53 % от всех солей, а содержание натрия хлора, 31 – 44 %. Кроме двух верхних горизонтов, где CaSO_4 , соответственно составил 17 и 10 % от общего количества солей, ниже 50 см, его количество резко снижается до 2 – 5 %. Содержание карбонатов кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, наоборот возрастает от верхнего к нижним горизонтам, от менее 1 % до 8 % от общего количества солей (рис.8). Количество сульфата магния MgSO_4 , во всех горизонтах незначительное и составляет от 2 до 4 % общего содержания солей [5; 8].

Заключение

В ходе исследований проведена комплексная оценка гранулометрического состава, физико-химических свойств и степени засоления почвенных профилей в Караузьякском и Тахтакуйырском районах Республики Каракалпакстан.

Почвы характеризуются неоднородным гранулометрическим составом и слоистостью. В разрезе Р-1 (Караузьяк) преобладают лёгкосуглинистые и супесчаные горизонты, в Р-2 (Тахтакупыр) — пылевато-суглинистые и тяжёлые суглинистые [4].

Значения pH составляют 8,4–9,4 (сильно- и очень сильнощелочная реакция), что неблагоприятно для большинства сельскохозяйственных культур.

Почвы сильно и очень сильно засолены: ЕСе достигает 52,96 dS/m, плотный остаток — до 8,78 %. Преобладает хлоридно-сульфатный тип засоления с доминированием токсичных солей (Na_2SO_4 , NaCl, MgSO_4).

Результаты указывают на высокую степень деградации почв вследствие вторичного засоления. Для восстановления плодородия необходимы комплексные мелиоративные мероприятия: улучшение дренажа, оптимизация орошения, промывки, химические мелиоранты и использование солеустойчивых культур.

Данные могут применяться при мониторинге почв Северного Приаралья и разработке программ восстановления деградированных земель аридной зоны Каракалпакстана [13].

Список литературы

1. Кутлымерекова А.К. Исследования агрохимических свойств почв Тахтакупырского района Республики Каракалпакстан // Теория и практика современной науки. – 2023. – № 11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-agrohimicheskikh-svoystv-pochv-tahtakupyrskogo-rayona-respubliki-karakalpakstan> (дата обращения: 09.08.2026).
2. Муродов Ш. и др. Изучение химических свойств подземных вод и почвы Республики Каракалпакстан на примере Караузьякского района // Вестник ЕНУ имени Гумилева. – 2026. – № 2. – С. 10–30.
3. Adeyemo T., Kramer I., Levy G.J., Mau Y. Salinity and Sodicity Can Cause Hysteresis in Soil Hydraulic Conductivity // Geoderma. – 2021. – Т. 413.
4. Asamatdinov A.O. Physico-Chemical Characteristics of Aralkum Sands // Universum. – 2026. – Т. 5. – Р. 22–28.
5. Djaksymuratov K. Hydrogeological conditions of the dried-up bottom of the Aral sea and adjacent territories of the south Aral sea artesian basin // Science and education in Karakalpakstan. – 2025. – Т. 3. – Р. 114–116.
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Salt-Affected Soils: Impacts of Salinization, Sodication and Waterlogging. – Retrived from: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/en/> (дата обращения: 09.08.2026).
7. Kaldybaev S. et al. Saline Soils of the Republic of Kazakhstan and the Republic of Karakalpakstan (Uzbekistan) and Approaches for Their Improvement // Soil Science and Agrochemistry. – 2024. – Р. 112–123.
8. Khasanov S. et al. Impact Assessment of Soil Salinity on Crop Production in Uzbekistan // Agricultural Water Management. – 2023.
9. Kudaibergenova U.K., Kudaibergenova G.R. Study of Soil Conditions and Pollution Levels in the Republic of Karakalpakstan // Economics and Society. – 2025. – Т. 7. – Р. 5–12.

10. Otenova F.T., Mambetullaeva S.M. Ecological assessment of soil salinization in the Southern Aral Sea Region // BIO Web of Conferences. – 2024. – Т. 103. – DOI: 10.1051/bioconf/202410300027.
11. Sadullaev S., Sultonov B., Ashurov F. et al. Mitigating Aral Sea disaster aftermath: evaluating soil salinization trends and eco-friendly remediation in Karakalpakstan // Brazilian Journal of Biology. – 2025. – Т. 85. – DOI: 10.1590/1519-6984.298979.
12. Tolepova Sh.B., Kurbaniyazova B.J., Jumatova R.M. Impact of Soil Salinization on Meliorative Conditions of Irrigated Areas in Karakalpakstan // European Journal of Agricultural and Rural Education. – 2024. – P. 112–121.
13. Zakirov M. et al. Key characteristics of the ecological and geodynamic conditions in southern Karakalpak Ustyurt of Uzbekistan // MDPI Land. – 2026. – Т. 15. – DOI: 10.3390/land15050782.

References

1. [Investigation of Agrochemical Properties of Soils in the Takhtakupyr District of the Republic of Karakalpakstan] // Teoriya i praktika sovremennoj nauki. – 2026. – № 11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-agrohimicheskikh-svoystv-pochv-tahtakupyrskogo-rayona-respubliki-karakalpakstan> (дата обращения: 19.08.2026). (In Russ.)
2. [Study of Chemical Properties of Groundwater and Soil of the Republic of Karakalpakstan Using the Example of the Karauzak District] // Vestnik ENU imeni Gumileva. – 2026. – № 2. (In Russ.)
3. Adeyemo T., Kramer I., Levy G.J., Mau Y. Salinity and Sodicity Can Cause Hysteresis in Soil Hydraulic Conductivity // Geoderma. – 2021. – Т. 413.
4. Asamatdinov A.O. Physico-Chemical Characteristics of Aralkum Sands // Universum. – 2026. – Т. 5.
5. Djaksymuratov K. Hydrogeological conditions of the dried-up bottom of the Aral sea and adjacent territories of the south Aral sea artesian basin // Science and education in Karakalpakstan. – 2025. – Т. 3.
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Salt-Affected Soils: Impacts of Salinization, Sodication and Waterlogging. – Retrived from: – URL: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/en/> (дата обращения: 09.08.2026).
7. Kaldybaev S. et al. Saline Soils of the Republic of Kazakhstan and the Republic of Karakalpakstan (Uzbekistan) and Approaches for Their Improvement // Soil Science and Agrochemistry. – 2024.
8. Khasanov S. et al. Impact Assessment of Soil Salinity on Crop Production in Uzbekistan // Agricultural Water Management. – 2023.
9. Kudaibergenova U.K., Kudaibergenova G.R. Study of Soil Conditions and Pollution Levels in the Republic of Karakalpakstan // Economics and Society. – 2025. – Т. 7.

10. Otenova F.T., Mambetullaeva S.M. Ecological assessment of soil salinization in the Southern Aral Sea Region // BIO Web of Conferences. – 2024. – Т. 103. – DOI: 10.1051/bioconf/202410300027.
11. Sadullaev S., Sultonov B., Ashurov F. et al. Mitigating Aral Sea disaster aftermath: evaluating soil salinization trends and eco-friendly remediation in Karakalpakstan // Brazilian Journal of Biology. – 2025. – Т. 85. – DOI: 10.1590/1519-6984.298979.
12. Tolepova Sh.B., Kurbanliyazova B.J., Jumatova R.M. Impact of Soil Salinization on Meliorative Conditions of Irrigated Areas in Karakalpakstan // European Journal of Agricultural and Rural Education. – 2024.
13. Zakirov M. et al. Key characteristics of the ecological and geodynamic conditions in southern Karakalpak Ustyurt of Uzbekistan // MDPI Land. – 2026. – Т. 15. – DOI: 10.3390/land15050782.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Электронный научный журнал

№ 8(149)

Август 2026 г.

Часть 7

Свидетельство о регистрации СМИ: ЭЛ № ФС 77 – 54434 от 17.06.2013

Мнение авторов может не совпадать с позицией редакции.

Издание содержит научную информацию и в соответствии с ч. 4 ст. 1
Федерального закона от 29.12.2010 № 436-ФЗ «О защите детей от информации,
причиняющей вред их здоровью и развитию» не подлежит классификации
(маркировке) по возрастным категориям

Издательство ООО «Юниверсум»

Объём издания: 84 с.

Минимальные системные требования: процессор с частотой от 1,3 ГГц; ОЗУ от
512 МБ; программа для чтения PDF-файлов; доступ к сети Интернет

Дата размещения в сети Интернет: 28.08.2026

Журнал размещается в:

CYBERLENINKA

e НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

Google
scholar

ULRICHSWEB
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

>BASE

СОЦИОНЕТ

OpenAIRE



Registry of Open Access
Repositories (ROAR)