



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**Научно-технический
и производственный журнал**

(27) 6 / 2025

**POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY**

Scientific & Technical Journal

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года
Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

Главный редактор	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю.
Второй главный редактор	АХМЕТОВА И.Г.
Заместитель главного редактора	STANIMIR VALTCHEV

Ответственный секретарь	ГРАЧЕВА Е.И.
--------------------------------	--------------

Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	МАЙОРОВА Е.С.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ВАК:

- ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ) (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) - ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г.
---	--

Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
------------------	---

Сайт:	https://www.energyret.ru/
--------------	---

Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
------------------	--

Адрес издателя:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
------------------------	---

Адрес редакции:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
------------------------	---

Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
-------------------	--------------------

Email:	problems_ener@mail.ru
---------------	-----------------------

Типография:	ООО "45"
--------------------	----------

Адрес типографии:	420023, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Чехова, 28
--------------------------	---

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**2025
Т.27, № 6
Ноябрь - Декабрь
ISSN 1998-9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)**

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

Журнал освещает фундаментальные и прикладные исследования, а также дискуссионные вопросы по проблемам энергетики и связанными с ней отраслями производства и науки.

В Журнале публикуются результаты открытых научных исследований, выполняемых учеными научных учреждений, высших учебных заведений, иных организаций и граждан, ведущих научные исследования в порядке личной инициативы.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ахметова И.Г., Stanimir Valtchev, Iliya K. Iliev, Ion V. Ion, Kolcun Michail, Pentiu Radu Dumitru, Андреев В.П., Аракелян Э.К., Борисов В.В., Боруш О.В., Бочкарев И.В., Брякин И.В., Ваньков Ю.В., Вафин Д.Б., Голенищев-Кутузов А.В., Грачева Е.И., Дмитриев А.В., Довгун В.П., Зверева Э.Р., Ившин И.В., Калайда М.Л., Касимов В.А., Козелков О.В., Корнилов В.Ю., Лаптев А.Г., Мещеряков В.Н., Мингалеева Г.Р., Николаева Л.А., Илюшин П.В., Сафин А.Р., Суслов К.В., Федотов А.И., Щинников П.А., Якимов Н.Д.

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-83199 от 31.03.2022 г.

Founder: Kazan State Power Engineering University

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA

Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

The Journal publishes the results of open scientific research carried out by scientists of scientific institutions, higher educational institutions, other organizations and citizens conducting research in the form of a personal initiative. The following materials are accepted for publication: original articles; scientific reviews; reviews; short messages; reference materials.

Sections:

INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT (BY TYPE OF MEASUREMENT)
(TECHNICAL SCIENCES);
METHODS AND INSTRUMENTS FOR CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS,
PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT (TECHNICAL SCIENCES);
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS (TECHNICAL SCIENCES);
ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS (TECHNICAL SCIENCES);
ELECTRIC POWER ENGINEERING (TECHNICAL SCIENCES);
ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES (TECHNICAL SCIENCES);
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING (TECHNICAL SCIENCES);
ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS (TECHNICAL SCIENCES).

EDITORIAL BOARD:

Iliya K. Iliev, Ion V. Ion, Kolcun Michail, Pentiu Radu Dumitru, Andreev Victor, Arakelyan Edik, Borisov Andrey, Borush Olesya, Bochkarev Igor, Briakin Ivan, Vankov Yury, Vafin Danil, Golenishchev-Kutuzov Alexander, Gracheva Elena, Dmitriev Andrey, Dovgun Valery, Zvereva Elvira, Igor Ivshin, Kalaida Marina, Vasil Kasimov, Kozelkov Oleg, Kornilov Vladimir, Laptev Anatoly, Meshcheryakov Viktor, Mingaleeva Guzel, Nikolaeva Larisa, Ilyushin Pavel, Safin Alfred, Suslov Konstantin, Fedotov Alexander, Shchinnikov Pavel, Yakimov Nikolay.

Address 420066, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan, 51
Krasnoselskaya str

Tel./fax: +7 (843) 527-92-76

Printing House: LLC «45»

Address of the printing house 420023, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan,
28 Chekhov str.

Email: problems_ener@mail.ru

Site: <https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

БАСЕНКО В.Р., МАНАХОВ В.А. Вибрационный контроль электротехнического оборудования с помощью программного обеспечения «DREAM v.5»	3
ДВОЙНИКОВ В.М., РАСТВОРОВА И.И., ЮРТАЕВ С.Л. Исследование измерительной системы для определения импульса осевого удара долота в процессе бурения скважин	14
СОКОЛОВ А. АПК для экспресс-оценки токсичности водных сред с использованием инфузорий <i>P. Caudatum</i>	25

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

ЗВЯГИН Л.С. Использование байесовского метода повышения точности измерений в условиях неопределенности и недостатка сведений информационно-измерительных систем	38
---	----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

МИНГАЗОВ А.Л., ФЕДОРОВ Е.Ю. Разработка и верификация методики проектирования бортовой кабельной сети летательного аппарата с учетом требований электромагнитной совместимости	49
ПЕТРОВ А.Р., ГРАЧЕВА Е.И. Разработка компьютерной модели и исследование технических и конструктивных характеристик автоматических выключателей в различных режимах эксплуатации	72

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

КАЗАК П.Р., ПАВЛЮЧЕНКО Д.А. Методологический подход к размещению зарядной инфраструктуры электромобилей в городе	85
БОРИСОВ Д.А., МАКСИМОВ В.В., ВОРКУНОВ О.В., КУРАКИНА О.Е. Методика прогнозирования нагрузки в электроэнергетических системах: алгоритм эффективного управления	99

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

СИГИТОВ О.Ю., СУСЛОВ К.В. Анализ режимов работы ветровых электростанций	112
ТАЦЕНКО М.Е., САДКИН И.С., ЩИННИКОВ П.А. Новая технология на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля	124
ЧИЧИРОВ А.А., РАЗАКОВА Р.И., ГАЙНУТДИНОВ Ф.Р., ГАЙНУТДИНОВА Д.Ф. Современные технологии хранения водородной энергии в стационарных системах: эффективность и безопасность	135

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ЦЭРЭНДОРЖ Ц., АХМЕТОВА И.Г., СУЛТАНГУЗИН И.А., КАЛЯКИН И.Д., ЛУВСАНДОРЖ Б. Повышение энергоэффективности многоквартирных домов в Улан-Баторе (Монголия)	156
ВАРФОЛОМЕЕВА О.И., ТЕНЕНЕВ В.А., ХВОРЕНКОВ Д.А. Разработка универсальной модели для численного анализа топочных процессов в теплогенерирующих установках	171

CONTENTS

METHODS AND INSTRUMENTS OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

BASENKO V.R., MANAKHOV V.A. Vibration control of electrical equipment using the software «DREAM v.5»	3
DVOYNIKOV V.M., RASTVOROVA I.I., YURTAEV S.L. Development of a measurement system for determining the axial impact pulse of a drill bit in the process of well drilling	14
SOKOLOV A. Hardware-software system for rapid toxicity assessment of aquatic environments using <i>P. Caudatum infusoria</i>	25

INFORMATION, MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS

ZVYAGIN L.S. Using the Bayesian method to improve measurement accuracy in conditions of uncertainty and lack of information from information and measurement systems	38
--	----

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

MINGAZOV A.L., FEDOROV E.Y. Designing the electrical complex of an aircraft, taking into account electromagnetic compatibility	49
PETROV A.R., GRACHEVA E.I. Development of a computer model and research of technical and design characteristics of circuit breakers in various operating modes	72

ELECTRIC POWER INDUSTRY

KAZAK P.R., PAVLUCHENKO D.A. A methodological approach to the deployment of electric vehicle charging infrastructure in urban areas	85
BORISOV D.A., MAXIMOV V.V., VORKUNOV O.V., KURAKINA O.E. The methodology of load forecasting in electric power systems: effective management algorithm	99

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

SIGITOV O.YU., SUSLOV K.V. Analysis of operating modes of wind farms	112
TATSENKO M.E., SADKIN I.S., SHCHINNIKOV P.A. New technology based on the Allam cycle with intra-cycle coal gasification	124
CHICHIROV A.A., RAZAKOVA R.I., GAINUTDINOV F.R., GAINUTDINOVA D.F. Modern hydrogen energy storage technologies in stationary systems: efficiency and safety	135

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

TSERENDORJ Ts., AKHMETOVA I.G., SULTANGUZIN I.A., KALYAKIN I.D., LUVSANDORJ B. Improving the energy efficiency of apartment buildings in Ulaanbaatar, Mongolia	156
VARFOLOMEEVA O.I., TENENEV V.A., KHVORENKOV D.A. Development of a universal model for numerical analysis of firebox processes in heat-generating plants	171

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 331.432.4

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-6-3-13

ВИБРАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «DREAM v.5»

Басенко В.Р., Манахов В.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vasiliybas123@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Современное электротехническое оборудование играет ответственную роль в работе энергетической и промышленной отрасли. Наиболее актуальной проблемой эксплуатации промышленных электрических машин является энергоэффективность. Энергоэффективность оценивается по потребляемой электрической мощности. Но также эффективность работы промышленных электрических агрегатов можно оценить по другим критериям. В частности, применяя метод вибрационного контроля можно повысить энергоэффективность работы электрического двигателя, за счет устранения неисправностей. Высокие требования к работе и эксплуатации электрооборудования накладывает, в свою очередь высокие требования и на обслуживающие их системы контроля. *ЦЕЛЬ.* Целью является проведение вибрационного контроля электротехнического оборудования с помощью программного обеспечения «DREAM v.5». *МЕТОДЫ.* Применяется метод неразрушающего контроля электрооборудования на основе спектрального анализа вибрационных параметров с помощью программного обеспечения «DREAM v.5». *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проведён спектральный анализ вибрационных характеристик промышленного электрооборудования на основе программного обеспечения «DREAM v.5» и измерительного оборудования СД-23. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Внедрение «DREAM v.5» в систему вибрационного контроля позволяет повысить эффективность проведения вибрационного контроля электрооборудования. Интуитивно понятный интерфейс и визуализация данных облегчают процесс интерпретации результатов измерений, что дает возможность оперативно оценивать состояние оборудования и принимать обоснованные решения.

Ключевые слова: контроль электрооборудования; вибрационные параметры; программное обеспечение «DREAM v.5»; спектральный анализ.

Для цитирования: Басенко В.Р., Манахов В.А. Вибрационный контроль электротехнического оборудования с помощью программного обеспечения «DREAM v.5» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 3-13. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-3-13.

VIBRATION CONTROL OF ELECTRICAL EQUIPMENT USING THE SOFTWARE «DREAM v.5»

Basenko V.R., Manakhov V.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vasiliybas123@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Modern electrical equipment plays a critical role in the energy and

industrial sectors. The most pressing problem in the operation of industrial electrical machines is energy efficiency. Energy efficiency is assessed by the electrical power consumed. But the efficiency of industrial electrical units can also be assessed by other criteria. Using the vibration monitoring method, it is possible to increase the energy efficiency of an electric motor by eliminating faults. High requirements for the operation and maintenance of electrical equipment, in turn, impose high requirements on the control systems that service them. GOAL. The goal is to conduct vibration testing of electrical equipment using the DREAM v.5 software. METHODS. The method of non-destructive testing of electrical equipment is used based on spectral analysis of vibration parameters using the DREAM v.5 software. RESULTS. Spectral analysis of vibration characteristics of industrial electrical equipment was carried out using the DREAM v.5 software and SD-23 measuring equipment. CONCLUSION. The introduction of "DREAM v.5" into the vibration control system makes it possible to increase the efficiency of vibration control of electrical equipment. An intuitive interface and data visualization facilitate the process of interpreting measurement results, which makes it possible to quickly assess the condition of equipment and make informed decisions.

Keywords: *electrical equipment control; vibration parameters; software "DREAM v.5"; spectral analysis.*

For citation: Basenko V.R., Manakhov V.A. Vibration control of electrical equipment using the software «DREAM v.5». *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 3-13. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-3-13.

Введение (Introduction)

Программное обеспечение для вибродиагностики представляет собой высокотехнологичный инструмент, разработанный для оценки состояния и диагностики машин и механизмов на основе анализа вибрационных сигналов. Используя передовые алгоритмы обработки данных и искусственного интеллекта, данная система позволяет не только выявлять существующие неисправности, но и прогнозировать потенциальные отказы, основываясь на исторических данных и трендах.

Функционал программного обеспечения включает в себя мониторинг состояния оборудования в реальном времени, анализ спектров вибраций, а также генерацию отчетов о состоянии механизмов. Пользователи могут устанавливать индивидуальные параметры для различных типов оборудования, что делает систему универсальным решением для предприятий различных секторов.

Кроме того, программное обеспечение поддерживает интеграцию с другими системами управления производственными процессами, что значительно повышает эффективность эксплуатации оборудования. Благодаря интуитивно понятному интерфейсу и расширенным возможностям анализа, пользователи могут быстро усваивать даже самые сложные методы вибродиагностики, минимизируя время на обучение и повышая продуктивность работы. Современными разработчиками программного обеспечения для вибродиагностики являются компании ВАСТ, ДИАМЕХ, VIBEX. Программные алгоритмы данных производителей ориентированы на цифровую обработку вибрационных сигналов, измеренных от работающего электрооборудования. Обработка вибрационных сигналов электрооборудования является важной задачей в области диагностики и мониторинга состояния машин. Современные технологии позволяют эффективно анализировать вибрационные колебания, которые могут служить индикаторами различных неисправностей. Использование высокочувствительных датчиков, установленных на критических узлах оборудования, обеспечивает сбор данных о вибрациях в реальном времени.

Процесс обработки сигналов включает в себя фильтрацию, спектральный анализ и применение методов машинного обучения для выявления аномалий. Спектрограмма, полученная в результате анализа, позволяет визуализировать частотные характеристики вибраций и определить, какие из них выходят за пределы нормы. Это, в свою очередь, способствует раннему выявлению дефектов и предотвращению дорогостоящих простоев. Современное программное обеспечение, основанное на анализе вибрационных сигналов, становится неотъемлемой частью управления техническим обслуживанием. Она позволяет не только продлить срок службы оборудования, но и повысить его надежность и эффективность. В конечном счёте, комплексный подход к обработке вибрационных сигналов способствует созданию безопасной и устойчивой производственной среды.

Литературный обзор (Literature Review)

Современная промышленность предъявляет высокие требования к надежности и безопасности электротехнического оборудования. Вибрационный контроль играет ключевую роль в обеспечении бесперебойной работы и предотвращении аварийных ситуаций. В настоящее время вибрационный контроль является одним из наиболее эффективных методов диагностики состояния электротехнического оборудования. Он позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях их развития, предотвращая серьезные аварии и снижая затраты на ремонт [1, 2]. Применение программного обеспечения значительно расширяет возможности вибрационного контроля, автоматизируя процесс сбора, обработки и анализа данных. Существующие программные комплексы, такие как LabVIEW, MATLAB и специализированные пакеты от производителей оборудования, предоставляют широкий набор инструментов для вибрационного анализа. Они позволяют выполнять спектральный анализ, вейвлет-преобразование, анализ огибающей и другие методы для выявления характерных признаков дефектов. Анализ литературных источников показывает, что эффективность вибрационного контроля существенно зависит от правильного выбора параметров датчиков, частоты дискретизации и методов обработки данных. Важным аспектом является создание эталонных моделей вибрации для оборудования в нормальном состоянии, что позволяет более точно идентифицировать отклонения [3]. Внедрение программного обеспечения для вибрационного контроля требует квалифицированного персонала, способного интерпретировать результаты анализа и принимать обоснованные решения по обслуживанию оборудования. Дальнейшие исследования направлены на разработку интеллектуальных систем, способных автоматически диагностировать состояние оборудования и прогнозировать сроки его службы.

Сравнивая «DREAM v.5» с такими универсальными платформами, как LabVIEW и MATLAB, необходимо учитывать принципиальные различия в их целевом назначении. LabVIEW, разработанный National Instruments, ориентирован на создание систем сбора и обработки данных, управления приборами и автоматизации измерений. MATLAB, от MathWorks, является средой для численных расчетов, моделирования и разработки алгоритмов. Оба эти решения предлагают широкий спектр инструментов и библиотек для решения разнообразных задач, включая анализ данных и моделирование энергоэффективности [4]. В отличие от «DREAM v.5», LabVIEW и MATLAB не являются специализированными решениями для мониторинга и управления энергопотреблением. Они требуют значительных усилий по разработке и настройке для создания полноценной системы, способной выполнять те же функции, что и «DREAM v.5». Кроме того, универсальность этих платформ может привести к избыточности функционала и усложнению процесса внедрения. «DREAM v.5», напротив, разработан специально для решения задач в области энергоэффективности и предлагает готовые инструменты для сбора, анализа и визуализации данных, а также для оптимизации режимов работы оборудования. Интегрированный подход и интуитивно понятный интерфейс позволяют пользователям быстро освоить систему и начать получать результаты, не тратя время на разработку собственных решений [5]. Выбор между «DREAM v.5» и универсальными платформами, такими как LabVIEW и MATLAB, зависит от конкретных потребностей и ресурсов организации. Если требуется специализированное решение для мониторинга и управления энергопотреблением, «DREAM v.5» является более предпочтительным вариантом. Если же необходимо решать широкий спектр задач, включая анализ данных и моделирование, LabVIEW и MATLAB могут предложить более гибкие возможности.

Программное обеспечение «DREAM v.5» представляет собой мощный инструмент для мониторинга и анализа вибрационных характеристик. Ранее проводились исследования, демонстрирующие эффективность различных методов вибрационной диагностики. Однако, «DREAM v.5» выделяется комплексным подходом, объединяющим сбор данных, анализ спектра, выявление трендов и автоматическую генерацию отчетов. Это позволяет оперативно выявлять даже незначительные отклонения от нормы. Данный программный продукт интегрирует в себе алгоритмы машинного обучения, что обеспечивает прогностическую аналитику [6]. Благодаря этому, возможно прогнозирование остаточного ресурса оборудования и планирование профилактических мероприятий, что, в свою очередь, снижает издержки, связанные с внеплановыми остановками и ремонтами. «DREAM v.5», позиционируемый как передовое решение в своей области, безусловно, демонстрирует ряд впечатляющих преимуществ [7]. Среди них стоит отметить улучшенную скорость обработки данных, более интуитивный интерфейс и расширенный набор инструментов для аналитики. Однако, несмотря на заявленную инновационность, «DREAM

v.5» не лишен недостатков, которые необходимо учитывать при выборе оптимального решения.

Одним из ключевых преимуществ является его способность интегрироваться с существующими системами предприятия без значительных перебоев в работе. Это выгодно отличает его от конкурентов, требующих сложной и дорогостоящей перенастройки инфраструктуры, например таких как «АГАТ» или «VIBROLASER». В то же время, одним из критических недостатков является высокая стоимость лицензии и технической поддержки. По сравнению с аналогами, «DREAM v.5» требует значительных инвестиций, что может стать препятствием для малого и среднего бизнеса.

«DREAM v.5» представляет собой мощный инструмент, обладающий как значительными преимуществами, так и определёнными недостатками. Окончательное решение о его внедрении должно основываться на тщательном анализе потребностей и возможностей конкретного предприятия, а также сопоставлении с альтернативными решениями, доступными на рынке. Программное обеспечение также обеспечивает возможность интеграции с другими системами управления предприятием [8]. Это позволяет создать единую информационную среду, в которой данные вибрационного контроля используются для оптимизации производственных процессов и повышения общей эффективности работы предприятия. «DREAM v.5» соответствует современным стандартам безопасности и обеспечивает защиту данных от несанкционированного доступа. Система имеет гибкие настройки, позволяющие адаптировать ее к требованиям конкретного предприятия и типу оборудования. Программное обеспечение «DREAM v.5» представляет собой передовое решение для вибрационного контроля электротехнического оборудования. Его внедрение способствует повышению надежности, безопасности и эффективности работы предприятия.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для проведения вибрационного контроля электротехнического оборудования использовался программный комплекс «DREAM v.5». Данное программное обеспечение предназначено для сбора, обработки и анализа данных вибрации, а также для диагностики состояния оборудования на основе полученных результатов. В качестве объекта исследования был выбран электродвигатель промышленной мельницы. Выбор обусловлен широким распространением данного оборудования на промышленных предприятиях и его значительным влиянием на общую надёжность технологических процессов. Измерения вибрации проводились с помощью портативного виброметра. Датчики устанавливались на корпусах оборудования в точках, определённых в соответствии с нормативной документацией и рекомендациями производителей.

Программное обеспечение «DREAM v.5» представляет собой значительный шаг вперёд в области мониторинга и анализа энергоэффективности, превосходя такие известные аналоги, как «АГАТ» и «VIBROLASER» по ряду ключевых параметров. В отличие от аналогов, «DREAM v.5» предлагает интегрированный подход к управлению энергопотреблением, объединяя в себе расширенные возможности сбора данных, интеллектуального анализа и визуализации.

Одним из ключевых преимуществ «DREAM v.5» является улучшенная точность и детализация данных. Благодаря использованию передовых алгоритмов обработки сигналов и новых сенсорных технологий, система способна отслеживать мельчайшие изменения в энергопотреблении оборудования, выявлять скрытые потери энергии и оптимизировать режимы работы в реальном времени. Кроме того, «DREAM v.5» обладает интуитивно понятным интерфейсом, который упрощает процесс анализа данных и принятия решений. Пользователи могут легко создавать настраиваемые отчеты, визуализировать тренды энергопотребления и получать автоматические уведомления о нештатных ситуациях.

В числе новых возможностей, направленных на повышение энергоэффективности, следует выделить:

- **Предиктивный анализ:** «DREAM v.5» использует алгоритмы машинного обучения для прогнозирования энергопотребления и выявления потенциальных проблем до того, как они приведут к значительным потерям энергии.

- **Оптимизация режимов работы:** Система предлагает рекомендации по оптимизации режимов работы оборудования на основе анализа данных и моделирования различных сценариев.

- **Интеграция с системами управления зданием (BMS):** «DREAM v.5» легко интегрируется с существующими BMS, что позволяет централизованно управлять энергопотреблением и повышать эффективность использования ресурсов.

Работа в программном обеспечении «DREAM v.5» требует внимательного изучения интерфейса и функциональных возможностей. Необходимо ознакомиться с основными панелями инструментов, меню и настройками. Основное внимание уделяется разделам, отвечающим за ввод данных, обработку результатов и визуализацию. Важным этапом является настройка параметров моделирования в соответствии с конкретными задачами и условиями. Проведение исследований с различными значениями вибрационных параметров, позволяет понять их влияние на результаты в программном обеспечении «DREAM v.5». Необходимо сохранять резервные копии проектов перед внесением изменений. При работе с данными внимание уделяется их качеству и формату. Необходимо убедиться, что все необходимые поля заполнены корректно и соответствуют требованиям программы. Используйте инструменты валидации и очистки данных для повышения точности результатов.

Программа «DREAM v.5» предназначена для работы с переносными приборами серии СД, стационарных и стендовых системах. Основные функции программы «DREAM v.5»:

1. Вибрационный мониторинг и контроль машин и оборудования в соответствии с действующими стандартами.
2. Расширенный мониторинг состояния машин и оборудования с использованием разных видов сигналов.
3. Глубокая диагностика и прогноз технического состояния узлов роторных машин.
4. Обнаружение, идентификация и отслеживание развития дефектов, прогноз состояния таких узлов, как роторы, подшипники, зубчатые передачи, рабочие колеса, электромагнитные системы электрических машин и других.
5. Накопление и хранение информации о вибрационном и техническом состоянии отдельных узлов и машин в целом.
6. Формирование отчетов.

Функции программного обеспечения могут быть расширены с помощью дополнительных обновлений, предоставляемых на официальном сайте ООО «Ассоциация ВАСТ»: www.vibrotek.ru.

Граничные значения вибрационных параметров, контролируемых с помощью программного обеспечения «DREAM v.5», выделены на основе международных и национальных стандартов в области вибрационного контроля.

На основе измерений вибрации выносится заключение о работе промышленного оборудования. Руководящими документами здесь являются:

- ГОСТ 24346-80 Вибрация. Термины и определения;
- ГОСТ ИСО 10816-1-97 Межгосударственный стандарт. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования;
- ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 об/мин;
- ГОСТ 31350-2007 Вибрация. Вентиляторы промышленные. Требования к производимой вибрации и качеству балансировки.

Проведение спектрального анализа промышленного электротехнического оборудования с помощью программного обеспечения «DREAM v.5»

В рамках данного исследования проведен вибрационный контроль оборудования промышленной мельницы МПС-М, предназначенной для измельчения элементов производства стекла. Внешний вид промышленной мельницы МПС-М представлен на рисунке 1.

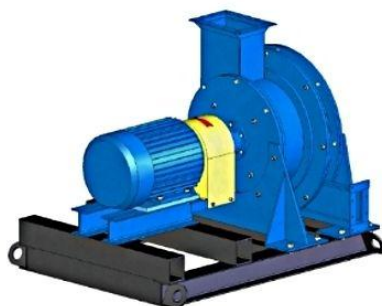


Рис. 1. Промышленная мельница МПС-М

Fig. 1. Industrial mill MPS-M

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Технические характеристики исследуемой мельницы представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Технические характеристики промышленной мельницы МПС-М
Technical characteristics of the industrial mill MPS-M

Параметры	Значения
Расчетная производительность, кг/ч	1000
Входящая фракция d_n , мм	5
Выходящая фракция d_k , мм	1
Электродвигатель:	
Мощность, кВт	15,0
Число оборотов, об/мин	3000
Напряжение, В	380
Масса дробилки, кг	900

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

С помощью прибора СД-23, находящегося в лабораторной базе ФГБОУ ВО «КГЭУ» кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» проведено измерение спектра виброскорости. Прибор СД-23 ВАСТ характеризуется следующими предельными значениями погрешностей при стандартных условиях эксплуатации (температура 25°C, влажность 50%):

- основная относительная погрешность виброанализатора в комплекте с акселерометрами серии 6ХХ, %, не более 5%;
- основная относительная погрешность виброанализатора в комплекте с вибропреобразователями типа АР20ХХ, %, не более 7%.

Более подробная информация о методах оценки погрешностей и факторах, влияющих на точность измерений, представлена в руководстве по эксплуатации прибора.

Результаты измерений представлены на рисунках 2 и 3. Основная амплитуда виброскорости находится на при данных измерениях определялась на частоте 38,2 Гц (2292 об/мин). Вертикальное направление – 15,7 мм/с, горизонтальное направление – 51 мм/с.

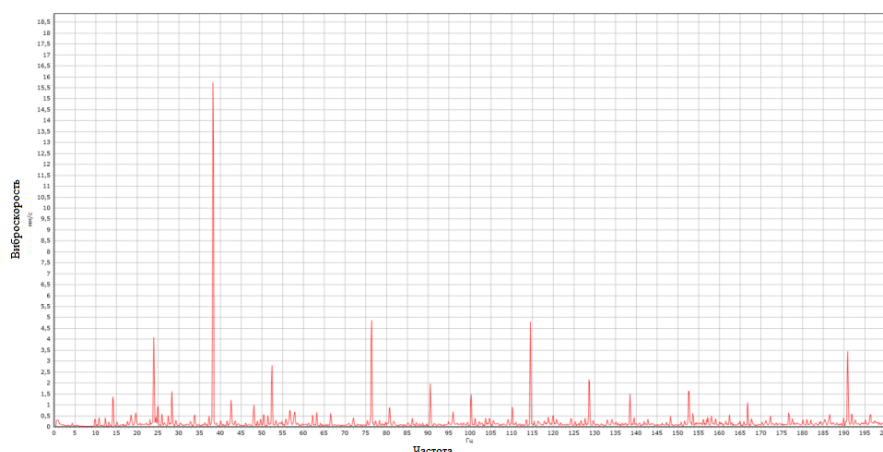


Рис. 2. Спектр виброскорости подшипника промышленной мельницы МПС-М. Вертикальное направление
Fig. 2. Vibration velocity spectrum of the bearing of the industrial mill MPS-M. Vertical direction

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Высокие амплитуды на характерных частотах сигнализируют о прогрессирующем развитии дефекта. Важно отслеживать динамику изменения амплитуд во времени для прогнозирования остаточного ресурса подшипника. В вертикальном направлении (рис. 2) определились следующие гармонические составляющие – 2 (76 Гц, 4,9 мм/с), 3 (114 Гц – 4,8 мм/с), 4 (153 Гц – 1,5 мм/с), 5 (191 Гц – 3,5 мм/с). Частота 76 Гц часто указывает на проблемы с внешним кольцом подшипника. Дефекты, такие как сколы, трещины или износ

на внешней поверхности кольца, приводят к импульсным вибрациям при прохождении тел качения (шариков или роликов) через поврежденный участок. Эти импульсы повторяются с частотой, определяемой скоростью вращения внешнего кольца, что в свою очередь порождает гармоники в спектре вибрации. Частота 114 Гц может указывать на дефект тел качения (шариков или роликов). Повреждения, такие как сколы, трещины или локальный износ на поверхности тел качения, также вызывают импульсные вибрации при контакте с дорожками качения. Частота этих импульсов связана со скоростью вращения тел качения, что создает гармоники в спектре вибрации. Важно отметить, что точная идентификация источника дефекта требует детального анализа спектра вибрации, а также учета других факторов, таких как скорость вращения вала, тип подшипника и условия эксплуатации. Однако, обнаружение гармоник на частотах 76 Гц и 114 Гц является веским основанием для проведения дополнительной диагностики подшипника и принятия мер по предотвращению его дальнейшего повреждения и возможного выхода из строя. Своевременная замена подшипника может предотвратить более серьезные поломки оборудования и избежать дорогостоящих простоев.

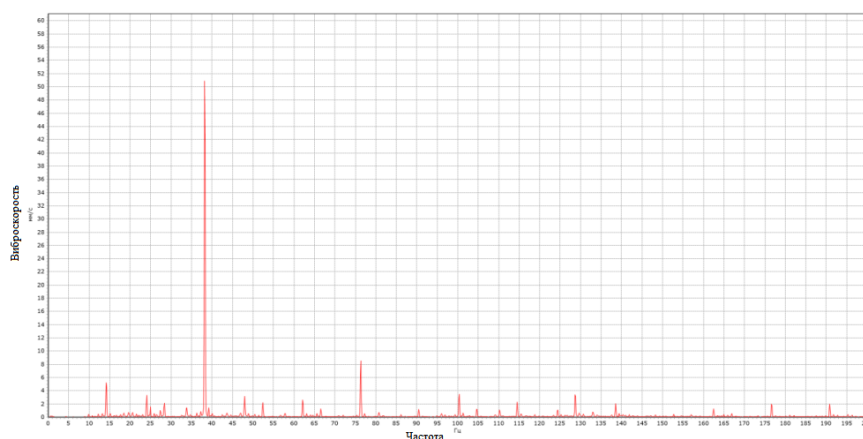


Рис. 3. Спектр виброскорости подшипника промышленной мельницы МПС-М. Горизонтальное направление

Fig. 3. Vibration velocity spectrum of the bearing of the industrial mill MPS-M. Horizontal direction

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По результатам спектрального анализа подшипника промышленной мельницы МПС-М получены следующие результаты: вертикальное направление, возникли гармоники – 2 (76 Гц – 4,9 мм/с), 3 (114 Гц – 4,8 мм/с), 4 (153 Гц – 1,5 мм/с), 5 (191 Гц – 3,5 мм/с). Поперечное направление возникли гармоники – 2 (76 Гц – 8,5 мм/с), 3 (114 Гц – 2,2 мм/с), 5 (191 Гц – 2 мм/с). В результате принято следующее заключение о состоянии подшипника: необходима диагностика подшипников и двигателя после укрепления фундамента, также проведение измерений контурных характеристик представленного оборудования (согласно РД 34.21.306-96, пункт 3.4.5.). Дополнительно необходимо проверить параметр разгон-выбег для электродвигателя промышленной мельницы МПС-М.

ГОСТ 10816-3, в частности, предоставляет классификацию вибрационного состояния машин, разделяя их на зоны: А (нормальная работа), В (удовлетворительная работа), С (неудовлетворительная работа) и D (недопустимая работа). Эта классификация основывается на среднеквадратичном значении виброскорости и позволяет инженерам оперативно оценивать состояние оборудования. Сравнение с нормами ГОСТ 10816-3 позволяет классифицировать уровень вибрации оборудования по нескольким категориям, от «отличного» до «недопустимого», что облегчает принятие решений о планировании профилактических мероприятий и сроках замены изношенных компонентов. Это особенно важно для критически важного оборудования, выход из строя которого может привести к серьезным последствиям, таким как остановка производственного процесса или аварийные ситуации. В данной работе результаты показали вхождение агрегата на границу зон В и С, что говорит об удовлетворительной работе, но необходимом дополнительном контроле. Для подшипников, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, таких как высокая запыленность, повышенная температура или переменные нагрузки, рекомендуется установить более высокую частоту измерений (как в данной работе, 5 измерений на одну точку, с дисперсией не более 3). Также, если мельница МПС-М используется в критически важных производственных процессах, остановка которых приводит к значительным

убыткам, целесообразно проводить измерения чаще, чтобы минимизировать риск внезапных поломок. При определении частоты измерений необходимо учитывать доступность оборудования и квалификацию персонала. Если для проведения измерений требуется остановка мельницы, то необходимо учитывать время простоя и связанные с этим затраты. В этом случае, возможно, целесообразно использовать системы непрерывного мониторинга вибрации, которые позволяют получать данные в режиме реального времени и выявлять дефекты на ранних стадиях развития.

Заключение (Conclusions)

Проведение спектрального анализа промышленного электротехнического оборудования с помощью программного обеспечения «DREAM v.5» позволило выявить ключевые гармонические составляющие в сигналах виброскорости исследуемого промышленного оборудования. Полученные данные дают возможность оценить степень технического состояния элементов электротехнического оборудования и оценить потенциальное негативное воздействие на работу оборудования. Сформированы рекомендации по внедрению процедур обслуживания электротехнического оборудования на основе спектрального анализа для повышения качества работы. Результаты исследования могут быть использованы для разработки мер по оптимизации энергопотребления и предотвращению аварийных ситуаций, связанных с гармоническими искажениями в электросетях предприятия. Дальнейшие исследования должны быть направлены на моделирование работы фильтров и оценку их эффективности в реальных условиях эксплуатации. Одним из ключевых улучшений, привнесенных «DREAM v.5», является повышение точности. Алгоритмы машинного обучения, используемые в системе, обучаются на обширных наборах данных, что позволяет им с большей точностью выявлять проблемные места и предсказывать потенциальные сбои. Это приводит к сокращению количества ложных срабатываний и ложных отрицаний, что, в свою очередь, повышает эффективность диагностики и снижает затраты, связанные с ненужными исправлениями. «DREAM v.5» значительно ускоряет процесс диагностики. Автоматизация позволяет системе анализировать данные гораздо быстрее, чем это возможно при ручном анализе. Это особенно важно в ситуациях, когда требуется быстрое выявление и устранение проблем, например, в критически важных инфраструктурах или производственных процессах. Быстрая диагностика позволяет минимизировать время простоя и предотвратить серьезные последствия.

Для углубленного изучения и расширения практического применения вибрационного контроля электротехнического оборудования с использованием программного обеспечения «DREAM v.5» рекомендуется сосредоточиться на следующих направлениях:

1. Разработка специализированных алгоритмов анализа. Необходимо создание алгоритмов, адаптированных под специфику различных типов электротехнического оборудования, учитывающих их конструктивные особенности и типичные дефекты.
2. Интеграция с системами предиктивной аналитики. Интеграция «DREAM v.5» с системами предиктивной аналитики позволит перейти от констатации текущего состояния оборудования к прогнозированию его будущего состояния и заблаговременному планированию ремонтных работ.
3. Создание базы данных эталонных вибрационных сигналов. Формирование обширной базы данных, содержащей эталонные вибрационные сигналы исправного и дефектного оборудования, значительно повысит точность и надежность диагностики.
4. Автоматизация процесса формирования отчетов. Разработка функционала автоматического формирования отчетов о результатах вибрационного контроля позволит сократить время на обработку данных и облегчить процесс принятия решений.

Реализация этих рекомендаций позволит значительно повысить эффективность вибрационного контроля электротехнического оборудования, снизить риски аварий и повысить надежность работы энергосистем.

Проведенный анализ и практическое применение программного обеспечения «DREAM v.5» продемонстрировали его высокую эффективность в диагностике и мониторинге вибрационного состояния электротехнического оборудования. Внедрение системы позволяет своевременно выявлять дефекты на ранних стадиях, предотвращая аварийные ситуации и снижая затраты на ремонт. «DREAM v.5» обеспечивает комплексный подход к вибрационному контролю, объединяя сбор данных, анализ спектральных характеристик и формирование отчетов. Целесообразно провести исследования по интеграции программного обеспечения «DREAM v.5» с другими системами мониторинга и управления, используемыми на предприятиях. Это позволит

создать комплексную систему диагностики и управления электротехническим оборудованием, обеспечивающую повышение надежности и эффективности его работы. Важным аспектом является разработка интерфейсов для обмена данными с SCADA-системами и другими платформами. Следует уделить внимание разработке специализированных модулей для анализа вибрации конкретных типов электротехнического оборудования, таких как трансформаторы, выключатели, генераторы и электродвигатели. Это позволит учитывать специфические особенности каждого типа оборудования и повысить точность диагностики его состояния. Необходимо также изучить возможность применения новых методов анализа вибрации, таких как вейвлет-анализ и анализ огибающей, для выявления дефектов на ранних стадиях их развития.

Литература

1. Редников С. Н. и др. Диагностика электротехнических компонентов гидротехнического оборудования: эффективность комплексного подхода //Агроинженерия. – 2024. – Т. 24. – №. 2. – С. 71-77.
2. Скворцов О. Б., Сташенко В. И. Динамические механические нагрузки на проводящие элементы электромеханического оборудования, связанные с воздействием электрических и магнитных полей //ББК 22.9 М 39 Редакционная коллегия: д-р физ.-мат. наук, профессор ВЕ Громов, д-р. техн. наук, доцент ДВ Загуляев. – 2023. – Т. 13. – С. 91.
3. Губарев В. А. Современные методы вибрационного контроля высоковольтных трансформаторов // Инновационный путь развития как ответ на вызовы нового времени. – 2021. – С. 23-26.
4. Зеленина А. И. Проектирование Ярнемской ГЭС на реке Онега. Система вибрационного контроля гидроагрегата : дис. – Сибирский федеральный университет; Саяно-Шушенский филиал СФУ, 2023.
5. Зайниев А. В., Шайдуллин В. Ф., Хакимьянов М. И. Анализ современных методов диагностирования газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами на объектах добычи нефти //Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19. – №. 3. – С. 133-144.
6. Li J. Y., Zhu S. Self-powered active vibration control: concept, modeling, and testing //Engineering. – 2022. – Т. 11. – С. 126-137.
7. Пивень И. С. Обеспечение надежности и диагностика дефектов гидроэнергетического оборудования: анализ неисправностей и методы вибрационной диагностики //Вестник науки. – 2025. – Т. 4. – №. 1 (82). – С. 1215-1223.
8. Crocker M. J., Arenas J. P. Engineering acoustics: noise and vibration control. – John Wiley & Sons, 2021.
9. Zhao Q. et al. Vibration control of a rotor system by shear thickening fluid dampers //Journal of Sound and Vibration. – 2021. – Т. 494. – С. 115883.
10. Jin X. et al. Robust vibration control for active suspension system of in-wheel-motor-driven electric vehicle via μ -synthesis methodology //Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2022. – Т. 144. – №. 5. – С. 051007.
11. Моделирование работы оборудования мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта с целью подтверждения соответствия группам климатического и механического исполнения / Т. И. Петров, А. Р. Сафин, Е. И. Грачева [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.
12. Разработка макета мобильной установки заряда электротранспорта и стенда для проведения испытаний / А. Р. Сафин, А. Н. Цветков, Т. И. Петров [и др.] // Естественные и технические науки. – 2023. – № 7(182). – С. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN NZWEGG.
13. Анализ технического уровня разработок в области мобильных зарядных установок для электротранспорта / А. Р. Сафин, В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 55-64. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64. – EDN BJTZLX.
14. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 190. – P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9_17. – EDN EIGGGZ.
15. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин, О. В. Владимиров //

Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

16. Wen B. et al. Vibration utilization engineering. – Cham : Springer, 2022. – С. 57.

Авторы публикации

Басенко Василий Романович – преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия. vasiliybas123@mail.ru

Манахов Валерий Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия.

References

1. Rednikov S. N. et al. Diagnostics of electrical components of hydraulic equipment: the effectiveness of an integrated approach // Agroengineering. - 2024. - Vol. 24. - No. 2. - P. 71-77.
2. Skvortsov O. B., Stashenko V. I. Dynamic mechanical loads on conductive elements of electromechanical equipment associated with the impact of electric and magnetic fields // BKB 22.9 M 39 Editorial board: Dr. of Phys. and Mathematics, Professor V. E. Gromov, Dr. of Engineering Sciences, Associate Professor D. V. Zagulyaev. – 2023. – V. 13. – P. 91.
3. Gubarev V. A. Modern methods of vibration control of high-voltage transformers // Innovative path of development as a response to the challenges of the new time. – 2021. – P. 23-26.
4. Zelenina A. I. Design of the Yarnemskaya HPP on the Onega River. Vibration control system of a hydraulic unit: dis. – Siberian Federal University; Sayano-Shushensky branch of SFU, 2023.
5. Zayniev A. V., Shaidullin V. F., Khakimyanov M. I. Analysis of modern methods of diagnostics of gas piston units with synchronous generators at oil production sites // Electrical and information complexes and systems. - 2023. - Vol. 19. - No. 3. - P. 133-144.
6. Li J. Y., Zhu S. Self-powered active vibration control: concept, modeling, and testing // Engineering. - 2022. - Vol. 11. - P. 126-137.
7. Piven I. S. Ensuring reliability and diagnostics of defects in hydropower equipment: fault analysis and vibration diagnostics methods // Science Bulletin. - 2025. - Vol. 4. - No. 1 (82). - P. 1215-1223.
8. Crocker M. J., Arenas J. P. Engineering acoustics: noise and vibration control. - John Wiley & Sons, 2021.
9. Zhao Q. et al. Vibration control of a rotor system by shear thickening fluid dampers // Journal of Sound and Vibration. - 2021. - Vol. 494. - P. 115883.
10. Jin X. et al. Robust vibration control for active suspension system of in-wheel-motor-driven electric vehicle via μ -synthesis methodology // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2022. – Vol. 144. – No. 5. – P. 051007.
11. Modeling the operation of mobile charging station equipment for charging electric vehicles in order to confirm compliance with climatic and mechanical performance groups / T. I. Petrov, A. R. Safin, E. I. Gracheva [et al.] // Bulletin of Moscow State Technical University. Transactions of Murmansk State Technical University. – 2022. – Vol. 25, No. 4. – P. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.
12. Development of a mock-up of a mobile electric transport charging unit and a test rig / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, T. I. Petrov [et al.] // Natural and technical sciences. - 2023. - No. 7 (182). - P. 138-145. - DOI 10.25633 / ETN.2023.07.09. - EDN NZWEGG.
13. Analysis of the technical level of developments in the field of mobile charging units for electric transport / A. R. Safin, V. R. Basenko, M. F. Nizamiyev [et al.] // News of higher educational institutions. Problems of energy. - 2023. - Vol. 25, No. 3. - P. 55-64. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64. – EDN BJTZLX.
14. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 190. – P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9_17. – EDN EIGGGZ.
15. 3D model of a power transformer for studying its technical condition based on vibration parameters / V. R. Basenko, M. F. Nizamiyev, I. V. Ivshin, O. V. Vladimirov // News of higher educational institutions. Problems of power engineering. - 2022. - Vol. 24, No. 3. - P. 130-143. - DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. - EDN TTLTLL.
16. Wen B. et al. Vibration utilization engineering. - Cham : Springer, 2022. - P. 57.

Authors of the publication

Vasily R. Basenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
vasiliybas123@mail.ru

Valery A. Manakhov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **19.03.2025 г.**

Отредактировано **12.08.2025 г.**

Принято **01.10.2025 г.**



ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИМПУЛЬСА ОСЕВОГО УДАРА ДОЛОТА В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Двойников В.М., Растворова И.И., Юртаев С.Л.

Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

vladimir24032000@gmail.com

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Фактическая нагрузка на долото состоит из динамической и статической нагрузки. Высокая степень неоднородности горной породы, а также недостаточная объективность оценки напряженно-деформированного состояния бурового инструмента приводит к невозможности определения фактической нагрузки на долото и, как следствие, к снижению эффективности бурения скважин. На практике в телеметрической системе устанавливается трех осевой акселерометр для измерения частоты колебаний бурового долота. Однако измерительные приборы, способные определять объективный импульс ударов, в настоящее время отсутствуют. **ЦЕЛЬ** данной работы является разработка измерительной системы для определения импульса осевых колебаний при бурении скважин на основе динамики слабо сжимаемых жидкостей. **МЕТОДЫ.** В рамках работы проанализированы недостатки существующих измерительных систем, применяемых в роторном бурении скважин. Получена расчетная формула корреляции давления жидкости в герметичной гидравлической системе и динамики внешнего осевого воздействия на систему. Разработан прототип измерительной системы, основанный на теоретически полученных математических закономерностях. Для измерительной системы разработана программа, в которой реализован комбинированный фильтр, повышающий качество выходных данных, а также метод взаимной корреляции для выделения отдельных ударов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложена методология для измерения импульса осевых ударов на основе гидравлического цилиндра, устанавливаемого в непосредственной близости к долоту, и комплекса датчиков для измерения состояния жидкости внутри цилиндра. Была разработана модель измерительной системы.

Ключевые слова: бурение; вибрации; измерительная система; MWD; гидродинамика; импульс удара.

Для цитирования: Двойников В.М., Растворова И.И., Юртаев С.Л. Исследование измерительной системы для определения импульса осевого удара долота в процессе бурения скважин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 14-24. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-14-24.

DEVELOPMENT OF A MEASUREMENT SYSTEM FOR DETERMINING THE AXIAL IMPACT PULSE OF A DRILL BIT IN THE PROCESS OF WELL DRILLING

Dvoynikov V.M., Rastvorova I.I., Yurtaev S.L.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

vladimir24032000@gmail.com

Abstract: **RELEVANCE.** The actual load on the drill bit consists of dynamic and static loads. The high degree of heterogeneity of the rock, as well as the insufficient objectivity in assessing the stress-strain state of the drilling tool, leads to the inability to determine the actual load on the bit and, consequently, to a decrease in the efficiency of well drilling. In practice, a three-axis accelerometer is installed in the telemetry system to measure the frequency of vibrations of the drill bit. However, measuring devices capable of determining the objective impact pulse are currently lacking. **THE PURPOSE** of this work is to develop a measurement system for determining the pulse of axial vibrations during well drilling based on the dynamics of weakly compressible fluids. **METHODS.** This work analyzes the shortcomings of existing measurement

systems used in rotary drilling of wells. A calculation formula has been obtained that correlates the pressure of the fluid in a sealed hydraulic system with the dynamics of external axial forces acting on the system. A prototype of the measurement system has been developed based on theoretically derived mathematical patterns. A program has been created for the measurement system, which implements a low-frequency filter to enhance the quality of output data, as well as a method of mutual correlation to isolate individual impacts. RESULTS. A methodology for measuring the pulse of axial impacts has been proposed based on a hydraulic cylinder installed in close proximity to the bit, along with a set of sensors to measure the state of the fluid inside the cylinder. A model of the measurement system has been developed.

Keywords: drilling; vibrations; measurement system; MWD; hydrodynamics; impact pulse.

For citation: Dvoynikov V.M., Rastvorova I.I., Yurtaev S.L. Development of a measurement system for determining the axial impact pulse of a drill bit in the process of well drilling. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (6): 14-24. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-14-24.

Введение (Introduction)

Фактическая нагрузка на долото состоит из динамической и статической нагрузки. Высокая степень неоднородности горной породы [1], а также недостаточная объективность оценки напряженно-деформированного состояния бурового инструмента приводит к невозможности определения фактической нагрузки на долото и, как следствие, к снижению эффективности бурения скважин [2].

Например, при роторном бурении скважин с использованием гидравлических забойных двигателей могут возникать неконтролируемые колебания бурильной колонны. Колебания вызывают мгновенную и неконтролируемую вибрацию, в том числе продольные удары компоновки низа бурильной колонны (КНБК) о породу, что приводит к резкому падению механической скорости бурения, потере продольной устойчивости инструмента и риску возникновения аварийных ситуаций в скважине.

На практике в телеметрической системе устанавливается трехосевой акселерометр для измерения частоты колебаний бурового долота. Однако измерительные приборы, способные определять объективный импульс ударов, в настоящее время отсутствуют [3, 4].

Эмпирические зависимости, определяющие технико-технологические параметры бурения скважин, до сих пор не сведены в единую базу данных. Это связано с отсутствием корреляционных алгоритмов, способных связать статическую и динамическую составляющие нагрузки на долото.

Целью данной работы является разработка измерительной системы для определения импульса осевых колебаний при бурении скважин на основе динамики слабо сжимаемых жидкостей.

Научная значимость работы состоит в применении нового подхода измерения осевых колебаний в процессе роторного бурения скважин, который позволяет количественно оценить значения импульса продольных ударов. Новизна подхода состоит в оценке динамических и статических свойств жидкости для описания поведения механизмов в условиях высокочастотных вибраций.

Практическая значимость работы заключается в повышении количества измеряемых параметров осевых ударов в процессе роторного бурения, что позволит своевременно изменять режимные параметры бурения и, как следствие, продлит срок службы дорогостоящего бурового оборудования. Также, собранная информация об импульсе мгновенных осевых ударов позволит выявить недостатки используемого на сегодняшний день бурового инструмента и модернизировать его в дальнейшем.

Литературный обзор (Literature Review)

Существующие системы MWD решают проблему компенсации критического ускорения вибрации и колебаний в компоновке низа бурильной колонны (КНБК) [5]. Ведущими производителями, такими как Schlumberger, Halliburton и Baker Hughes, разработаны сложные системы для мониторинга вибрации и оптимизации производительности бурения. Например, система мониторинга производительности бурения Schlumberger использует акселерометры для мониторинга частот колебаний и смягчения критических вибраций [6]. Однако эти системы в первую очередь сосредоточены на измерении частот вибрации и ускорений, а не на прямом измерении

импульса ударов. Baker Hughes также предлагает свою платформу Digital Solutions, которая анализирует данные с различных датчиков для оценки состояния бурового оборудования [7], но она также основана на гироскопе и акселерометре.

Системы, которые в настоящее время используются, повышают общую безопасность и эффективность буровых работ, но они не обеспечивают точных измерений импульса осевых ударов. Это подчеркивает необходимость проведения исследований и разработок в области мониторинга процесса бурения, в частности, создания измерительных систем, способных точно регистрировать динамику осевых ударов во время буровых работ.

Для снижения колебаний, регистрируемых скважинными датчиками в телеметрической системе MWD (Measurement While Drilling), и стабилизации бурового инструмента вносятся коррективы в частоту вращения верхнего привода или нагрузку на долото [8-10]. Однако точной методики определения динамической составляющей фактической нагрузки на долота при ударах о забой и стенки скважины не существует [11-13].

На сегодняшний день существует множество разработок, касающихся динамики жидкости в различных условиях. Наиболее полно неизотермическое движение вязкой сжимаемой жидкости описывается следующими уравнениями [14-16]:

1. Уравнения Навье-Стокса (3 уравнения для компонент вектора скорости u , v , w);
2. Уравнение неразрывности (для давления p) [17];
3. Уравнение конвективной теплопроводности (для расчета температуры T);
4. Уравнение состояния, которое связывает p , ρ , T [18, 19].

Глубокое понимание и точное измерение динамических и статических свойств жидкости может позволить применить известные закономерности для разработки методологии измерения динамической составляющей нагрузки на долото в процессе роторного бурения скважин.

Материалы и методы (Materials and methods)

Предлагается разработать методологию для измерения импульса осевого удара долота в процессе бурения скважин на основе герметичной камеры, заполненной слабо сжимаемой жидкостью, и подвижного поршня. Оценка состояния жидкости внутри камеры в определенные моменты времени позволит получить информацию о динамике при внешнем воздействии, а именно об осевом воздействии на подвижный поршень.

Расчет динамики жидкости по описанным выше уравнениям является сложным и требует большое количество вычислительных мощностей. Поскольку в системе используется слабо сжимаемая жидкость, потерями энергии на выполнение жидкостью механической работы можно пренебречь. По причине герметичности камеры и отсутствии высокой скорости потока жидкости, допускаем, что жидкость в камере является неразрывной, а также что жидкостью не совершается работа по преодолению силы трения.

Получим уравнение для расчета импульса внешнего удара, приложенного к подвижному поршню, с учетом описанных допущений.

В момент удара давление на поршень площадью A создает силу:

$$F(t) = P(t) \cdot A \quad (1)$$

где $F(t)$ – сила удара, $P(t)$ – давление, оказываемое на поршень.

По Второму закону Ньютона импульс силы J , передаваемый поршню за время t равен интегралу силы по времени. Подставив уравнение 1, получим:

$$J = \int_0^{\Delta t} F(t)dt = A \cdot \int_0^{\Delta t} P(t)dt \quad (2)$$

По закону сохранения импульса, импульс, переданный жидкости равен импульсу внешнего осевого удара. Таким образом, получена зависимость импульса осевого удара и динамических свойств жидкости в герметичной камере для слабо сжимаемой жидкости.

Для измерения импульса осевого удара с помощью описанной методологии необходимо разработать измерительную систему, которая будет обеспечивать стабильное, высокоскоростное и точное получение информации о состоянии жидкости в герметичной камере (давление, температура, объем).

В качестве датчика температуры принято решение использовать полупроводниковый термистор, поскольку особенностью данных датчиков является скорость отклика и чувствительность [20]. Применение данного типа температурных датчиков позволит моментально определить изменение температуры в момент удара и, как следствие, оценить потери на теплообмен в сам момент удара.

Датчик давления жидкости подобран наиболее устойчивый к гидроударам. Важным

фактором при выборе являлось наличие у датчика прочного титанового слоя, защищающего тензочувствительную мембрану от резких перепадов давления [21].

Измерение объема жидкости предлагается производить индуктивным датчиком перемещения. Данный датчик позволит измерять мгновенные изменения высоты столба жидкости при ударе.

Датчики давления и температуры располагаются внутри герметичной камеры в непосредственной близости к подвижному цилиндру (поршню) (рис. 1). Данное расположение позволит фиксировать изменение температуры и давления с минимальной задержкой на распространение импульса удара в жидкости.

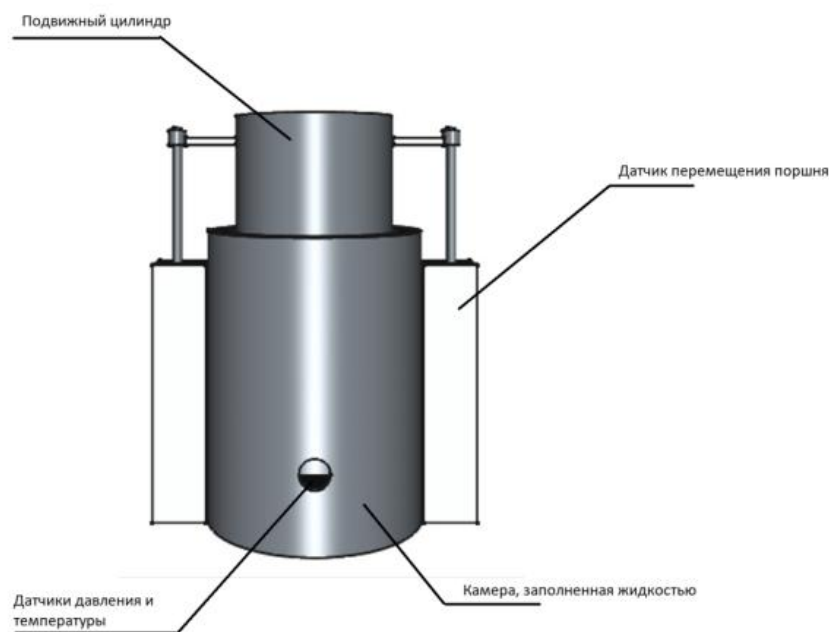


Рис. 1. 3D-модель измерительной системы

Fig. 1. 3D-model of measurement system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Все используемые датчики являются аналоговыми и передают сигнал на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) [22-24]. Оцифрованный сигнал передается на микроконтроллер, который обрабатывает полученную информацию в соответствии с разработанной методологией [25-27].

Важным этапом обработки данных является точное определение временных меток отдельных ударов для расчета интеграла давления по времени [28-30]. Предполагается, что измерительная система будет располагаться в непосредственной близости к долоту. Исходя из этого, можно сделать вывод, что форма ударного импульса в момент осевого удара будет определенной формы и будет напрямую зависеть от типа долота и формы зубцов на нем. Например, для шарошечных долот с конусообразными зубцами [31-33] можно принять, что волновое уравнение распространения импульса удара будет совпадать с волновым уравнением боя аналогичной формы. Поскольку имеется функция, описывающая ожидаемую форму ударного импульса, для выделения отдельных ударов и определения временных пределов может быть использован метод взаимной корреляции [34, 35].

Таким образом, была предложена методология для определения импульса осевого удара долота в процессе бурения скважин, основанная на изменении состояния жидкости в герметичной камере.

Результаты (Results)

На основе разработанной методологии был разработан прототип измерительной системы (рис. 2).

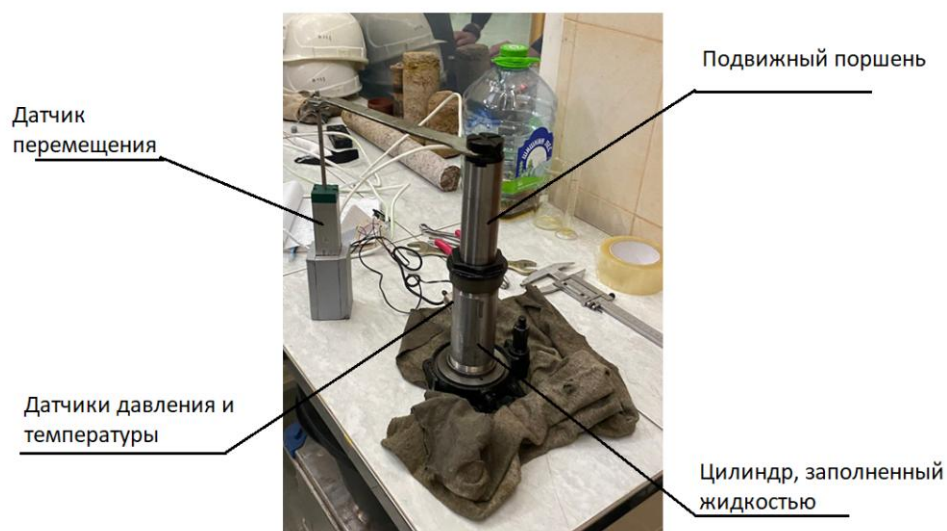


Рис. 2. Прототип измерительной системы

Fig. 2. Prototype of measurement system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Прототип сконструирован для измерения импульса свободных ударов бойками различной формы. Свободные удары производились на лабораторном стенде, позволяющем фиксировать точную высоту, на которой расположен боек до начала свободного падения (рис. 3).



Рис. 3. Лабораторный стенд для исследования свободных ударов

Fig. 3. Laboratory stand for studying free impacts

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для экспериментов был выбран боек конусообразной формы массой 10 кг. Для определения формы ударного импульса для данного бойка используем графоаналитический метод, в соответствии с которым боек сложной геометрической формы ($f_l(x)$) аппроксимируется ступенчатым цилиндрическим телом высотой l_l (рис. 4).

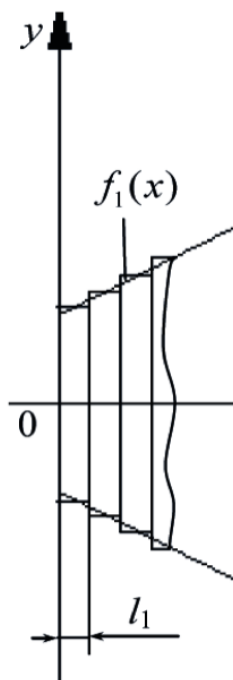


Рис. 4. Конусообразный боек

Fig. 4. Cone-shaped striker

*Источник: Жуков И.А. Анализ форм бойков ударных систем графоаналитическим методом / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2009.
Source: Zhukov I.A. Analysis of the shapes of strikers of impact systems using a graphoanalytical method / I.A. Zhukov, L.T. Dvornikov // Bulletin of computer and information technologies, 2009.

В данном методе длины ступеней задаются одинаковыми и минимально возможными, а диаметры определяются из условия равенства объемов разбитого на ступени и исходного бойка. С использованием компьютерных математических программ и была теоретически получена зависимость давления в камере от времени в момент удара конусообразным бойком с разных высот (рис. 5).

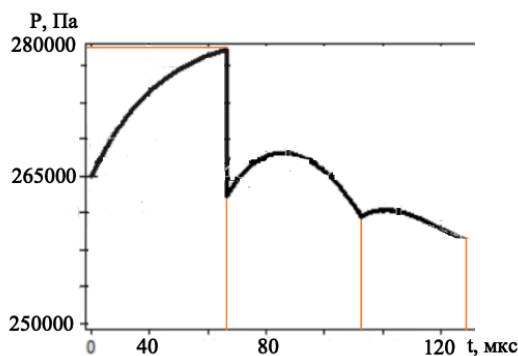


Рис. 5. Теоретически полученная зависимость давления в камере от времени в момент удара при падении с высоты 0.2 м

Fig. 5. The theoretically obtained dependence of the pressure in the chamber on time at the moment of impact when falling from a height of 0.2 m

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Свободные удары производились с различных высот в интервале от 100 мм до 250 мм с шагом 5 мм. На рисунке 6(а) представлены необработанные данные с датчика давления. На графике отражена зависимость давления от времени для последовательности из семи свободных ударов с высоты 0.2 м. Можно заметить, что данные с промышленного датчика давления при высокой частоте измерений имеют значительный уровень шумов. Для обработки данных был использован метод скользящей средней и фильтр с порогом в два стандартных отклонения. Результат обработки представлен на рисунке 6(б).

На рисунке 6(в) представлен график зависимости давления от времени для отдельного удара. Отметим, что форма и значения практически полученных данных близки к теоретически рассчитанным (рис. 5).

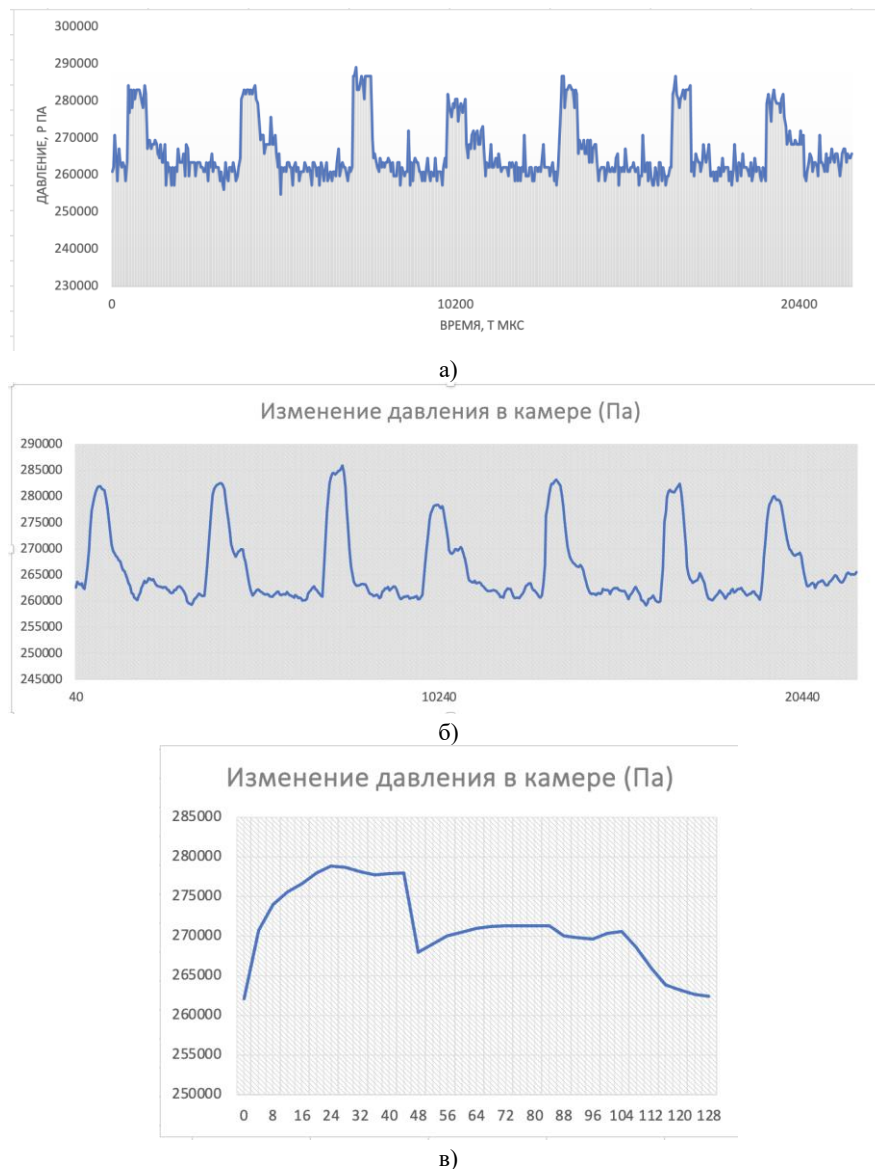


Рис. 6. Экспериментальные данные измерения давления внутри камеры: а) данные с датчика давления до обработки; б) данные после обработки; в) изменение давления для одного удара

Fig. 6. Experimental data for measuring the pressure inside the chamber: a) data from the pressure sensor before treatment; b) data after treatment; c) change in pressure for one impact

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Произведем расчет импульса отдельного удара конусообразного бойка массой 10 кг с высоты 0.2 м (рис. 6(в)).

$$J = 0,01 \int_0^t P(t)dt = 18,78 \quad (3)$$

Полученное значение близко к теоретически рассчитанному (19,79 кг*м/с).

Также, в ходе анализа полученных данных были сделаны следующие выводы:

1. Температура жидкости внутри камеры оставалась постоянной из-за большого интервала времени между ударами и была равна 20.3°C.
2. Объем жидкости в момент удара оставался неизменным по причине слабой сжимаемости жидкости и был равен 210 см³.

Обсуждение (Discussions)

Полученная методология имеет недостатки, касающиеся допущений на распределение ударной волны по оси подвижного поршня, а также допущений на потери при теплообмене и совершаемой поршнем работе. Данные недостатки будут учтены при доработке расчетной теоретической формулы. Также, используемый метод определения временных меток внутренним таймером имеет недостаточную точность для поставленной задачи измерения импульса осевых колебаний, поскольку на практике осевые колебания

имеют высокую частоту. Для решения данной задачи планируется использование внешнего высокочастотного генератора, а также компенсации температурного дрейфа при записи информации о временных метках.

Заключение или Выводы (Conclusions)

Разработана методология измерения импульса продольных колебаний в процессе бурения скважин на основе динамики слабо сжимаемой жидкости. Успешно проведены лабораторные испытания прототипа измерительной системы, построенной по данной методологии. Планируется проведение испытаний с измерением импульса отдельного удара в режиме высокочастотной последовательности ударов для оценки потерь на теплообмен.

Литература

1. Zherlygina E.S., Kuranova M.E., Gusev V.N., Odintsov E.E. Identification of hazardous sites based on studying the development of man-made fractures within the rock mass. Russian Mining Industry. 2025;(1):162–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>
2. Jeong, Cheolkyun, Yu, Yingwei, Patino, Diego, Venkatakrishnan, Sai, and Darine Mansour. "Behavior Anomalies Detection in Drilling Time Series Through Feature Extraction." Paper presented at the IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA, March 2022. doi: <https://doi.org/10.2118/208676-MS>
3. Isheyskiy, V., Martynskin, E., Smirnov, S., Vasilyev, A., Knyazev, K., & Fatyanov, T. (2021). Specifics of MWD data collection and verification during formation of training datasets. Minerals, 11(8) doi:10.3390/min11080798
4. Gogolinskiy, K. V., & Syasko, V. A. (2020). Metrological assurance and standardization of advanced tools and technologies for nondestructive testing and condition monitoring (NDT4.0). Research in Nondestructive Evaluation, 31(5-6), 325-339. doi:10.1080/09349847.2020.1841863
5. Dvoynikov, M. V., Kutuzov, P. A. (2025). 'Analysis of Efficiency of Communication Channels for Monitoring and Operational Control of Oil and Gas Wells Drilling Process', International Journal of Engineering, 38(1), pp. 120-131. doi: 10.5829/ije.2025.38.01a.12
6. Gravley, Wilton. "Review of Downhole Measurement-While-Drilling Systems." J Pet Technol 35 (1983): 1439–1445. <https://doi.org/10.2118/10036-PA>
7. Chin, W.C. (2018). GE Oil & Gas MWD Developments (BakerHughes, a GE Company). In Measurement While Drilling (MWD) Signal Analysis, Optimization, and Design, W.C. Chin (Ed.).DOI 10.1002/9781119479307.ch15
8. Z. Wang, M. Poscente, D. Filip, M. Dimanchev and M. P. Mintchev, "Rotary in-drilling alignment using an autonomous MEMS-based inertial measurement unit for measurement- while-drilling processes," in IEEE Instrumentation , Measurement Magazine, vol. 16, no. 6, pp. 26-34, December 2013, doi: 10.1109/MIM.2013.6704968.
9. Nayeem, A. A., Venkatesan, R. , Khan, F. Monitoring of down-hole parameters for early kick detection. J. Loss Prev. Process Ind. 40, 43–54 (2016) DOI: 10.1016/j.jlp.2015.11.025
10. Isheyskiy, V. A., Martynushkin, E. A., Vasiliev, A. S., & Smirnov, S. A. (2021). DATA COLLECTION FEATURES OF DURING THE BLAST WELLS DRILLING FOR THE FORMATION OF GEOSTRUCTURAL BLOCK MODELS. Sustainable Development of Mountain Territories, 13(4), 608-619. doi:10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619
11. Brett, J. F., Warren, T. M., and S. M. Behr. "Bit Whirl: A New Theory of PDC Bit Failure." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 1989. doi: 10.2118/19571-MS
12. Shigin, A. , Boreyko, D. , Tskhadaya, N. , Serikov, D.. (2021). Comparative analysis of roller drill bit performance. SOCAR Proceedings. 1-7. 10.5510/OGP2021SI200536
13. Teplyakova, A. V., Azimov, A. M., Alieva, L., & Zhukov, I. A. (2022). Improvement of manufacturability and endurance of percussion drill assemblies: Review and analysis of engineering solutions. Mining Informational and Analytical Bulletin, (9), 120-132. doi:10.25018/0236_1493_2022_9_0_120
14. John Watton, Fundamentals of Fluid Power Control, Cambridge University Press, 2009, DOI: 10.1017/CBO9781139175241
15. Martin, H. (2014) Analysis of the Navier-Stokes Equations. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2, 938-947. doi: 10.4236/jamp.2014.210106.
16. Wanan Sheng, A revisit of Navier–Stokes equation, European Journal of Mechanics - B/Fluids, Volume 80, 2020, Pages 60-71, DOI: 10.1016/j.euromechflu.2019.12.005.
17. Towhiduzzaman, Md. (2018). Performance Analysis of Continuity Equation and Its Applications. European Journal of Engineering and Technology Research. 1. 40-43. 10.24018/ejeng.2016.1.5.201.

18. V. A. Tolpaev, V. V. Paliev, The Continuity Equation in Two-Dimensional Models of Fluid and Gas Filtration in Curved Reservoirs of Finite Thickness, *Izvestiya of Saratov University*. New Ser. Ser.: Mathematics. Mechanics. Informatics, 2007, Vol. 7, Issue 2, pp. 49–53. DOI: 10.18500/1816-9791-2007-7-2-49-53
19. E.D. Macklen, NTC Thermistor Materials, *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*, 1991, Pages 328-331, DOI: 10.1016/B978-0-08-034720-2.50091-5
20. Jung, Taekeon & Yang, Sung. (2015). Highly Stable Liquid Metal-Based Pressure Sensor Integrated with a Microfluidic Channel. *Sensors*. 15. 11823-11835. 10.3390/s150511823.
21. Андреев В.П. Определение формы препятствия сенсорной системой мобильного робота с помощью ИК-датчиков расстояния типа GP2Y0A (Sharp). *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(1):195-207. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-195-207>
22. Ivo Mateljan. Basic Definitions of Integrating SPL Meters. - 2010. - DOI: 10.1016/j.prosig.2010.03.013.
23. Decoding time station signals (DCF77 etc.) with a microcontroller. - 2024. - DOI: 10.1007/s43451-024-00095-8.
24. Thomas K. Wright, J. Gorin, B. Zarlingo. Bringing New Power and Precision to gated Spectrum Measurements. - *High Frequency Electronics*, Aug. 2007. - DOI: 10.1109/MC.2007.332.
25. C. Bayliss, L. Dunleavy. Performing and Analyzing Pulsed Current-Voltage Measurements. - *High Frequency Electronics*, May 2004. - DOI: 10.1109/MC.2004.332.
26. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Калинина М.В., Ахметова Р.В. Система автоматизированного мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса трубопроводного транспорта. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(1):144-150. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-144-150>
27. Essentials of Microcontroller Use Learning about Peripherals. - 2024. - DOI: 10.1007/s43451-024-00097-6.
28. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д. Интеллектуальная система мониторинга и диагностики элементов газотурбинной установки (ИСМДЭГТУ). *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2025;27(2):211-221. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-2-211-221>
29. A.P. parliamentary. Pulsed Measurements. - In *The RF and Microwave Handbook*, CRC Press, 2000. - DOI: 10.1201/9781420039678.ch15.
30. F. Ahmad, M. Ashfaq, A. Ahmad, A. Iqbal, M. A. Rehan. A novel approach to predict the drilling performance of roller cone bits using machine learning. - *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022. - DOI: 10.1016/j.petrol.2022.109797.
31. H. Zhai, L. Wang, R. Li, Y. Zhang. A new model for predicting the wear of roller cone bits in hard rock drilling. - *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020. - DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.07.002.
32. M. A. Dar, J. W. deducted, J. A. Hart. Investigation of roller cone bit damage mechanisms using computational fluid dynamics. - *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018. - DOI: 10.1016/j.petrol.2018.01.005.
33. A New Methodology of Spatial Cross-Correlation Analysis. - *Journal of the European Physical Society*, 2015. - DOI: 10.1371/journal.pone.0126158 .
34. Chunchun Gao, Benjamin F. Chao, Bing Tan, Xudong Wu, Significance testing for cross correlation: A critical examination of correlations between ENSO and GRACE-derived terrestrial water storage variabilities, *Global and Planetary Change*, Volume 241, 2024, 104549, ISSN 0921-8181, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104549>.

Авторы публикации

Двойников Владимир Михайлович – аспирант кафедры Электронных систем Санкт-Петербургского Горного университета, г. Санкт-Петербург, Россия. vladimir24032000@gmail.com

Растворова Ирина Ивановна – д-р техн. наук, доцент кафедры Электронных систем Санкт-Петербургского Горного университета, г. Санкт-Петербург, Россия. rastvorova@mail.ru

Юртаев Сергей Леонидович – зам. директора НЦ Арктика Санкт-Петербургского Горного университета, г. Санкт-Петербург, Россия.

References

1. Zherlygina E.S., Kuranova M.E., Gusev V.N., Odintsov E.E. Identification of hazardous sites based on studying the development of man-made fractures within the rock mass. Russian Mining Industry. 2025;(1):162–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>
2. Saldivar, Belem. (2014). An Overview on the Modeling of Oilwell Drilling Vibrations. IFAC Proceedings Volumes. 47. 5169-5174. 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00478.
3. Isheyskiy, V., Martinyskin, E., Smirnov, S., Vasilyev, A., Knyazev, K., & Fatyanov, T. (2021). Specifics of MWD data collection and verification during formation of training datasets. Minerals, 11(8) doi:10.3390/min11080798
4. Gogolinskiy, K. V., & Syasko, V. A. (2020). Metrological assurance and standardization of advanced tools and technologies for nondestructive testing and condition monitoring (NDT4.0). Research in Nondestructive Evaluation, 31(5-6), 325-339. doi:10.1080/09349847.2020.1841863
5. Dvoynikov, M. V., Kutuzov, P. A. (2025). 'Analysis of Efficiency of Communication Channels for Monitoring and Operational Control of Oil and Gas Wells Drilling Process', International Journal of Engineering, 38(1), pp. 120-131. doi: 10.5829/ije.2025.38.01a.12
6. Gravley, Wilton. "Review of Downhole Measurement-While-Drilling Systems." J Pet Technol 35 (1983): 1439–1445. <https://doi.org/10.2118/10036-PA>
7. Chin, W.C. (2018). GE Oil & Gas MWD Developments (BakerHughes, a GE Company). In Measurement While Drilling (MWD) Signal Analysis, Optimization, and Design, W.C. Chin (Ed.).DOI 10.1002/9781119479307.ch15
8. Z. Wang, M. Poscente, D. Filip, M. Dimanchev and M. P. Mintchev, "Rotary in-drilling alignment using an autonomous MEMS-based inertial measurement unit for measurement- while-drilling processes," in IEEE Instrumentation , Measurement Magazine, vol. 16, no. 6, pp. 26-34, December 2013, doi: 10.1109/MIM.2013.6704968.
9. Nayeem, A. A., Venkatesan, R. , Khan, F. Monitoring of down-hole parameters for early kick detection. J. Loss Prev. Process Ind. 40, 43–54 (2016) DOI: 10.1016/j.jlp.2015.11.025
10. Isheyskiy, V. A., Martynushkin, E. A., Vasiliev, A. S., & Smirnov, S. A. (2021). DATA COLLECTION FEATURES OF DURING THE BLAST WELLS DRILLING FOR THE FORMATION OF GEOSTRUCTURAL BLOCK MODELS. Sustainable Development of Mountain Territories, 13(4), 608-619. doi:10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619
11. Brett, J. F., Warren, T. M., and S. M. Behr. "Bit Whirl: A New Theory of PDC Bit Failure." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 1989. doi: 10.2118/19571-MS
12. Shigin, A. , Boreyko, D. , Tskhadaya, N. , Serikov, D.. (2021). Comparative analysis of roller drill bit performance. SOCAR Proceedings. 1-7. 10.5510/OGP2021SI200536
13. Teplyakova, A. V., Azimov, A. M., Alieva, L., & Zhukov, I. A. (2022). Improvement of manufacturability and endurance of percussion drill assemblies: Review and analysis of engineering solutions. Mining Informational and Analytical Bulletin, (9), 120-132. doi:10.25018/0236_1493_2022_9_0_120
14. John Watton, Fundamentals of Fluid Power Control, Cambridge University Press, 2009, DOI: 10.1017/CBO9781139175241
15. Martin, H. (2014) Analysis of the Navier-Stokes Equations. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2, 938-947. doi: 10.4236/jamp.2014.210106.
16. Wanan Sheng, A revisit of Navier–Stokes equation, European Journal of Mechanics - B/Fluids, Volume 80, 2020, Pages 60-71, DOI: 10.1016/j.euromechflu.2019.12.005.
17. Towhiduzzaman, Md. (2018). Performance Analysis of Continuity Equation and Its Applications. European Journal of Engineering and Technology Research. 1. 40-43. 10.24018/ejeng.2016.1.5.201.
18. V. A. Tolpaev, V. V. Paliev, The Continuity Equation in Two-Dimensional Models of Fluid and Gas Filtration in Curved Reservoirs of Finite Thickness, Izvestiya of SaratovUniversityv. New Ser. Ser.: Mathematics. Mechanics. Informatics, 2007, Vol. 7, Issue 2, pp. 49–53. DOI: 10.18500/1816-9791-2007-7-2-49-53
19. E.D. Macklen, NTC Thermistor Materials, Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials, 1991, Pages 328-331, DOI: 10.1016/B978-0-08-034720-2.50091-5
20. Jung, Taekeon & Yang, Sung. (2015). Highly Stable Liquid Metal-Based Pressure Sensor Integrated with a Microfluidic Channel. Sensors. 15. 11823-11835. 10.3390/s150511823.
21. Andreev V.P. Obstacle shape determination by mobile robot sensor system using GP2Y0A (Sharp) type IR distance sensors. Power engineering: research, equipment, technology. 2024;26(1):195-207. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-195-207>
22. Ivo Mateljan. Basic Definitions of Integrating SPL Meters. - 2010. - DOI: 10.1016/j.prosig.2010.03.013.

23. Decoding time station signals (DCF77 etc.) with a microcontroller. - 2024. - DOI: 10.1007/s43451-024-00095-8.
24. Thomas K. Wright, J. Gorin, B. Zarlingo. Bringing New Power and Precision to gated Spectrum Measurements. - High Frequency Electronics, Aug. 2007. - DOI: 10.1109/MC.2007.332.
25. C. Bayliss, L. Dunleavy. Performing and Analyzing Pulsed Current-Voltage Measurements. - High Frequency Electronics, May 2004. - DOI: 10.1109/MC.2004.332.
26. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E., Kalina M.V., Akhmetova R.V. System of automated monitoring and forecasting of the remaining resource of pipeline transport. Power engineering: research, equipment, technology. 2024;26(1):144-150. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-144-150>
27. Essentials of Microcontroller Use Learning about Peripherals. - 2024. - DOI: 10.1007/s43451-024-00097-6.
28. Orlov A.A., Krylova E.V., Shcherbakov V.M., Avdeev A.D. Intelligent system for monitoring and diagnostics of gas turbine installation elements (ISMDEGTU). Power engineering: research, equipment, technology. 2025;27(2):211-221. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-2-211-221>
29. A.P. parliamentary. Pulsed Measurements. - In The RF and Microwave Handbook, CRC Press, 2000. - DOI: 10.1201/9781420039678.ch15.
30. F. Ahmad, M. Ashfaq, A. Ahmad, A. Iqbal, M. A. Rehan. A novel approach to predict the drilling performance of roller cone bits using machine learning. - Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022. - DOI: 10.1016/j.petrol.2022.109797.
31. H. Zhai, L. Wang, R. Li, Y. Zhang. A new model for predicting the wear of roller cone bits in hard rock drilling. - Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020. - DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.07.002.
32. M. A. Dar, J. W. deducted, J. A. Hart. Investigation of roller cone bit damage mechanisms using computational fluid dynamics. - Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018. - DOI: 10.1016/j.petrol.2018.01.005.
33. A New Methodology of Spatial Cross-Correlation Analysis. - Journal of the European Physical Society, 2015. - DOI: 10.1371/journal.pone.0126158 .
34. Cross-correlation PIV : theory, implementation and accuracy. - Technische Universiteit Eindhoven, 2000. - DOI: 10.6100/IR531139

Authors of the publication

Vladimir M. Dvoynikov – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
vladimir24032000@gmail.com

Irina I. Rastvorova – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
rastvorova@mail.ru

Sergey L. Yurtaev – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **07.10.2025 г.**

Отредактировано **05.11.2025 г.**

Принято **24.11.2025 г.**



АПК ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ТОКСИЧНОСТИ ВОДНЫХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФУЗОРИЙ *P. CAUDATUM*

Соколов А.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия
asokolov@etu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработка аппаратно-программного комплекса (АПК) для экспресс-оценки токсичности водных сред методом биотестирования с использованием *Paramecium Caudatum*. Основной задачей являлось создание системы, обеспечивающей регистрацию и анализ хемотаксической реакции группы тест-организмов при разных уровнях токсического воздействия. МЕТОДЫ. Аппаратная часть комплекса включает в себя камеру высокого разрешения, специальную плоскую фотометрическую кювету, светодиодную подсветку с регулируемой интенсивностью. Программное обеспечение использует алгоритмы компьютерного зрения (OpenCV) для трекинга движения инфузорий *P. Caudatum*, оценка токсичности на основе пространственно-временного распределения клеток. Эксперименты проводились с использованием раствора Лозины-Лозинского в качестве контроля и раствора медного купороса (CuSO_4) в концентрациях от 1 мг/л до 0.1 мг/л в качестве исследуемого раствора. РЕЗУЛЬТАТЫ. При 1 мг/л CuSO_4 95% клеток сохранили локализацию в нижней зоне кюветы (детальность), индекс токсичности соответствовал высокой степени опасности ($T > 0.70$). При 0.1 мг/л CuSO_4 наблюдалась миграция 70-75% популяции в верхнюю зону, аналогично контрольной пробе ($T < 0.40$). Система продемонстрировала погрешность $\leq 5\%$ и время анализа 30 минут. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанный АПК позволяет точно определять токсичность сред с CuSO_4 , выявляя как критические (1 мг/л), так и субпороговые (0.1 мг/л) концентрации. Устойчивость метода к артефактам съемки подтверждает его надежность для экологического мониторинга.

Ключевые слова: биотестирование; *paramecium caudatum*; автоматизированный контроль токсичности; аппаратно-программный комплекс; хемотаксическая реакция; компьютерное зрение; экологический мониторинг.

Для цитирования: Соколов А. АПК для экспресс-оценки токсичности водных сред с использованием инфузорий *P. Caudatum* // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 25-37. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-25-37.

HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM FOR RAPID TOXICITY ASSESSMENT OF AQUATIC ENVIRONMENTS USING *P. CAUDATUM* INFUSORIA

Sokolov A.

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin),
Saint Petersburg, Russia
asokolov@etu.ru

Abstract: THE PURPOSE. Development of a hardware-software complex (HSC) for rapid toxicity assessment of aquatic environments using *Paramecium caudatum* as a bioindicator. The primary goal was to create a system capable of registering and analyzing the chemotactic response of test organisms under varying levels of toxic exposure. METHODS. The hardware component includes a high-resolution camera, a specialized flat photometric cuvette, and adjustable LED lighting. The software utilizes computer vision algorithms (OpenCV) for tracking *P. caudatum* movement and assessing toxicity based on spatiotemporal cell distribution. Experiments were conducted using Lozina-Lozinsky solution as a control and copper sulfate (CuSO_4) solutions at concentrations

ranging from 1 mg/L to 0.1 mg/L as test samples. **RESULTS.** At 1 mg/L CuSO₄, 95% of cells remained localized in the lower cuvette zone (lethality), with a toxicity index corresponding to high hazard ($T > 0.70$). At 0.1 mg/L CuSO₄, 70-75% of the population migrated to the upper zone, similar to the control ($T < 0.40$). The system demonstrated $\leq 5\%$ error and a 30-minute analysis time. **CONCLUSION.** The developed HSC enables precise toxicity assessment of CuSO₄-contaminated environments, detecting both critical (1 mg/L) and subthreshold (0.1 mg/L) concentrations. The method's robustness against imaging artifacts confirms its reliability for ecological monitoring.

Keywords: bioassay; *Paramecium caudatum*; automated toxicity control; hardware-software complex; chemotactic response; computer vision; environmental monitoring.

For citation: Sokolov A. Hardware-software system for rapid toxicity assessment of aquatic environments using *P. Caudatum* infusoria. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (6): 25-37. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-25-37.

Введение (Introduction)

В условиях глобальных изменений и ежегодного увеличения антропогенной нагрузки на окружающую среду вопросы мониторинга и оценки качества природных ресурсов становятся критически важными для обеспечения устойчивого развития и сохранения экосистем [1]. Интенсификация промышленного производства, транспортной деятельности, нерациональное использование природных ресурсов и урбанизация приводят к значительному загрязнению атмосферы, водоемов и почв [2]. Это, в свою очередь, требует разработки современных и эффективных методов биотестирования для своевременного обнаружения и предотвращения негативных экологических последствий.

Биотестирование представляет собой совокупность методик и технических решений, используемых для оценки токсичности и биологической активности различных веществ с помощью живых организмов или их компонентов. Биотестирование, как метод оценки токсичности окружающей среды, основан на использовании живых тест-организмов, чьи поведенческие, физиологические и метаболические реакции служат индикаторами вредного воздействия химических веществ. Эти методы позволяют выявлять потенциальные экологические риски, связанные с воздействием химических веществ, загрязнителей и других факторов на окружающую среду [3].

Основные задачи биотестирования включают определение степени токсичности различных веществ, выявление их потенциального воздействия на разнообразные виды организмов, а также оценку долгосрочных экологических последствий загрязнения. В зависимости от поставленных целей исследования, биотестирование может проводиться с использованием широкого спектра тест-организмов, таких как бактерии, водоросли, инфузории, ракообразные и рыбы. Каждый из этих организмов обладает уникальной чувствительностью к различным загрязнителям, что позволяет получать комплексную и всестороннюю оценку экологического состояния.

Бактерии и ракообразные используются для оценки общей токсичности по приросту/убыли число организмов. Инфузории и другие виды одноклеточных чаще всего используются для исследования среды путем оценки изменения специфических двигательных реакций. Ракообразные и рыбы, в свою очередь, предоставляют информацию о потенциальных эффектах на более высоких уровнях биологической организации. Таким образом, использование различных тест-организмов позволяет создать детализированный экологический профиль, который учитывает множество факторов и обеспечивает более точное понимание состояния окружающей среды [4].

Традиционные методики биотестирования широко применяются для исследования токсичности как в лабораторных условиях, так и в полевых исследованиях. Однако в рамках экологического мониторинга существует ряд ограничений, связанных с нехваткой времени и ресурсов. К основным недостаткам этих методов можно отнести длительное время анализа, которое может достигать 48 часов, сложность подготовки и проведения анализа, а также необходимость использования специализированного оборудования, которое часто допустимо использовать только в лабораторных условиях. Это существенно ограничивает их применимость в полевых исследованиях. Кроме того, необходимость создания специфических условий содержания для тест-организмов дополнительно усложняет процесс анализа и требует значительных затрат труда и ресурсов.

Современные методы биотестирования, основанные на реакциях *Escherichia coli* и *Paramecium caudatum*, сталкиваются с проблемой неучтенных внешних факторов, способных искажать результаты анализа. Ранее влияние этих факторов на биолюминесценцию бактерий и хемотаксис инфузорий не изучалось, что ограничивает надежность методов оценки токсичности водных сред [5].

Настоящее исследование проводилось с использованием модельного токсиканта CuSO_4 , выбранный в соответствии с утвержденной методикой ФР.1.39.2015.19242 «Определения токсичности отходов производства и потребления экспресс – методом с применением прибора серии «Биотестер»» и не ставило целью определение влияния дополнительных факторов среды (рН, ХПК, нефтепродукты, аммоний и пр.) Влияние этих параметров планируется в рамках последующих этапов разработки.

Целью исследования является разработка методики и аппаратной реализации портативного устройства для контроля качества природной среды на основе таксических реакций инфузорий *Paramecium Caudatum*. Предлагаемая методика основана на цифровом анализе движения группы организмов, что позволяет количественно оценивать параметры их движения и формировать заключение о токсичности исследуемых сред. Использование современных технологий компьютерного зрения и автоматизация процессов анализа обеспечивают высокую точность и надежность результатов, а также возможность проведения исследований в полевых условиях.

Научная значимость исследования заключается в разработке нового метода цифрового анализа движения инфузорий с использованием современных технологий компьютерного зрения, что позволит регистрировать минимальные отклонения от нормальной тест-реакции клеток и повысить точность измерений.

Практическая значимость исследования заключается в создании компактного и мобильного устройства, обеспечивающего возможность проведения анализа в полевых условиях, что позволит сократить риск порчи образцов и повысить оперативность исследований. Обеспечение высокой точности и надежности анализа, включая возможность исследования мутных растворов без предварительного разбавления, что исключает искажения результатов.

Литературный обзор (Literature Review)

Несмотря на значительные достижения в области биотестирования, существующие методики и устройства имеют ряд недостатков, которые ограничивают их эффективность и применимость в современных условиях.

Применяемые в настоящее время методики биотестирования часто требуют длительного времени для проведения анализа, которое может достигать 48 часов. Такие методики основаны на измерении роста культур микроорганизмов или изменении их морфологических характеристик, требующих длительного инкубационного периода. Это существенно замедляет процесс получения результатов и затрудняет оперативное принятие решений в случае обнаружения опасных загрязняющих веществ [5].

Значительное число существующих методов биотестирования требует сложной и трудоемкой подготовки, включающей создание особых условий для тест-организмов и использование специализированного оборудования. Например, культивирование инфузорий *Tetrahymena*, требующее создания и поддержания определенных параметров питательной среды. Этот раствор обычно состоит из дистиллированной воды, глюкозы, бактериального пептона, дрожжевого экстракта и хлорида натрия. После приготовления питательного раствора необходимо обеспечить поддержание постоянного уровня рН и температуры. Этот процесс требует использования специального оборудования, такого как термостаты и рН-метры, для обеспечения стабильности условий содержания. Поддержание этих условий крайне важно для обеспечения надежности и воспроизводимости результатов биотестирования. При постоянном использовании процедуру приготовления питательного раствора и поддержания оптимальных условий следует повторять каждые 7-10 дней. Кроме того, культивация инфузорий требует регулярного мониторинга состояния культуры и своевременного обнаружения возможных отклонений от нормальных условий. Это включает в себя проверку чистоты культуры, предотвращение загрязнения и контроль за популяционной плотностью организмов. Все эти процедуры требуют высокой квалификации персонала и значительных затрат труда, что делает процесс биотестирования более сложным и ресурсоемким [6].

Описание существующих методов и предпосылки к разработке

Традиционно для количественной оценки распределения микроорганизмов в градиентах химического раздражителя применяются методы прямого подсчета клеток с помощью микроскопии и измерения оптической плотности [7]. Однако эти методы

обладают рядом ограничений, таких как высокая трудоемкость, невысокая точность и сложность автоматизации. Среди основных методов контроля характеристик движения тест-организмов можно выделить фотонную корреляционную спектроскопию, основанную на изменении частоты рассеянного от движущихся частиц излучения за счет эффекта Доплера, и оптическое гетеродинирование, использующее эффект интерференции волн от источника колебаний [8]. Эти методы позволяют более точно анализировать движение микроорганизмов, но также требуют сложного оборудования и специализированной подготовки.

Многие современные приборные методики биотестирования основаны на фотометрическом принципе, который позволяет определять концентрацию веществ в растворах путем измерения изменения их оптической плотности. В середине 1970-х годов в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» под руководством А. В. Пожарова были начаты исследования по разработке биотестовой аппаратуры для контроля токсичности водных сред, основанные на поведенческих реакциях инфузорий. В ходе этих исследований была обоснована концепция биотестовой аппаратуры как измерительного микробиологического преобразователя, который контролирует токсичность водных сред аналогично тестеру. Этот подход позволил значительно продвинуться в области биотестирования, предложив новые методы анализа, основанные на естественных реакциях живых организмов [9].

Однако такой подход имеет существенные ограничения, особенно при анализе мутных растворов. Например, при исследовании образцов с высоким содержанием взвешенных частиц результаты могут искажаться из-за рассеяния света, что снижает точность анализа. Взвешенные частицы могут поглощать и рассеивать свет, изменяя его интенсивность и спектральные характеристики, что влияет на точность фотометрических измерений. Разбавление исследуемых растворов может изменить их химический состав и свойства, что негативно сказывается на достоверности результатов. Это особенно важно при анализе проб, концентрация токсичных веществ в которых может быть снижена в процессе разбавления, что приведет к недооценке их воздействия на окружающую среду. Для минимизации данного эффекта в методике, использующей прибор «Биотестер 2», предлагается процедура разбавления исходного образца дистиллированной водой с последующим применением корректирующего коэффициента в расчетах [10].

Позже, для повышения точности детекции тест-организмов, был предложен метод контроля пространственно-временного распределения оптических характеристик взвеси инфузорий с использованием линейки фотоприемников. Этот метод, основанный на анализе импульсных сигналов, позволил определять концентрацию и динамику движения инфузорий, что значительно улучшило точность биотестирования водных сред. На основе данного метода был разработан и успешно апробирован функционирующий прототип устройства. Однако, несмотря на эффективность, такой подход имеет ряд ограничений: он не позволяет отделять подвижные частицы от микроорганизмов, что может приводить к искажению результатов измерений. Кроме того, контролируемая область значительно меньше общего объема кюветы, что ограничивает возможность полного наблюдения за изменениями, происходящими в исследуемой среде. Это особенно важно при изучении таких тест-реакций, как хемотаксис, гальванотаксис и летальность, где распределение микроорганизмов по объему кюветы может быть неравномерным.

При дальнейшем совершенствовании методик биотестирования была сформулирована методика пространственно-временного оценки оптических свойств взвеси инфузорий с помощью ПЗС-линейки. Эта методология основана на анализе светового потока через кювету, что позволяет оценить концентрацию и вертикальное распределение микроорганизмов с помощью оценки экстинкции. Для устранения недостатков ранее предложенной схемы была предложена новая оптическая схема, включающая цилиндрическую линзу, которая фокусировала весь световой поток, проходящий через кювету, на плоскость ПЗС-линейки. Такая конструкция позволила исключить зависимость от случайного попадания клеток в зону детекции и упростить математический аппарат. Несмотря на повышенную точность, обеспечиваемую данной методикой, важно признать ограничения, присущие этому подходу. Эти ограничения связаны с невозможностью дифференцировать сигналы, исходящие от подвижных частиц и микроорганизмов, а также с акцентом исключительно на вертикальном распределении, что не позволяет отразить трехмерную динамику популяции [11].

В рамках совершенствования методик биотестирования водных сред был разработан метод пространственно-временного контроля оптических характеристик взвеси инфузорий с применением ПЗС-линейки. Данный подход базируется на анализе светового потока, прошедшего через кювету, что обеспечивает определение

концентрации и вертикального распределения микроорганизмов посредством оценки экстинкции. Для того чтобы устранить недостатки предложенной ранее схемы была предложена оптическая схема с цилиндрической линзой, фокусирующей весь световой поток, прошедший через кювету, на плоскость ПЗС-линейки. Это позволило исключить зависимость от случайного попадания клеток в детектируемую зону и упростить математический аппарат. Несмотря на повышение точности, метод сохраняет ограничения: отсутствие дифференциации сигналов от подвижных частиц и микроорганизмов, а также фокус исключительно на вертикальном распределении, что не отражает трёхмерной динамики популяции. Для комплексного анализа требуется разработка подходов, учитывающих горизонтальную составляющую движения клеток и расширяющих контролируемую область, например, за счёт применения многомерных оптических систем или алгоритмов машинного обучения для обработки пространственно-временных данных.

Для устранения перечисленных выше сложностей было решено разработать метод контроля токсичности воды и водных вытяжек на основе анализа пространственно-временного распределения и динамики движения тест-организмов *Paramecium Caudatum* с использованием аппаратно-программного комплекса.

Материалы и методы (Materials and methods)

Разработанный аппаратный комплекс предназначен для регистрации и анализа пространственно-временного распределения тест-организмов в условиях переменной токсичности водных сред. Система включает следующие ключевые компоненты:

Цифровая камера – обеспечивает захват изображений в режиме реального времени.

Плоская кювета – формирует стабильную границу раздела между средами.

Светодиодная подсветка – гарантирует равномерное освещение пробы.

Микроконтроллер – управляет периферийными устройствами и передает данные.

Персональный компьютер – выполняет обработку видеопотока и анализ данных.

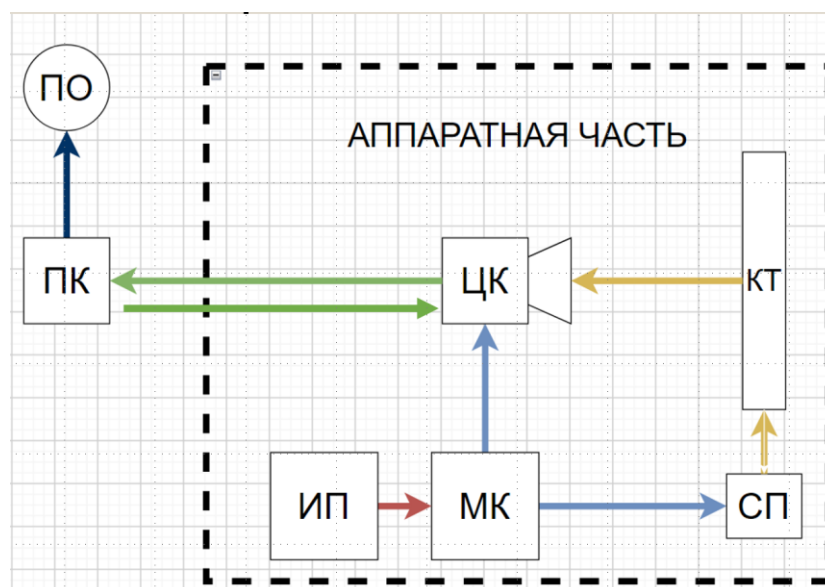


Рис. 1. Блок-схема устройства. ПО – программное обеспечение, ПК – персональный компьютер, ЦК – цифровая камера, КТ – плоская кювета, ИП – источник питания, МК – микроконтроллер, СП – светодиодная подсветка

Fig. 1. Block diagram of the device. ПО – software, ПК – personal computer, ЦК – digital camera, КТ – flat cuvette, ИП – power supply, МК – microcontroller, СП – illumination

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Архитектура системы направлена на устранение ограничений традиционных фотометрических методов, таких как зависимость от узкого светового пучка и необходимость сложной статистической обработки сигналов.

В качестве основного сенсора использована CMOS-камера со следующими характеристиками:

Разрешение: 2560x1440 пикселей.

Частота съемки: 60 кадров/с.

Объектив: макролинза с фокусным расстоянием 50 мм, обеспечивающая увеличение 3:1.

Камера фиксирует распределение инфузорий в плоской кювете толщиной 2 мм, что позволяет отслеживать как вертикальные, так и горизонтальные перемещения клеток. Замена ПЗС-линеек на цифровую камеру устранила необходимость использования сложной оптической схемы и расширила контролируемую область до 100% объема кюветы.

Для работы устройства используется разработанная ранее плоская кювета.

Кювета обеспечивает воспроизводимое формирование зон миграции клеток, что критично для оценки хемотаксиса.



Рис. 2. Плоская кювета

Fig. 2. Flat cuvette

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для минимизации шумов и артефактов изображения применена белая светодиодная подсветка с параметрами. Подсветка адаптирована для работы с мутными средами, что исключает необходимость предварительного разбавления проб.

Микроконтроллер

Управляющий модуль на базе ARM Cortex-M7 (частота 300 МГц) выполняет:

- Синхронизацию работы камеры и подсветки.
- Передачу данных на ПК через интерфейс USB 3.0.

Программное обеспечение

Было разработано программное обеспечение (ПО) для автоматизированной обработки видеопотока, регистрируемого цифровой камерой, и количественной оценки параметров движения тест-организмов. Архитектура ПО включает три основных модуля:

- Модуль захвата и предобработки видео – обеспечивает стабилизацию изображения и фильтрацию шумов.
- Модуль трекинга объектов – детектирует и отслеживает перемещение клеток.
- Аналитический модуль – рассчитывает скорость, пространственное распределение и классифицирует тест-реакции.

В ходе разработки были исследованы различные подходы к детекции объектов, включая применение фильтров по размеру и цвету. Алгоритм сегментации заднего фона, реализованный с использованием класса `cv2.BackgroundSubtractorMOG2`, позволил эффективно удалять статические элементы кадра и выделять движущиеся объекты. Для минимизации артефактов и повышения контрастности изображения применялась коррекция неравномерности подсветки с использованием метода плоского поля. Для фильтрации шумов использовалось Гауссово размытие (ядро 3x3) для подавления высокочастотных шумов и медианный фильтр (ядро 5x5) для устранения импульсных помех. Для возможности отслеживания перемещения объектов была проведена операция бинаризации изображения, с эмпирическим выбором порога.

Для отслеживания перемещений использовался алгоритм MOOSE (Minimum Output Sum of Squared Error). Детекция объектов осуществлялась путем выделения регионов интереса (ROI) на основе бинаризованного изображения. Для прогнозирования траекторий движений производилась корреляция между кадрами для определения

векторов движения. Впоследствии было принято решение отказаться от данного подхода ввиду значительных ошибок, возникающих при отслеживании большого количества объектов. Для фильтрации ложных срабатываний удалялись объекты с аномально высокой или низкой скоростью и размерами [12-15].

В связи с невозможностью постоянного отслеживания каждого отдельного организма для построения плотности распределения клеток кадр был разделен на горизонте и подсчитывалось количество клеток, которые попали в область интереса.

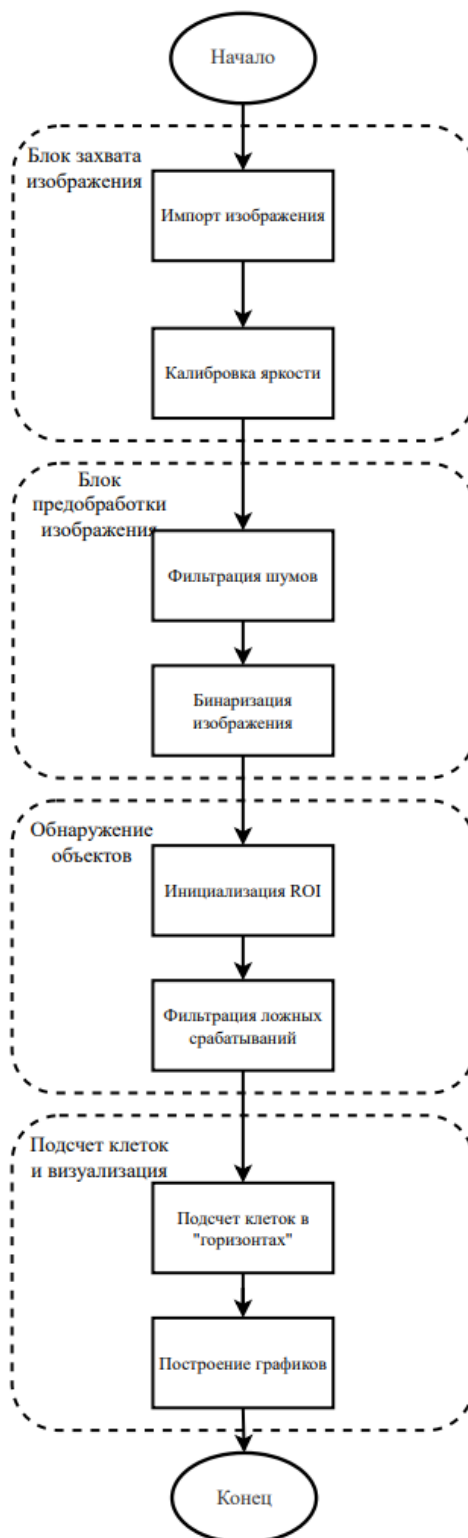


Рис. 3. Алгоритм работы программы

Fig. 3. Algorithm of the program operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Разработанное программное обеспечение продемонстрирует устойчивость к частичному перекрытию тест-организмов, что повышает точность и надежность конечных

результатов. Оно характеризуется низкими требованиями к вычислительным ресурсам, что позволяет эффективно обрабатывать видеосигнал в реальном времени, обеспечивая оперативность и доступность решения в условиях ограниченных вычислительных мощностей.

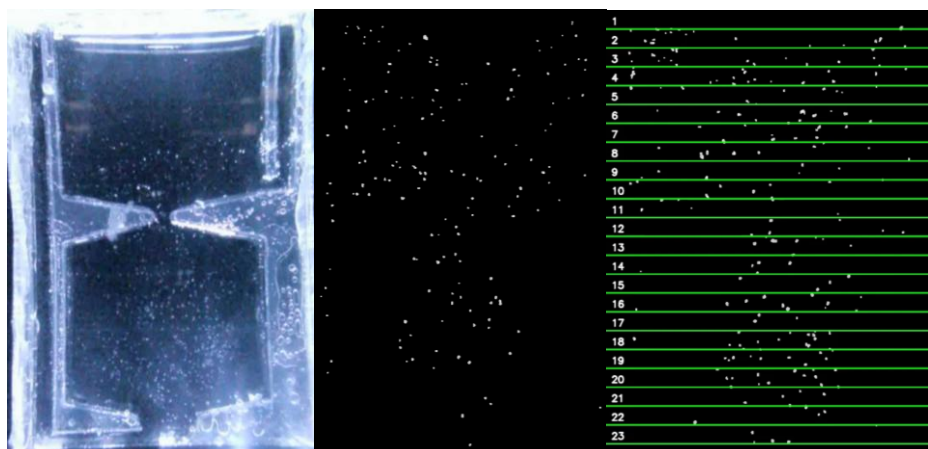


Рис. 4. Пример работы программы

Fig. 4. Example of program operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 4, исходное изображение бинаризуется, инвертируется и затем кадр разбивается на горизонты и подсчитывается количество клеток в каждой области.

Перед проведением экспериментов взвесь инфузорий проверялась визуально под микроскопом для исключения признаков контаминации, чрезмерной плотности популяции и отсутствия двигательной активности. В соответствии с методикой ФР.1.39.2015.19242, культуры предварительно подкармливались за 3-4 дня до проведения исследования. Кроме того, при каждом эксперименте использовалась контрольная проба, в которой двигательная активность клеток дополнительно регистрировалась и оценивалась с помощью программных средств.

Результаты (Results)

Экспериментальное исследование пространственно-временного распределения клеток в условиях различного уровня воздействия.

Было проведено экспериментальное исследование, направленное на оценку возможности применения разработанной установки для анализа пространственно-временного распределения клеток микроорганизмов *Paramecium Caudatum* под воздействием различных концентраций модельного токсиканта. В ходе эксперимента изучалась динамика и поведение клеток в ответ на введение сульфата меди (II) (CuSO_4) в различных концентрациях, а также контрольного раствора Лозины-Лозинского (Л-Л). Известно, что раствор Л-Л является безопасной средой и клетки проявляют яркую реакцию отрицательного геотаксиса и перемещаются в раствор. При внесении токсиканта (CuSO_4) в концентрации 1 мг/л наблюдается реакция избегания, обусловленная активацией защитных механизмов микроорганизмов. Концентрация 0.1 мг/л считается пороговой, клетки должны демонстрировать поведение аналогичное, как при использовании раствора Л-Л.

Эксперимент проводился с использованием кюветы, заполненной взвесью микроорганизмов *Paramecium Caudatum*. Для фиксации изменений в поведении клеток использовалась видеокамера, подключенная к персональному компьютеру с установленной программой OBS для записи видео. В ходе эксперимента исследовались следующие растворы:

- Контрольный раствор Л-Л.
- Раствор сульфата меди (II) (CuSO_4) в концентрациях 1 мг/дм³ и 0,1 мг/дм³.

Исследования для каждого раствора проводились в трех повторениях.

Результаты эксперимента с контрольной пробой.

Для оценки пространственно-временного распределения клеток тест-организмов в контрольной пробе был подготовлен раствор Л-Л.

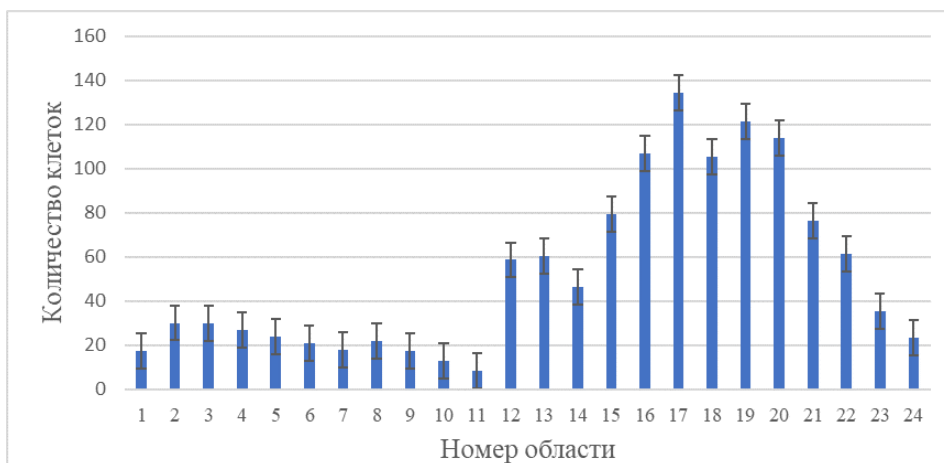


Рис. 5. Начальное распределение клеток (раствор Л-Л) Fig. 5. Initial cell distribution (L-L solution)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

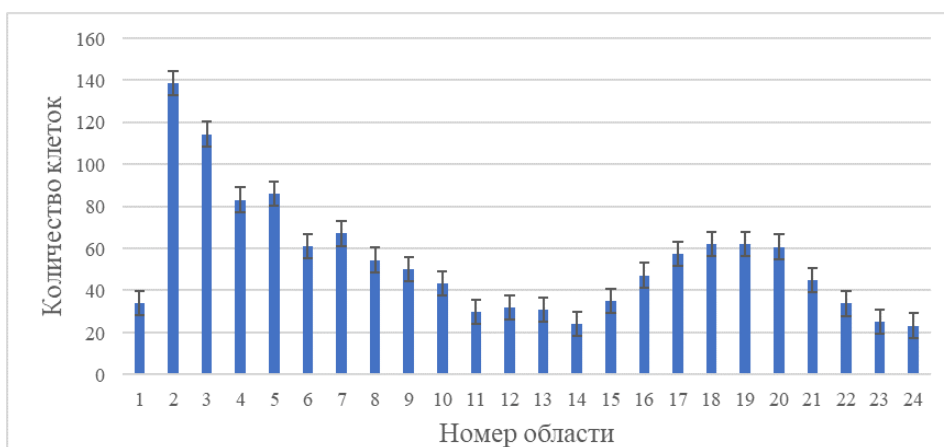


Рис. 6. Конечное распределение клеток (раствор Л-Л) Fig. 6. Final distribution of cells (L-L solution)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные результаты согласуются с данными методики биотестирования с применением прибора серии «Биотестер». Через 30 минут эксперимента наблюдается значимое увеличение концентрации в верхней области кюветы, что соответствует типичному поведению тест-организма в безопасных условиях.

Оценка тест-реакции микроорганизмов при низкой концентрации токсиканта.

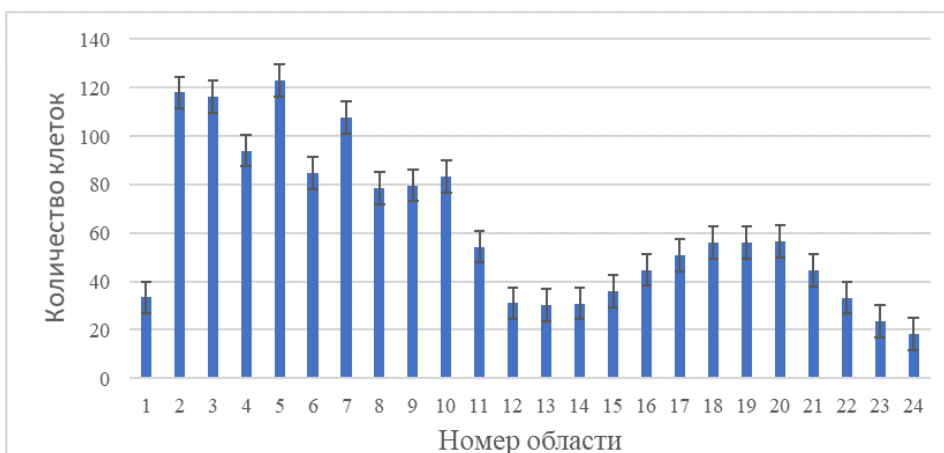


Рис. 7. Начальное распределение клеток (раствор CuSO_4 , конц. 0,1 мг/дм³) Fig. 7. Initial cell distribution (CuSO_4 solution, concentration 0.1 mg/dm³)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

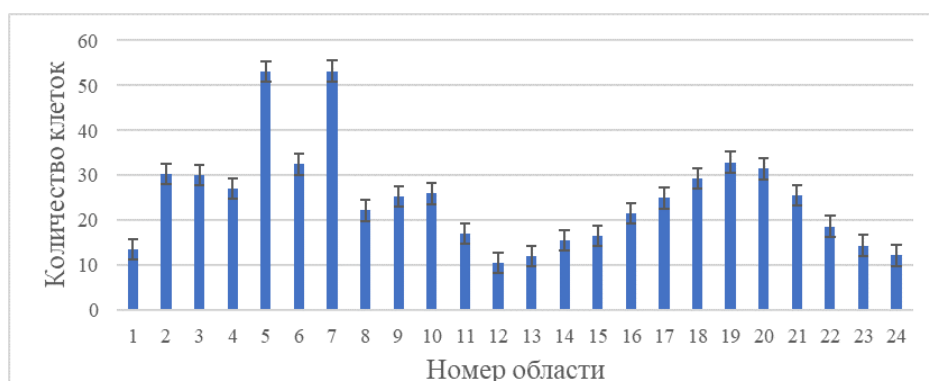


Рис. 8. Конечное распределение клеток (раствор CuSO_4 , конц. 0,1 мг/дм³) Fig. 8. Final distribution of cells (CuSO_4 solution, concentration 0.1 mg/dm³)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В ходе эксперимента было установлено, что клетки микроорганизмов мигрировали в исследуемый раствор, как и предполагалось ранее, однако последующее снижение общей концентрации микроорганизмов указывает на то, что даже при низких концентрациях сульфата меди (II) сохраняется его токсическое воздействие, что приводит к гибели клеток.

Оценка тест-реакции микроорганизмов при воздействии высокой концентрации токсиканта.

В ходе данного эксперимента оценивалось изменение пространственно-временного распределения микроорганизмов *Paramecium Caudatum* при воздействии опасной концентрации токсиканта в растворе.

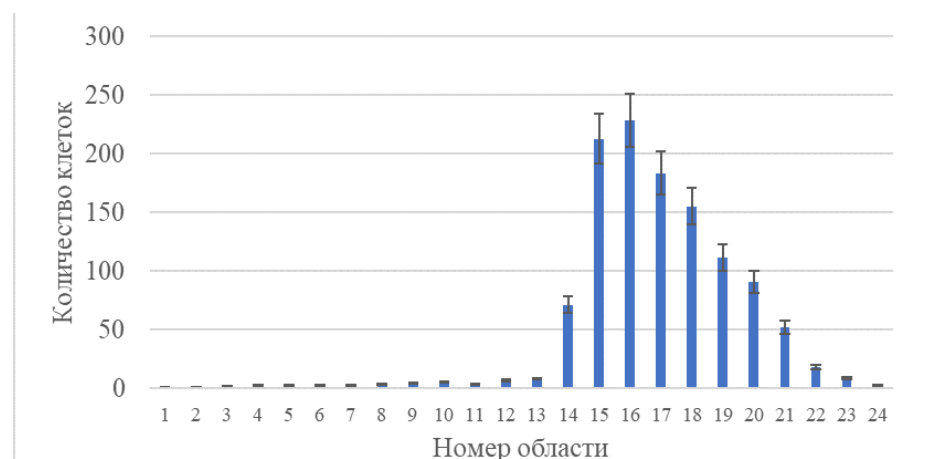


Рис. 9. Конечное распределение клеток (раствор CuSO_4 , конц. 1 мг/дм³) Fig. 9. Final distribution of cells (CuSO_4 solution, concentration 1 mg/dm³)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

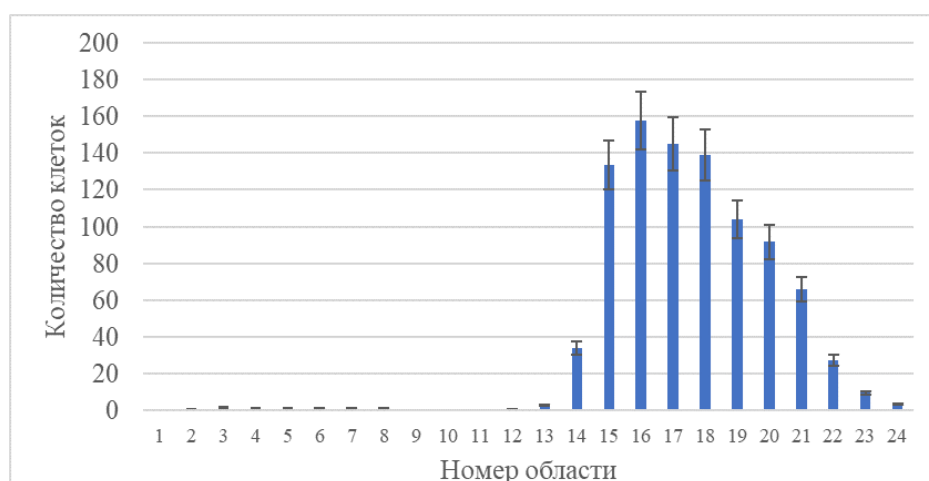


Рис. 10. Конечное распределение клеток (раствор CuSO_4 , конц. 1 мг/дм³) Fig. 10. Final distribution of cells (CuSO_4 solution, concentration 1 mg/dm³)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты эксперимента продемонстрировали, что микроорганизмы сохранили локализацию в безопасной зоне кюветы, избегая областей с повышенной концентрацией токсиканта.

Заключение (Conclusion)

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность разработанного аппаратно-программного комплекса для биотестирования водных сред. Установлены статистически значимые различия в поведении инфузорий при воздействии растворов различного уровня токсического воздействия:

– В контрольной пробе (раствор Л-Л) наблюдалась активная миграция $\geq 80\%$ популяции в верхнюю зону кюветы, что соответствует проявлению нормальной хемотаксической реакции.

– При внесении токсиканта (CuSO_4 , 1 мг/л) 90% клеток сохранили локализацию в исходной области, демонстрируя реакцию избегания, что свидетельствует о высокой чувствительности метода к наличию загрязнителей.

Полученные результаты подтверждают, что комплекс обеспечивает:

1. Высокую точность: Данный подход обеспечивает высокий уровень детекции клеток.

2. Экспресс-анализ: Время проведения эксперимента сокращено до 30 минут против 2-4 часов для традиционных методов.

3. Универсальность: Возможность работы с мутными средами без предварительной подготовки проб.

Практическая значимость исследования заключается в создании инструмента для оперативного мониторинга токсичности в полевых условиях, что актуально для задач экологического контроля и ликвидации последствий техногенных аварий.

Перспективы дальнейших исследований:

– Расширение базы тест-реакций за счет включения дополнительных биомаркеров (например, изменение частоты биения ресничек).

– Адаптация системы для работы с другими типами загрязнителей (нефтепродукты, пестициды).

Система демонстрирует устойчивость к шумам и артефактам видеосъёмки, что подтверждается повторяемостью результатов в трёх независимых сериях экспериментов. Погрешность анализа составляет не более 5%, что сопоставимо с уровнем стандартных лабораторных методов биотестирования.

Разработанный метод открывает новые возможности для интеграции биотестирования в системы автоматизированного экологического мониторинга, сочетая высокую информативность с минимальными временными и ресурсными затратами.

Литература

1. United Nations Environment Programme. UNEP Annual Report 2023. 2023. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44777/UNEP_Annual_Report_2023.pdf?sequence=19 (дата обращения: 20.02.2025).
2. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/2021/> (дата обращения: 20.02.2025).
3. Семенова М.И., Смирнов А.В., Веженкова И.В., Кустов Т.В., Ковалевская А.С. Особенности пробоподготовки водных вытяжек компонентов солнечных панелей в целях биотестирования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – С. 211–220.
4. Олькова А.С. Актуальные направления развития методологии биотестирования водных сред // Вода и экология: проблемы и решения. – 2018. – № 2. – С. 40–49.
5. Семенова М.И., Смирнов А.В., Веженкова И.В., Кустов Т.В., Ковалевская А.С. Влияние растворённого кислорода в среде на индексы токсичности, получаемые различными методами биотестирования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – № 1. – С. 38–49.
6. Брежнева И.Н., Трифонова М.П. Биотестирование бурового шлама на экотоксичность // Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 3.
7. Горгуленко В.В., Кириллов В.В., Ким Г.В., Ковешников М.И. Оценка качества донных отложений реки Аба методами биоиндикации и биотестирования // Вестник ННГУ. – 2011. – № 2–2.
8. Методика определения токсичности проб природных, питьевых, хозяйственно-питьевых, хозяйственно-бытовых сточных, очищенных сточных, талых и технологических вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». ФР.1.39.2015.19242.
9. Захаров И.С., Завгородний А.В. Биотестовые аппаратные средства и методы контроля

локомоций инфузорий // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2008. – С. 205–209.

10. Олькова А.С. Процедура выбора методов биотестирования в условиях разных видов загрязнения // Трансформация экосистем. – 2022. – № 3 (17).

11. Завгородний А.В. Разработка метода и средств контроля пространственно-временного распределения оптических характеристик взвеси инфузорий для биотестирования водных сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2008. – 18 с.

12. Ciarrone G., Luque Sánchez F., Tabik S., Troiano L., Tagliaferri R., Herrera F. Deep Learning in Video Multi-Object Tracking: A Survey // Neurocomputing. – 2020. – С. 61–88.

13. Esser P., Sutter E., Ommer B. A variational U-Net for conditional appearance and shape generation // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018. – P. 8857–8866.

14. Tian C., Xu Y., Fei L., Yan K. Deep Learning for Image Denoising: A Survey // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – № 384. – С. 61–88.

15. Лукашик Д.В. Анализ современных методов сегментации изображений // Экономика и качество систем связи. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 57–65.

Авторы публикации

Соколов Алексей – ассистент кафедры «Инженерной защиты окружающей среды» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (им. Ульянова-Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-7522-3354/>. *asokolov@etu.ru*

References

1. United Nations Environment Programme. UNEP Annual Report 2023. 2023. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44777/UNEP_Annual_Report_2023.pdf?sequence=19 (accessed: 20.02.2025).

2. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/2021/> (accessed: 20.02.2025).

3. Semenova M.I., Smirnov A.V., Vezhenkova I.V., Kustov T.V., Kovalevskaya A.S. Osobennosti probopodgotovki vodnykh vytyazhek komponentov solnechnykh paneley v tselyakh biotestirovaniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2022. P. 211–220.

4. Ol'kova A.S. Aktual'nye napravleniya razvitiya metodologii biotestirovaniya vodnykh sred // Voda i ekologiya: problemy i resheniya. 2018. № 2. P. 40–49.

5. Semenova M.I., Smirnov A.V., Vezhenkova I.V., Kustov T.V., Kovalevskaya A.S. Vliyaniye rastvorennogo kisloroda v srede na indeksy toksichnosti, poluchaemye razlichnymi metodami biotestirovaniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2024. № 1. P. 38–49.

6. Brezhneva I.N., Trifonova M.P. Biotestirovaniye burovogo shlama na ekotoksichnost' // Problemy regional'noi ekologii. 2019. № 3.

7. Gorgulenko V.V., Kirillov V.V., Kim G.V., Koveshnikov M.I. Otsenka kachestva donnykh otlozhenii reki Aba metodami bioindikatsii i biotestirovaniya // Vestnik NNGU. 2011. № 2–2.

8. Metodika opredeleniya toksichnosti prob prirodnykh, pit'evykh, khozyaistvenno-pit'evykh, khozyaistvenno-bytovykh stochnykh, ochishchennykh stochnykh, talykh i tekhnologicheskikh vod ekspress-metodom s primeneniem pribora serii "Biotester". FR.1.39.2015.19242.

9. Zakharov I.S., Zavgordniy A.V. Biotestovye apparaturnye sredstva i metody kontrolya lokomotsii infuzorii // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2008. P. 205–209.

10. Ol'kova A.S. Protsedura vybora metodov biotestirovaniya v usloviyakh raznykh vidov zagryazneniya // Transformatsiya ekosistem. 2022. № 3 (17).

11. Zavgordniy A.V. Razrabotka metoda i sredstv kontrolya prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya opticheskikh kharakteristik vzvesi infuzorii dlya biotestirovaniya vodnykh sred: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Saint Petersburg, 2008. 18 p.

12. Ciarrone G., Luque Sánchez F., Tabik S., Troiano L., Tagliaferri R., Herrera F. Deep Learning in Video Multi-Object Tracking: A Survey // Neurocomputing. 2020. P. 61–88.

13. Esser P., Sutter E., Ommer B. A Variational U-Net for Conditional Appearance and Shape Generation // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 8857–8866.

14. Tian C., Xu Y., Fei L., Yan K. Deep Learning for Image Denoising: A Survey // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. № 384. P. 61–88.

15. Lukashik D.V. Analiz sovremennykh metodov segmentatsii izobrazhenii // Ekonomika i kachestvo sistem svyazi. 2022. Vol. 24, № 2. P. 57–65.

Authors of the publication

Alexey Sokolov – St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI” (named after Ulyanov-Lenin), Saint Petersburg, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-7522-3354/>. asokolov@etu.ru

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **12.05.2025 г.**

Отредактировано **02.08.2025 г.**

Принято **11.08.2025 г.**

ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ



DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-6-38-48

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЙЕСОВСКОГО МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И НЕДОСТАТКА СВЕДЕНИЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Звягин Л.С.

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва,
Россия
sdimif@yahoo.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в необходимости повышения точности и надежности информационно-измерительных систем (ИИС) в условиях неопределённости и неполноты информации. Современные ИИС повсеместно внедряются в критически важные сферы, где эффективность их работы напрямую зависит от способности справляться с двумя типами неопределённости: стохастической (случайной) и эпистемической (системной). Классические методы математической статистики испытывают трудности с формализацией эпистемической неопределённости, что делает актуальным поиск новых подходов. ЦЕЛЬ работы – обосновать эффективность использования байесовского подхода для решения задач повышения точности ИИС в условиях неопределённости. МЕТОДЫ. Применяется байесовский подход к теории вероятностей, который трактует вероятность как меру уверенности. Ключевым инструментом является теорема Байеса, которая объединяет априорные знания о величине с информацией из новых экспериментальных данных для получения уточнённой, апостериорной оценки. В статье рассматривается применение байесовского подхода к типовой задаче оценки физической величины, а также обсуждаются более сложные модели, такие как иерархические байесовские модели и байесовские сети. РЕЗУЛЬТАТЫ. Байесовский анализ поможет получить не просто точечную оценку, а полное апостериорное распределение вероятностей, которое содержит исчерпывающую информацию об измеряемой величине, чтобы адекватно оценивать неопределённость и принимать решения с минимальным риском. На примере типовой задачи показано, что байесовский синтез информации всегда приводит к снижению неопределённости и повышению точности оценки. Обсуждается применение байесовского подхода в концепции байесовской интеллектуализации измерений, что ведёт к созданию адаптивных ИИС, способных непрерывно обновлять свои внутренние модели. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование байесовского подхода является эффективной и универсальной стратегией для повышения точности и надёжности ИИС. Несмотря на вычислительную сложность и вызовы, связанные с выбором априорных распределений, данный подход предоставляет единый теоретический каркас для решения многих задач. Байесовский подход открывает перспективы для создания ИИС нового поколения, способных эффективно работать с разнородными данными и обеспечивать требуемое качество измерительной информации в сложных условиях.

Ключевые слова: байесовский подход; информационно-измерительная система; неопределённость; апостериорная плотность распределения; принятие решений; интеллектуализация измерений; байесовская сеть.

Для цитирования: Звягин Л.С. Использование байесовского метода повышения точности измерений в условиях неопределённости и недостатка сведений информационно-измерительных систем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 38-48. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-38-48.

USING THE BAYESIAN METHOD TO IMPROVE MEASUREMENT ACCURACY IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY AND LACK OF INFORMATION FROM INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

Zvyagin L.S.

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia
sdimif@yahoo.com

Abstract: *RELEVANCE* of the research lies in the need to improve the accuracy and reliability of information and measurement systems (AIS) in conditions of uncertainty and incompleteness of information. Modern AIS are being widely implemented in critical areas, where their effectiveness directly depends on their ability to cope with two types of uncertainty: stochastic (random) and epistemic (systemic). Classical methods of mathematical statistics have difficulty formalizing epistemic uncertainty, which makes it urgent to search for new approaches. *THE PURPOSE* of the work is to substantiate the effectiveness of using the Bayesian approach to solve problems of improving the accuracy of AIS in conditions of uncertainty. *METHODS.* The Bayesian approach to probability theory is applied, which treats probability as a measure of confidence. The key tool is Bayes' theorem, which allows combining a priori knowledge of magnitude with information from new experimental data to obtain a refined, a posteriori estimate. The article examines the application of the Bayesian approach to the typical problem of estimating a physical quantity, and discusses more complex models such as hierarchical Bayesian models and Bayesian networks. *RESULTS.* The Bayesian approach to probability theory is applied, which treats probability as a measure of confidence. The key tool is Bayes' theorem, which allows combining a priori knowledge of magnitude with information from new experimental data to obtain a refined, a posteriori estimate. The article examines the application of the Bayesian approach to the typical problem of estimating a physical quantity, and discusses more complex models such as hierarchical Bayesian models and Bayesian networks. *results.* Bayesian analysis allows us to obtain not just a point estimate, but a complete a posteriori probability distribution that contains comprehensive information about the measured value. This makes it possible to more adequately assess uncertainty and make decisions with minimal risk. Using the example of a typical task, it is shown that Bayesian information synthesis always leads to a decrease in uncertainty and an increase in estimation accuracy. The application of the Bayesian approach in the concept of Bayesian measurement intellectualization is discussed, which leads to the creation of adaptive AIS capable of continuously updating their internal models. *CONCLUSION.* Using the Bayesian approach is an effective and versatile strategy to improve the accuracy and reliability of an AIS. Despite the computational complexity and challenges associated with the choice of a priori distributions, this approach provides a unified theoretical framework for solving a wide range of problems. This opens up prospects for creating a new generation of AIS capable of efficiently working with heterogeneous data and providing the required quality of measurement information in difficult conditions.

Keywords: *Bayesian approach; information and measurement system; uncertainty; posterior distribution density; decision making; measurement intellectualization; Bayesian network.*

For citation: Zvyagin L.S. Using the Bayesian method to improve measurement accuracy in conditions of uncertainty and lack of information from information and measurement systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 38-48. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-38-48.

Введение (Introduction)

Современный этап развития науки и техники характеризуется повсеместным внедрением сложных информационно-измерительных систем (ИИС) в критически важные сферы деятельности, промышленную автоматизацию, энергетику, медицину, экологический мониторинг и управление киберфизическими системами [1]. Основной задачей таких систем является получение достоверной информации об объектах и процессах для последующего принятия управленческих решений. Особенно критична надежность ИИС в таких областях, как управление автономными транспортными средствами, мониторинг состояния умных энергетических сетей (Smart Grids) и

прецизионная (точной дозировки) медицина, где эффективность их работы напрямую зависит от их способности обеспечивать требуемую точность измерений в реальных условиях эксплуатации, которые практически всегда сопровождаются факторами неопределенности и неполноты информации [2].

Неопределенность в ИИС имеет двойственную природу. С одной стороны, стохастическая (случайная) неопределенность, обусловленная флуктуационными процессами в объекте и средствах измерений. С другой стороны, эпистемическая (системная) неопределенность, связанная с неполнотой наших знаний о модели объекта, точности измерительных приборов, влияющих факторах и систематических погрешностях [3]. Классические методы обработки данных, базирующиеся на аппарате математической статистики частотного толка, эффективно справляются со стохастическими компонентами, однако испытывают значительные трудности при формализации и учете эпистемической неопределенности [4]. Они, как правило, не предоставляют формального механизма для включения в модель априорной информации, полученной из предыдущих экспериментов, физических законов или экспертных оценок.

В этих условиях особую актуальность приобретают методы, основанные на байесовском подходе к теории вероятностей. Байесовская методология трактует вероятность не как предельную частоту события, а как меру уверенности или степень доверия к определенному суждению при наличии имеющейся информации [5]. Такой подход помогает органично объединять априорные знания об измеряемой величине с информацией, содержащейся в новых экспериментальных данных, для получения уточненной, апостериорной оценки. Именно данная особенность делает байесовский подход мощным инструментом для повышения точности ИИС в условиях неполноты и неопределенности информации.

Материалы и методы (Materials and methods)

Методологической базой исследования выступает теория вероятностей и математическая статистика, в частности, байесовская теория статистических решений. Исследование опирается на фундаментальные принципы байесовской интеллектуализации измерительных процессов, предложенные и развитые в работах С. В. Прокопчиной [5-7]. В качестве основного математического инструмента используется теорема Байеса, которая формализует процедуру обновления знаний об измеряемой величине по мере поступления новых данных.

В работе применяется системный анализ для декомпозиции общей задачи обработки информации в ИИС на три функциональных составляющих, чтобы формализовать и интегрировать все источники неопределенности:

- Модель априорной неопределенности $p(\theta)$, отражающая существующие знания (или их недостаток) о параметре до проведения текущего измерения (эпистемическая неопределенность).
- Модель процесса измерения (функция правдоподобия) $p(D|\theta)$, описывающая стохастические свойства измерительного прибора и случайные погрешности (стохастическая неопределенность).
- Модель синтеза апостериорной информации $p(\theta|D)$, представляющая процедуру обновления знаний по теореме Байеса.

Для описания сложных взаимосвязей между различными источниками неопределенности и параметрами системы используются элементы теории иерархических байесовских моделей (ИБМ) и байесовских сетей. ИБМ используются для построения многоуровневых моделей, учитывающих неопределенность в самой измерительной модели (например, калибровочных коэффициентов или параметров погрешностей Θ). Байесовские сети применяются для моделирования причинно-следственных связей и распространения информации между взаимозависимыми измеряемыми величинами.

Анализ и обобщение существующих научных результатов в данной области проводятся на основе изучения работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных применению байесовских технологий в измерительной технике, управлении рисками и интеллектуализации систем [8-10]. Синтез этих подходов помог сформулировать обобщенное уравнение байесовской оценки в ИИС и определить его место в структуре современных киберфизических систем и технологий Индустриального Интернета вещей (IIoT) [11].

Результаты (Results)

Байесовский подход как парадигма, в рамках которой происходит логический вывод в условиях неопределенности. Основой подхода является теорема Байеса, которая связывает условные вероятности двух событий [12]. В обработке данных и измерениях,

теорема дает обновить уверенность в значении некоторого параметра θ после получения новых данных D . В математической форме для непрерывных величин, теорема записывается как:

$$p(\theta | D) = \frac{p(D | \theta) \cdot p(\theta)}{p(D)} \quad (1)$$

где $p(\theta)$ – априорная плотность распределения вероятностей (prior probability density). Она описывает наши знания или представления о параметре θ до получения данных D . Формализованное выражение эпистемической неопределенности, основанное на предыдущих измерениях, теоретических моделях, паспортных данных приборов или экспертных оценках [13];

$p(D|\theta)$ – функция правдоподобия (likelihood function) описывает вероятность получения данных D при заданном значении параметра θ . Функция фактически является стохастической моделью самого процесса измерения, связывающей истинное значение величины с наблюдаемыми данными и учитывающей случайные погрешности [14];

$p(\theta|D)$ – апостериорная плотность распределения вероятностей (posterior probability density). Результат байесовского вывода, представляющий обновленные знания о параметре θ после учета данных D . Апостериорное распределение является синтезом априорных знаний и информации, извлеченной из эксперимента;

$p(D)$ – свидетельство или маргинальное правдоподобие (evidence), полная вероятность наблюдения данных D , вычисляемая как интеграл по всему пространству возможных значений θ : $p(D) = \int p(D|\theta)p(\theta)d\theta$. В задачах оценки параметров $p(D)$ выступает в роли нормировочного множителя, который обеспечивает выполнение условия $\int p(\theta|D)d\theta = 1$.

Отличие байесовского подхода от классического заключается в том, что его результатом является не точечная оценка параметра и ее дисперсия, а полное апостериорное распределение $p(\theta|D)$. Распределение содержит всю имеющуюся информацию об измеряемой величине θ и дает не только найти наиболее вероятное значение (например, математическое ожидание или моду распределения), но и оценить неопределенность значения через вычисление дисперсии, стандартного отклонения или построение доверительных (в байесовской терминологии – правдоподобных) интервалов [15]. Такой подход обеспечивает полное и адекватное описание результата измерения в условиях неопределенности, а также является основой повышения надежности ИИС.

Рассмотрим применение данного подхода к типовой задаче ИИС – оценке некоторой физической величины x по результатам прямых измерений y . Пусть модель измерений имеет вид:

$$y = x + \epsilon \quad (2)$$

где x – истинное, но неизвестное значение измеряемой величины, а ϵ – случайная погрешность измерения.

Для применения байесовского подхода необходимо определить два ключевых компонента: априорное распределение $p(x)$ и функцию правдоподобия $p(y|x)$.

Формализация априорной информации $p(x)$. В условиях реальной ИИС информация о величине x практически всегда существует. Например, диапазон допустимых значений, заданный технологическим регламентом, или результаты предыдущих измерений. Предположим, на основе априорных данных мы можем утверждать, что значение x распределено по нормальному закону со средним x_0 и дисперсией σ_0^2 :

$$p(x) \sim N(x_0, \sigma_0^2) \quad (3)$$

Здесь x_0 – наше лучшее предположение до измерения, а σ_0^2 – мера нашей неуверенности измерения.

Формализация функции правдоподобия $p(y|x)$. Функция правдоподобия определяется характеристиками измерительного прибора. Если предположить, что погрешность измерения ϵ имеет нормальное распределение с нулевым средним и известной дисперсией σ_y^2 (которая характеризует точность прибора), то правдоподобие получения измерения y при истинном значении x также будет нормальным распределением:

$$p(y | x) \sim N(x, \sigma_y^2) \quad (4)$$

Применив теорему Байеса, можно показать, что при нормальных априорном распределении и функции правдоподобия апостериорное распределение $p(x|y)$ также будет нормальным с параметрами:

– Апостериорное среднее (обновленная оценка x):

$$\hat{x}'_{post} = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_0^2 + \sigma_y^2} x_0 + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2 + \sigma_y^2} y \quad (5)$$

– Апостериорная дисперсия (обновленная неопределенность):

$$\sigma_{post}^2 = \frac{\sigma_0^2 \sigma_y^2}{\sigma_0^2 + \sigma_y^2} \quad (6)$$

Анализ формул показывает, что апостериорная оценка \hat{x}'_{post} является взвешенным средним априорной оценки x_0 и нового измерения y . Веса определяются соотношением неопределенностей, если априорные знания точны (σ_0^2 мало), больший вес придается x_0 . Если же измерение очень точное (σ_y^2 мало), больший вес получает y . Важно отметить, что апостериорная дисперсия σ_{post}^2 всегда меньше как априорной σ_0^2 , так и измерительной σ_y^2 . Математически доказывает, что байесовский синтез информации, всегда формально объединяющий априорные знания и данные измерения, всегда приводит к снижению неопределенности и, следовательно, к повышению точности оценки измеряемой величины. Надежность ИИС определяется не только точностью, но и адекватностью оценки неопределенности и способностью системы к принятию статистически обоснованных решений. Байесовский подход обеспечивает это благодаря полному вероятностному описанию. На выходе мы получаем не точечную оценку, а полное апостериорное распределение, чтобы количественно оценить вероятность нахождения истинного значения в любом заданном диапазоне (правдоподобный интервал). Интеграция эпистемической неопределенности происходит за счет включения в модель гиперпараметров (Θ) в обобщенном уравнении байесовской оценки система учитывает и обновляет неопределенность в самой математической модели (например, дрейф калибровочных коэффициентов), которая критически важна для надежности в долгосрочной эксплуатации.

Обобщенное уравнение байесовской оценки в ИИС представим в концептуальной форме, отражающей процесс «интеллектуализации» измерений:

$$P_{post}(X|Y) = B(P_{prior}(X, \Theta), L(Y|X, \Theta), Y) \quad (7)$$

где $P_{post}(X|Y)$ – совместное апостериорное распределение вектора интересующих величин X , B – обобщенный байесовский оператор, реализующий вычисление по формуле Байеса, $P_{prior}(X, \Theta)$ – совместное априорное распределение, описывающее наши знания о векторе величин X и векторе гиперпараметров Θ (например, параметры погрешностей, калибровочные коэффициенты), чтобы учитывать неопределенность в самой модели, $L(Y|X, \Theta)$ – модель правдоподобия, являющаяся математической моделью ИИС, которая связывает вектор измерений Y с оцениваемыми величинами X и параметрами системы Θ , Y – вектор поступивших данных. На практике, для многомерного случая, оператор B редко имеет аналитическое решение и реализуется через сложные численные алгоритмы, в частности, методы Монте-Карло по схемам цепей Маркова (МСМС) или методы вариационного вывода. Данные методы помогают аппроксимировать многомерные интегралы, необходимые для вычисления апостериорного распределения $P(X|Y)$, и получить набор случайных выборок, характеризующих такое распределение.

Обобщенное уравнение подчеркивает, что байесовский подход не просто обрабатывает данные, а строит полную вероятностную модель системы, интегрируя все доступные источники информации для получения наиболее полного и точного знания об объекте измерения. Реальные ИИС часто имеют сложные, многокомпонентные структуры. Например, оценка состояния технологического объекта требует одновременного измерения температуры, давления и расхода, причем величины могут быть взаимосвязаны, а точность каждого измерительного канала зависит от внешних условий. Для моделирования таких систем используются иерархические байесовские модели (ИБМ) и байесовские сети. В таблице 1 описаны узлы (переменные) и их вероятностные зависимости в упрощенной байесовской сети, предназначенной для повышения точности измерений и диагностики системных ошибок (например, дрейфа калибровки) в ИИИС.

Таблица 1

Table 1

Иерархическая Байесовская модель для ИИИС

Hierarchical Bayesian model for AIIS

№	Название узла (Переменной)	Уровень иерархии	Роль	Влияющие узлы	Узлы, на которые влияет
1	Гиперпараметр (надежность датчиков)	Верхний (Априорный)	Задаёт априорное распределение для параметров низкого	Нет	Параметр (дрейф калибровки)

			уровня. Отражает долгосрочную, общую неопределенность в качестве и стабильности всей группы датчиков.		
2	Априорные знания $\rightarrow P(X)$	Верхний (Априорный)	Предварительное распределение вероятности измеряемой величины, основанное на прошлых данных или экспертной оценке (например, ожидаемый диапазон температуры).	Нет	Параметр (дрейф калибровки)
3	Параметр (дрейф калибровки)	Средний (параметры модели)	Скрытая переменная, которая моделирует систематическую ошибку или смещение в измерении. Оценивается на основе Гиперпараметров и Априорных знаний.	Гиперпараметр (надежность), Априорные знания	Наблюдение данных (правдоподобие)
4	Правдоподобие (измерительный шум)	Средний (параметры модели)	Модель стохастической неопределенности (случайного шума), описывающая, насколько сильно истинное значение искажается. На него влияет систематический дрейф.	Параметр (дрейф калибровки), Истина температура объекта	Наблюдаемые данные (температура)
5	Истинная температура объекта	Нижний (скрытое состояние)	Фактическое, но неизвестное состояние измеряемой физической величины. Это ключевая переменная, которую мы стремимся оценить.	Наблюдаемые данные	Наблюдаемые данные (температура), Истинное состояние объекта
6	Наблюдаемые данные (температура)	Нижний (наблюдаемые данные)	Единственный наблюдаемый узел. Фактический результат, полученный от датчика. Вся информация для обучения сети поступает через этот узел.	Истина температура объекта, Наблюдаемые данные	Принятие решений, Интеллектуальная диагностика
7	Принятие решений	Нижний (Выход)	Вывод о состоянии объекта или сигнал к действию, основанный на оценке Истинной Температуры через Наблюдаемые Данные.	Наблюдаемые данные (температура)	Нет
8	Управляющее воздействие	Нижний (Вход)	Внешний сигнал, применяемый к объекту (например,	Нет	Интеллектуальная диагностика

			включение нагревателя/охлаждителя).		
9	Интеллектуальная диагностика	Нижний (промежуточное состояние)	Скрытая переменная, оценивающая общее состояние системы (например, "норма", "перегрев", "сбой").	Наблюдаемые данные Управляющее воздействие	Параметр воздействия Истинное состояние объекта
10	Параметр воздействия	Средний (параметры модели)	Описывает, насколько эффективно управляющее воздействие повлияло на объект.	Интеллектуальная диагностика	Истинное состояние объекта
11	Истинное состояние объекта	Нижний (скрытое состояние)	Обобщенное, истинное состояние всей системы (например, "система стабилизируется").	Истина Температура объекта Параметр воздействия, Интеллектуальная диагностика	Нет

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

ИБМ помогают строить многоуровневые модели неопределенности. На нижнем уровне находятся данные измерений. На среднем – параметры моделей отдельных процессов (например, измеряемые величины $x(1,)$, $x(2,)$...) На верхнем уровне находятся гиперпараметры, которые описывают общие свойства для группы параметров (например, средняя погрешность для определенного типа датчиков). Такой подход дает системе «заимствовать силу» из совокупности данных, уточняя оценки даже для тех каналов, по которым имеется мало информации.

Байесовские сети содержат ориентированные ациклические графы, где узлы – переменные (измеряемые величины, параметры, гипотезы), а ребра – вероятностные зависимости между ними. Они являются идеальным инструментом для моделирования причинно-следственных связей и распространения информации в сложных ИИС. Например, аномальное показание одного датчика (следствие) проанализировано с точки зрения вероятности различных причин (неисправность датчика, реальное изменение в объекте), что является основой для интеллектуальной диагностики и принятия решений [3].

Применение байесовского подхода лежит в основе концепции байесовской интеллектуализации измерений, так как предполагает создание адаптивных ИИС, которые [6, 9]:

- Формализуют и используют всю доступную априорную информацию.
- Непрерывно обновляют свои внутренние вероятностные модели по мере поступления новых данных.
- Оценивают не только значения величин, но и неопределенность этих оценок.
- Используют апостериорные распределения для принятия решений с минимальным риском, например, в системах управления или предиктивной аналитики [10].

Более того, байесовские методы находят применение в обучении современных моделей машинного обучения, таких как нейронные сети. Использование регуляризирующего байесовского подхода помогает бороться с переобучением и получать не только точечный прогноз, но и оценку его неопределенности, что критически важно для надежности интеллектуальных систем [8]. Также открывает путь к созданию гибридных ИИС, где физические модели объекта интегрируются с моделями на основе данных в единой байесовской структуре.

Обсуждение (Discussions)

Внедрение байесовского подхода в практику проектирования и эксплуатации ИИС сопровождается как существенными методологическими преимуществами, так и технологическими вызовами. Ключевое достоинство данного подхода заключается в его строгой универсальности, предоставляющей единый теоретико-вероятностный каркас для решения широкого спектра задач: от прецизионной калибровки первичных преобразователей и стохастической фильтрации сигналов до комплексной вероятностной оценки состояния объекта и риск-ориентированного анализа в системах управления [1, 10,

11]. Способность к формализованной инкорпорации априорной информации и получению на выходе полного апостериорного распределения является фундаментальным требованием для повышения достоверности измерений, особенно в условиях дефицита экспериментальных данных или при доминировании эпистемической неопределенности.

В интеллектуализации измерительных процессов целесообразно провести компаративный анализ байесовского подхода с конкурирующими методологиями, направленными на квантификацию неопределенности. По сравнению с классической (фреквентистской) статистикой, байесовский метод имеет высокую эвристическую гибкость. Фреквентистские методы, такие как метод наименьших квадратов или проверка статистических гипотез на основе p -значений, преимущественно сосредоточены на стохастической неопределенности, трактуя измеряемую величину как фиксированный, но непознанный параметр. Их преимуществами являются вычислительная простота и широкая стандартизация. Однако, существенным ограничением фреквентистского подхода является принципиальная невозможность формального включения априорных знаний в математическую модель. Получаемые при этом доверительные интервалы характеризуют свойства самой процедуры оценивания, а не меру уверенности в конкретной оценке параметра. Таким образом, фреквентистский аппарат неэффективен при необходимости формализации эпистемической неопределенности, обусловленной неполнотой сведений о систематических погрешностях или неадекватностью модели. Байесовский подход нивелирует указанные недостатки, предоставляя правдоподобные интервалы, которые непосредственно отражают степень субъективной уверенности исследователя или системы, и обеспечивает итеративный синтез априорных данных с новой измерительной информацией, что критически важно в условиях холостого старта ИИС или при работе с редко возникающими событиями. В отношении невероятностных методов, таких как теория нечетких множеств и интервальный анализ, байесовская модель также имеет фундаментальные различия. Нечеткая логика оперирует концепцией степени принадлежности, что находит применение в моделировании качественных, лингвистических оценок (например, «температура высокая») и эффективно для реализации эвристических алгоритмов управления. Однако, в нечеткой логике отсутствует строгий математический механизм обновления знаний при поступлении новых данных, а определение функций принадлежности носит субъективный характер, что затрудняет вероятностное сравнение неопределенностей и минимизацию рисков. Интервальный анализ использует детерминированные границы для гарантированного включения истинного значения, обеспечивая абсолютную робастность оценок. При этом его основным недостатком является феномен взрывного роста интервалов при последовательной обработке, который быстро приводит к потере информативности границ неопределенности и не дает определить плотность вероятности внутри интервала. Напротив, байесовский синтез обеспечивает динамическое апостериорное сужение распределения, которое прямо пропорционально информативности поступающих данных, и является основой для статистически обоснованного принятия решений, базирующегося на ожидаемой функции полезности или минимизации потерь.

Несмотря на методологическое превосходство, практическая реализация байесовских методов сопряжена с вычислительной трудоемкостью, требующей применения сложных численных алгоритмов, таких как методы Монте-Карло по схемам цепей Маркова (МСМС) или вариационный вывод, для аппроксимации многомерных интегралов апостериорного распределения [5]. К ограничениям относится критическая чувствительность к спецификации вероятностной модели:

1. Чувствительность к выбору априорных распределений. В условиях высокой априорной эпистемической неопределенности (например, для новых технологических процессов) выбор неинформативного априора представляет нетривиальную методологическую задачу. При отсутствии объективных информативных априоров исследователю приходится использовать слабоинформативные распределения, что может быть расценено как привнесение субъективного элемента в процедуру оценивания. На начальных этапах функционирования ИИС, когда объем накопленных данных D минимален, апостериорное распределение $p(\theta|D)$ может быть неадекватно смещено в сторону некорректно выбранного априорного распределения $p\theta$, который потенциально влечет ошибочные управляющие воздействия в критических системах.

2. Чувствительность к некорректно заданной модели правдоподобия $L(Y|\theta)$. Достоверность байесовского вывода напрямую зависит от адекватности функции правдоподобия $p(D|\theta)$, которая имеет стохастическую модель процесса измерения. Если математическое описание случайной погрешности (например, использование

нормального распределения вместо более адекватного тяжелохвостого распределения для описания реального шума), задано неточно, но неизбежно приведет к искажению апостериорного распределения. В таком случае система может переоценивать свою уверенность в получаемой оценке, формируя чрезмерно узкие правдоподобные интервалы. В иерархических байесовских моделях (ИБМ), где взаимозависимость между параметрами высока, ошибка в спецификации условных вероятностей для одной скрытой переменной может каскадно деформировать вывод по всей структуре, требуя тщательной верификации на основе экспертных знаний об измерительном процессе.

Несмотря на указанные ограничения, потенциал байесовского подхода в интеллектуализации ИИС является наиболее перспективным. Он обеспечивает переход от пассивного статистического анализа к активному вероятностному обучению системы. Иерархические структуры помогают реализовать механизм «заимствования силы» между однотипными измерительными каналами, повышая точность оценки даже в тех сегментах, где объем локальных данных недостаточен.

Таким образом, байесовская методология имеет наиболее полный и математически последовательный аппарат для интеграции разнородных знаний и эмпирических данных с конечной целью минимизации операционных рисков в критически важных информационно-измерительных комплексах.

Дальнейшие научные исследования целесообразно сосредоточить на разработке адаптивных априорных и правдоподобных моделей, способных к автоматической самопроверке адекватности в процессе эксплуатации, чтобы существенно снизить зависимость итогового результата от ошибок начальной модельной спецификации.

Заключение или Выводы (Conclusions)

Проведенное исследование подтверждает, что использование байесовского подхода является эффективной стратегией для повышения точности и надежности информационно-измерительных систем, работающих в условиях неопределенности и неполноты информации. Данный подход предоставляет последовательную и математически обоснованную методологию для синтеза априорных знаний об измеряемом объекте и информации, содержащейся в экспериментальных данных.

Результатом байесовского анализа является апостериорное распределение вероятностей, которое служит исчерпывающей характеристикой измеряемой величины после проведения эксперимента. Оно не только помогает получить точечную оценку и количественную меру ее неопределенности, но и является основой для принятия статистически обоснованных решений в задачах управления, диагностики и прогнозирования.

Разработанные в рамках концепции байесовской интеллектуализации обобщенные модели, иерархические структуры и интеграция с методами машинного обучения открывают перспективы для создания ИИС нового поколения. Такие системы способны адаптивно корректировать свои внутренние модели, эффективно работать с разнородными источниками данных и обеспечивать требуемое качество измерительной информации в самых сложных и нестационарных условиях, что является необходимым условием для дальнейшего прогресса в области автоматизации, управления и создания киберфизических систем.

Литература

1. Бормотов И.В. Методология байесовских интеллектуальных измерений для информационных систем и ее применение к изучению ценностного мира российской молодежи // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2023. Т. 1. С. 6-9.
2. Захаров И.П. Оценивание расширенной неопределённости измерений при реализации байесовского подхода // Измерительная техника. 2018. № 4. С. 18-21.
3. Лепеш А.Г. Байесовские технологии разработки и принятия решений в управлении предприятиями(организациями) // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2016. № 1(35). С. 68-71.
4. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В., Чернявский Е.А. Информационные технологии интеллектуализации измерительных процессов. СПб.: Энергоатомиздат, 1995. 187 с.
5. Прокопчина С.В. Байесовские интеллектуальные технологии в задачах моделирования закона распределения в условиях неопределенности монография. М. Издательский дом «НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА», 2020. 292 с.
6. Прокопчина С.В. Концепция байесовской интеллектуализации измерений в задачах мониторинга сложных объектов // Новости искусственного интеллекта, М. 1997. № 3. С. 7–56.
7. Прокопчина С.В. Организация измерительных процессов в условиях неопределённости.

Регуляризирующий байесовский подход. СПб. Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-98. 1998. Т. 1. С. 30–44.

8. Прокопчина С.В. Методы байесовской математической статистики в обучении сверточной нейронной сети на основе регуляризирующего байесовского подхода / С. В. Прокопчина // Мягкие измерения и вычисления. 2022. Т. 58, № 9. С. 32–46.

9. Прокопчина С.В. Применение байесовских интеллектуальных технологий и интеллектуального ПоТ (ШоТ) в управлении киберфизическими системами в условиях неопределенности / С. В. Прокопчина // Мягкие измерения и вычисления. 2021. Т. 42, № 5. С. 38–54.

10. Птушкин А.И., Решетников Д.В., Шаповалов Д.В., Степенко А.Н. Байесовский подход к учету эпистемической неопределенности параметров вероятностных моделей анализа риска принимаемых решений // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11-1. С. 67–72.

11. Bormotov I.V. Methodology of Bayesian Intellectual Measurements for Information Systems and its Application to the Study of the Value System of Russian Youth // XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements: Proceedings of 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, 24–26 мая 2023 года. St. Petersburg, Russia: IEEE. 2023. P.7-10.

12. Машарипов Ш. М., Инагамджанов Д. Т., Зиямухамедов У. М. Теоретические основы оценки неопределённости измерений по типу А //Models and methods for increasing the efficiency of innovative research. – 2025. – Т. 4. – №. 45. – С. 125-128.

13. Степанов А. В., Чуновкина А. Г. О применении Байесовского подхода к построению интервала охвата при ограничениях на значения измеряемой величины //Эталоны. Стандартные образцы. – 2024. – Т. 20. – №. 4. – С. 89-102.

14. Ван Л. и др. Усовершенствованный алгоритм многоальтернативной фильтрации на основе байесовских сетей и его применение в интегрированной навигационной системе //Гирокоспия и навигация. – 2025. – Т. 33. – №. 2. – С. 48-71.

15. Мешкова А. Е., Ефремов Д. Е., Козубец А. В. Техническая диагностика отказов средств измерений //Вестник науки. – 2023. – Т. 4. – №. 12 (69). – С. 1496-1506.

Авторы публикации

Звягин Леонид Сергеевич – канд. экон. наук, доцент Кафедры моделирования и системного анализа Факультета информационных технологий и анализа больших данных, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-4983-6012>. sdimif@yahoo.com

References

1. Bormotov I.V. Methodology of Bayesian intelligent measurements for information systems and its application to the study of the value world of Russian youth // International Conference on Soft Computing and Measurements. 2023. Vol. 1. pp. 6-9.

2. Zakharov I.P. Estimation of extended measurement uncertainty in the implementation of the Bayesian approach // Measuring technology. 2018. No. 4. pp. 18-21.

3. Lepesh A.G. Bayesian technologies of development and decision-making in the management of enterprises (organizations) // Technical and technological problems of service. 2016. No. 1(35). pp. 68-71.

4. Nedosekin D.D., Prokopchina S.V., Chernyavsky E.A. Information technologies of intellectualization of measuring processes. St. Petersburg: Energoatomizdat, 1995. 187 p.

5. Prokopchina S.V. Bayesian intelligent technologies in problems of modeling the distribution law under conditions of uncertainty monograph. M. Publishing House "SCIENTIFIC LIBRARY", 2020. 292 p.

6. Prokopchina S.V. The concept of Bayesian intellectualization of measurements in monitoring tasks of complex objects // News of artificial intelligence, M. 1997. № 3. pp. 7-56.

7. Prokopchina S.V. Organization of measurement processes in conditions of uncertainty. The regularizing Bayesian approach. St. Petersburg. Collection of reports of the International Conference on Soft Computing and Measurements SCM-98. 1998. Vol. 1. pp. 30-44.

8. Prokopchina S.V. Methods of Bayesian mathematical statistics in training a convolutional neural network based on a regularizing Bayesian approach / S. V. Prokopchina // Soft measurements and calculations. 2022. Vol. 58, No. 9. pp. 32-46.

9. Prokopchina S.V. Application of Bayesian intelligent technologies and intelligent IIoT (IIoT) in the management of cyberphysical systems in conditions of uncertainty / S. V. Prokopchina // Soft measurements and calculations. 2021. Vol. 42. No. 5. pp. 38-54.

10. Ptushkin A.I., Reshetnikov D.V., Shapovalov D.V., Stepenko A.N. Bayesian approach to accounting for epistemic uncertainty of parameters of probabilistic models of risk analysis of decisions // Modern science-intensive technologies. 2020. No. 11-1. pp. 67-72.

11. Bormotov I.V. Methodology of Bayesian Intellectual Measurements for Information Systems and its Application to the Study of the Value System of Russian Youth // XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements: Proceedings of 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, May 24-26 In 2023. St. Petersburg, Russia: IEEE. 2023. P.7-10.

12. Masharipov Sh. M., Inagamdzhanov D. T., Ziyamukhamedov U. M. Theoretical foundations of estimating uncertainty of measurements by type A //Models and methods for increasing the efficiency of innovative research. – 2025. – Vol. 4. – No. 45. – pp. 125-128.

13. Stepanov A.V., Chunovkina A. G. About applying the Bayesian approach to constructing the coverage interval with restrictions on the values of the measured value //Standards. Standard samples. – 2024. – Vol. 20. – No. 4. – pp. 89-102.

14. Wang L. et al. An improved algorithm for multi-alternative filtering based on Bayesian networks and its application in an integrated navigation system //Gyroscopy and Navigation. – 2025. – Vol. 33. – No. 2. – pp. 48-71.

15. Meshkova A. E., Efremov D. E., Kozubets A.V. Technical diagnostics of failures of measuring instruments //Bulletin of Science. – 2023. – T. 4. – №. 12 (69). – Pp. 1496-1506.

Authors of the publication

Leonid S. Zvyagin – Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia. **ORCID*:** <http://orcid.org/http://orcid.org/0000-0003-4983-6012>. sdimif@yahoo.com

Шифр научной специальности: 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

Получено

11.08.2025 г.

Отредактировано

12.11.2025 г.

Принято

24.11.2025 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.3.09

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-6-49-71

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Мингазов А.Л., Федоров Е.Ю.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия
mingazow.artur@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемы проникновения и распространения электромагнитных помех в отдельных бортовых устройствах электротехнического комплекса летательного аппарата. Провести проверку исследуемого объекта бортового комплекса электрооборудования летательного аппарата на соответствие требованиям нормативных документов в части электромагнитной совместимости. Разработать рекомендации для устранения кондуктивных и индуктивных помех исследуемого объекта бортового комплекса электрооборудования летательного аппарата. *МЕТОДЫ.* Для решения исследовательских задач использовался комплекс методов, включающий графовое моделирование топологии распространения электромагнитных помех в корпусе летательного аппарата, конечно-элементный анализ электромагнитных полей и методы математического моделирования. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Исследованы вопросы проникновения и распространения электромагнитных наводок в конструктивных элементах и цепях электротехнических систем воздушного судна. Выполнена верификация соответствия бортового электрооборудования нормативным требованиям по электромагнитной совместимости. Разработана топологическая модель распределения помех внутри корпуса летательного аппарата. Проведен анализ наведенных помех от внешних источников электромагнитного излучения. Сформулированы практические рекомендации по минимизации кондуктивных и индуктивных наводок в бортовом электрооборудовании. *ВЫВОДЫ.* При проведении исследования на соответствие требованиям нормативных документов в части электромагнитной совместимости исследуемого объекта бортового комплекса электрооборудования летательного аппарата было выявлено, что необходимо дорабатывать способы экранирования чувствительных элементов. Было представлено несколько способов устранения кондуктивных и индуктивных помех исследуемого объекта бортового комплекса электрооборудования летательного аппарата и выбран оптимальный.

Ключевые слова: электротехнический комплекс; электромагнитная совместимость; летательный аппарат; зона экранирования; кондуктивные помехи; индуктивные помехи; топологическая модель.

Для цитирования: Мингазов А.Л., Федоров Е.Ю. Разработка и верификация методики проектирования бортовой кабельной сети летательного аппарата с учетом требований электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 49-71. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-49-71.

DESIGNING THE ELECTRICAL COMPLEX OF AN AIRCRAFT, TAKING INTO ACCOUNT ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

Mingazov A.L., Fedorov E.Y.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan,
Russia
mingazow.artur@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To consider the problems of the ingress and propagation of electromagnetic interference in individual on-board devices of the electrical complex of the aircraft. To check the object under study of the on-board electrical equipment complex of the aircraft for compliance with the requirements of regulatory documents regarding electromagnetic compatibility. To develop recommendations for the elimination of conductive and inductive interference of the studied object of the on-board complex of electrical equipment of the aircraft. *METHODS.* To solve the research problems, a set of methods was used, including graph modeling of the topology of electromagnetic interference propagation in the aircraft body, finite element analysis of electromagnetic fields and mathematical modeling methods. *RESULTS.* The issues of penetration and propagation of electromagnetic interference in structural elements and circuits of electrical systems of an aircraft are investigated. Verification of compliance of on-board electrical equipment with regulatory requirements for electromagnetic compatibility has been performed. A topological model of interference distribution inside the aircraft body has been developed. The analysis of induced interference from external sources of electromagnetic radiation is carried out. Practical recommendations for minimizing conductive and inductive leads in on-board electrical equipment are formulated. *CONCLUSION.* When conducting a study on compliance with the requirements of regulatory documents in terms of electromagnetic compatibility. It was revealed that it is necessary to refine the methods of shielding sensitive elements of the studied object of the onboard complex of electrical equipment of the aircraft. Several ways to eliminate conductive and inductive interference of the object under study of the on-board complex of electrical equipment of the aircraft were presented and the optimal one was chosen.

Keywords: *electrical engineering complex; electromagnetic compatibility; aircraft; shielding zone; conductive interference; inductive interference; topological model.*

For citation: Mingazov A.L., Fedorov E.Y. Designing the electrical complex of an aircraft, taking into account electromagnetic compatibility. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 49-71. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-49-71.

Введение (Introduction)

Процесс проектирования системы электроснабжения летательных аппаратов предполагает многоитерационную работу, учитывающую изменение, как входных параметров, так и ограничений на элементы систем электроснабжения и сам процесс проектирования.

Инженерные методики проектирования электротехнического комплекса летательного аппарата с учетом влияния отдельных бортовых устройств на электромагнитную обстановку системы электроснабжения позволяют сократить сроки проектирования, увеличить надежность работы системы распределения электрической энергии на борту летательного аппарата за счет учета электромагнитных помех при проектировании жгутовых соединений благодаря алгоритмам учета электромагнитной совместимости как средства учета параметра оптимизации.

Цель исследования заключается в обеспечении электромагнитной совместимости устройств бортовых комплексов летательных аппаратов благодаря применению разработанных рекомендаций по проектированию и защите электрических жгутов от электромагнитных помех.

Предполагаемая научная значимость исследования заключается в разработке комплексной методики проектирования электротехнического комплекса летательного аппарата, основанной на системном использовании формализованных топологических моделей и графовых алгоритмов для обеспечения электромагнитной совместимости оборудования на этапе проектирования, что позволяет принципиально снизить уровень взаимных помех и исключить необходимость дорогостоящих доработок на поздних стадиях создания бортовых систем.

Практическая значимость исследования заключается в повышении качества проектирования электротехнического комплекса летательного аппарата и улучшении электромагнитной обстановки внутри летательного аппарата в целом и влияния электромагнитных помех на чувствительные блоки радиоэлектронного оборудования, в частности.

В данной работе предлагается методика проектирования электротехнического комплекса летательного аппарата с учетом влияния отдельных бортовых устройств на электромагнитную обстановку системы электроснабжения.

Основой этапа проектирования является разработка принципиальных электрических схем системы распределения электрической энергии. Самое сложное в выполнении процесса проектирования внутреннего расположения элементов является определение их пространственного положения, их соединений и подготовка нормативной документации.

Задачи проектирования жгутов бортовой кабельной сети летательного аппарата [1] занимают важное место в процессе проектирования системы распределения электрической энергии и представляют класс задач топологического проектирования.

Существующие инструкции по установке и монтажу связаны лишь с требованиями к функционалу и часто не учитывают взаимодействие электромагнитных помех, создаваемых бортовыми электронными устройствами. Методы и алгоритмы автоматизированного проектирования трасс жгутов кабелей не учитывают условия электромагнитной совместимости между кабелями и проводниками в жгутах [2]. Поэтому, решение проблем электромагнитной совместимости является редким не только для инженеров, но и для специалистов, ответственных за разработку оборудования фирм-изготовителей [3].

Решением данной задачи является разработка универсальных методик проектирования бортовой кабельной сети летательного аппарата, учитывающие электромагнитную совместимость и подтверждение данных методик на имитационных моделях в системах компьютерного моделирования [4].

При проектировании монтажа межблочного соединения им соответствуют последовательность выполнения задач размещения и компоновки электронных узлов, разводки электрических цепей, формирование и трассировка жгутов [5, 6]. При решении задач размещения, определения конфигурации электрической сети летательного аппарата необходимо учитывать потери напряжения в проводах, разные режимы работы сети и электромагнитную совместимость узлов [7, 8]. Это приводит к тому, что проектирование всех систем электрооборудования ведется взаимосвязано, то есть процесс проектирования носит сложный итерационный характер. Таким образом, синтез системы распределения электрической энергии и ее параметрическая оптимизация являются завершающим этапом при проектировании [9].

Компоновка конструктивных узлов и их размещение на борту летательного аппарата является ответственным этапом. Должны быть определены места размещения конструктивных узлов, ограничения на их объемы и массу. Результаты решения определяют дальнейший характер разводки электрических цепей, формирование и трассировки жгутов [10, 12].

Задача компоновки и размещения конструктивных узлов наиболее часто встречается в смежных областях: при проектировании радиоэлектроники, устройств автоматики. Существует множество решений в других областях, которые по постановке сходны с решаемой задачей. К ним относятся работы при проектировании радиоэлектронной аппаратуры [11]. В данных работах широко применяются последовательные и итерационные алгоритмы с использованием теории неориентированных графов и различных методов математического программирования. В качестве критериев оптимизации используются различные оценки длины соединений.

Разводка электрических цепей состоит в определении способа соединений эквипотенциальных выводов электрической схемы и проводится с учетом трасс и расположения элементов каждой цепи, требований надежности. Из известных автору работ можно выделить работы [13, 14], в которых представлены многочисленные результаты решения задачи разводки электрических цепей с применением генетических алгоритмов, как на летательных аппаратах, автомобилях, так и в радиоэлектронной аппаратуре и электронно-вычислительной аппаратуре.

Задача формирования жгутов состоит в объединении наборов проводов с учетом ограничений по электромагнитной совместимости, рода тока, технологичности, геометрических особенностей, мест прокладки и т.д. Количество работ по формированию жгутов ограничено, что объясняется трудностью постановки задачи из-за значительного числа проектных решений [15-17].

По мере развития летательных аппаратов комплекс электротехнического и электронного оборудования стал значительно сложнее, что привело к увеличению длин электрических жгутов, а также сложности их компоновки и трассировки. С развитием электронного бортового оборудования стало понятно, что различного рода факторы могут

наводить помехи на чувствительные части системы электроснабжения. Одним из таких факторов являются наведение электромагнитных помех в электрических цепях. Наиболее распространённым путем наведения электромагнитных полей высокой плотности на современном летательном аппарате являются электрические жгуты [18, 19].

Электромагнитная совместимость кабельных линий летательного аппарата – это ряд условий, при котором уровень взаимных помех между проводниками в электрическом жгуте из-за индуктивных и емкостных связей не превышает предельно допустимого уровня кондуктивных помех, который определяется нормативными значениями стандартов [20, 21].

При проектировании жгутовых соединений бортовой кабельной сети используются различные программы моделирования, которые позволяют ускорить и конкретизировать процесс компоновки, размещение и трассировки жгутов на борту летательного аппарата, однако они не учитывают условия электромагнитной совместимости проводников в электрических жгутах и между жгутами в бортовой сети.

В существующих работах [22, 23] задача формирования жгутов решается при применении ортогональных графов и алгоритмов построения минимальных деревьев. При проектировании жгутов важно учитывать их помехозащищенность, чтобы предотвратить возникновение электромагнитных помех, снижающих надежность системы распределения электроэнергии [24, 25]. В работах [26–28] исследуется помехозащищенность электрических жгутов электротехнических комплексов летательных аппаратов при воздействии мощных электромагнитных помех, а в исследовании [30] рассмотрен процесс проектирования таких жгутов с учетом перекрестных помех.

В работе Жукова П. А. анализируется задача обеспечения электромагнитной защиты электротехнических систем летательных аппаратов, направленная на повышение их устойчивости к внешним воздействиям [29]. Задача трассировки жгутов заключается в построении оптимальной траектории жгута в монтажном пространстве автомобиля. Известны работы [31–33], в которых исследуется трассировка сложных соединений и жгутов на летательных аппаратах. Во всех рассмотренных работах трассировка жгутов осуществляется в двумерном пространстве с использованием графовых моделей.

В существующих инструкциях по установке и монтажу основное внимание традиционно уделяется функциональным требованиям, при этом зачастую игнорируется взаимовлияние электромагнитных помех, создаваемых бортовой электронной аппаратурой. Кроме того, применяемые методы и алгоритмы автоматизированного проектирования трасс кабельных жгутов не учитывают требования электромагнитной совместимости между отдельными кабелями и проводниками в составе жгута. Вследствие этого вопросы обеспечения электромагнитной совместимости представляют сложность не только для монтажников систем, но и для разработчиков оборудования на предприятиях-изготовителях.

Исследования В.И. Кравченко и Л.Н. Кечиева заложили методологические основы анализа электромагнитной обстановки на борту летательных аппаратов, в то время как В.Ю. Кириллов и М.А. Ромашенко детально исследовали механизмы распространения помех в кабельных сетях и предложили практические методы экранирования. Работы Н.В. Балюка и В.П. Булекова расширили понимание взаимодействия мощных источников помех с чувствительным радиоэлектронным оборудованием, а Р.Г. Коновалов и М.Е. Воробьев разработали алгоритмы прогнозирования электромагнитной совместимости на этапе проектирования. Однако проведенный анализ показывает, что существующие исследования носят фрагментарный характер и не предлагают комплексной методики проектирования, охватывающей всю цепочку от математического моделирования до практической реализации, что обусловило необходимость разработки единого методологического подхода, представленного в данном исследовании [34–36].

В процессе эксплуатации летательного аппарата отдельные бортовые устройства способны генерировать перекрестные электромагнитные помехи, воздействуя как на другие системы, так и на кабельную сеть воздушного судна. Данное явление представляет собой паразитное взаимодействие, обусловленное взаимным влиянием электрических и магнитных полей между источниками сигналов и приемными устройствами [37, 38].

Особое внимание при проектировании следует уделять кабельным жгутам бортовой сети, которые должны обеспечивать минимальный уровень взаимных наводок между проводниками. В.Ю. Кириллов внес огромный вклад в изучение обеспечения ЭМС бортовой кабельной сети летательного аппарата. Его работы [39–41], детально исследуют механизмы перекрестных наводок в жгутах, влияние неидеальности экранов и разъемов, а также методы параметрического расчета и оптимизации трасс прокладки кабелей. В отличие от более общих подходов Кечиева, Кириллов, предположительно, разрабатывал

инженерные методики, алгоритмы и нормативные рекомендации, позволяющие напрямую на этапе компоновки снижать уровень взаимных влияний между силовыми, цифровыми и аналоговыми линиями в условиях жестких массогабаритных ограничений и сложной электромагнитной обстановки на борту. Таким образом, если Кечиев предоставил общий «язык» и «инструментарий» ЭМС, то Кириллов создал на его основе готовые «инструкции» для решения ключевой проблемы авиастроения.

В связи с вышеизложенным, исследования, направленные на изучение перекрестных помех жгутов, влияния мощных излучающих устройств на чувствительные к электромагнитным помехам рецепторы, а также разработка математических и имитационных моделей и алгоритмов прокладки трасс кабелей, компоновки чувствительных элементов системы электроснабжения подвижных объектов с учетом электромагнитной совместимости, являются актуальными научно-техническими задачами, имеющими важное значение при проектировании бортовых систем подвижных объектов [42].

Материалы и методы (Materials and methods)

Обеспечение бесперебойной работы комплекса бортового оборудования летательного аппарата является наиболее важной задачей при проектировании его конструкции и размещении конкретных узлов на борту. Необходимо учитывать наводимые электромагнитные помехи на наиболее чувствительные элементы системы бортового оборудования летательного аппарата [44-46]. Однако, при работе системы бортового оборудования в целом, также необходимо учитывать наводимые помехи отдельными устройствами, имеющие высокий уровень помехоэмиссии [43, 48].

Основной целью обеспечения электромагнитной совместимости на всех этапах жизненного цикла летательного аппарата – от проектирования и производства до эксплуатации – является минимизация негативного воздействия электромагнитных помех на чувствительные элементы бортового оборудования. Решение данной проблемы достигается за счет комплексного применения технически обоснованных и экономически целесообразных мер защиты, включающих: оптимальное конструирование кабельных трасс, экранирование критичных узлов, использование фильтрующих элементов и других современных методов подавления помех, что в совокупности позволяет обеспечить требуемую надежность работы всех систем воздушного судна при соблюдении разумных финансовых затрат [47].

При проектировании отдельных устройств бортового комплекса летательного аппарата необходимо учитывать особенности их проектирования [49-51]. Проектирование отдельных бортовых устройств выполняется по разработанному автором алгоритму, описанному на рисунке 1. В данном алгоритме учитываются помехи, наводимые на чувствительные элементы электрических плат в частности, но не учитываются помехи, наводимые изделием во внешнюю среду.

Для анализа помехоэмиссии отдельных устройств системы электрооборудования необходимо описать процесс проектирования электронных устройств с учетом их возможного влияния на электротехнических комплекс летательного аппарата.

Распространение электромагнитной энергии в бортовых системах летательных аппаратов осуществляется посредством двух основных механизмов: кондуктивного канала (через проводники) и канала электромагнитной эмиссии (через поля). Кондуктивный канал включает в себя все кабельные соединения между элементами бортового оборудования, по которым помехи могут передаваться непосредственно. Канал электромагнитной эмиссии предполагает распространение помех в виде электромагнитного поля через окружающее пространство, что приводит к двум видам вторичных воздействий: во-первых, к возникновению наведенных кондуктивных помех в кабельных линиях, и во-вторых, к прямому проникновению через экранирующие элементы корпусов оборудования, эффективность которых на практике всегда ограничена. Данное разделение принципиально важно для разработки комплексных мер защиты, поскольку требует дифференцированного подхода к подавлению каждого типа помех.

В случае с оборудованием на борту летательного аппарата первичным экраном является сам корпус изделия. Однако в корпусе всегда присутствуют отверстия для вывода кабелей питания изделия и кабелей передачи данных сторонним комплексам бортового электрооборудования. Помимо этого, корпус может быть собран из нескольких составных частей, соединяемых друг с другом различными технологическими способами, например, винтами.



Рис. 1. Проектирование отдельных изделий на борту летательного аппарата

Fig. 1. Design of individual products on board the aircraft

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В теории электромагнитной совместимости идеальный экран представляет собой абсолютно замкнутую проводящую оболочку с бесконечно высокой проводимостью материала, обеспечивающую полное затухание внешних электромагнитных полей во внутреннем пространстве. Однако в практических условиях эксплуатации авиационной техники достижение подобных характеристик невозможно вследствие конструктивных ограничений: наличия технологических отверстий, стыков, конечной проводимости материалов, а также необходимости обеспечения доступа к оборудованию для обслуживания. Эти факторы существенно снижают эффективность экранирования, что требует разработки компенсирующих технических решений и комплексного подхода к обеспечению электромагнитной защиты бортового оборудования. На рисунке 2 изображены возможные способы проникновения помех.



Рис. 2. Неоднородный экран с апертурой и отверстием для коммуникаций

Fig. 2. An inhomogeneous screen with an aperture and a hole for communications

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В рассматриваемом в данной работе случае, корпус изделия состоит из двух цельных металлических частей, имеющих отверстия под кабель питания и кабели обмена данными с остальными элементами бортового комплекса электрооборудования, относящегося к данной системе. Созданный в результате соединения двух составных частей корпуса опытного образца зазор является апертурой, через которую наводятся индуктивные электромагнитные помехи на окружающее электрооборудование. Для решения проблемы наводимых электромагнитных помех изделием необходимо провести проверку соответствия изделия требованиям ГОСТ РВ 6601-002-2008 к уровням создаваемых электромагнитных помех.

При разработке схемно-конструкторских решений изделия электронных узлов летательного аппарата должна быть реализована многоуровневая защита от электромагнитных излучений:

- экранирование внутренних кабелей;
- заземление и эквипотенциальные соединения;
- уменьшение общих участков протекания токов элементов по шинам питания;
- использование многослойных плат;
- минимизация внутриблочных соединений;
- применение экранированных разъемов.

Основными помехочувствительными узлами изделия являются вычислительные печатные платы. При разработке данных плат для повышения помехоустойчивости применялись следующие правила проектирования:

- гальваническая развязка высокочастотных сигналов;
- снижение индуктивности в шинах питания для уменьшения высокочастотного импеданса в цепи протекания разрядного тока;
- неиспользуемые выводы микросхем обязательно заземлить;
- шины питания и общие размещаются как можно ближе друг к другу, не образуя замкнутых контуров;
- сужение полосы частот полезных сигналов и ограничение спектра входных сигналов входными фильтрами;
- включение буферных конденсаторов и индуктивных фильтров в цепи питания.

Одним из методов защиты радиоэлектронных систем от воздействия сильного электромагнитного излучения является применение металлических экранов. Они отражают электромагнитные волны и гасят электромагнитную энергию. Через систему заземления ток, наведенный электромагнитными помехами, стекает в землю, не причинив вреда электронной аппаратуре. Корпус рассматриваемого изделия обладает экранирующими свойствами.

Корпус используется в качестве экрана, удерживающего электромагнитное поле, создаваемое внутри изделия, и для исключения проникновения внешних электромагнитных полей в чувствительную к электромагнитным помехам зону носителя изделия, где имеются цепи, восприимчивые к излучаемым электромагнитным помехам.

Далее приведена расчетная оценка эффективности экранирования от электромагнитного поля корпуса.

Эффективность экранирования на высоких частотах можно определить по приближённой формуле (1):

$$\mathcal{E} = e^{-\frac{d}{\delta} (0.5 + D(m - r \mu \delta))} \quad (1)$$

где e – основание натурального логарифма,

$m = 2$ для плоского экрана,

$r = \frac{L}{2}$ – наименьшее расстояние проникновения помехи в экран,

L – высота в мм,

d – толщина экрана в мм,

δ – эквивалентная глубина проникновения электрического поля, в мм,

D – относительный диаметр корпуса изделия,

μ – относительная магнитная проницаемость материала экрана.

Экраном от электрического поля служит корпус изделия с относительным диаметром $D = 415$ мм и высотой $L = 255$ мм.

Эквивалентную максимальную глубину проникновения электромагнитного поля можно найти по формуле (2):

$$\delta = \left(\frac{1}{\sigma \pi \mu f_{min}} \right)^{0.5} \quad (2)$$

где σ — удельная проводимость экрана, в См/м,

μ — магнитная проницаемость экрана, в Гн/м.

Минимальная частота напряжения электрического поля $f_{min} = 2M\Gamma\text{ц}$.

У рассматриваемого изделия корпус выполнен из нескольких составных элементов. Основным элементом корпуса является монолитный элемент конструкции, произведенный из алюминиевого сплава АМг6 — экран 1. К данному элементу присоединяется крышка из титанового сплава ВТЗ-1 — экран 2.

Максимальную глубину проникновения электромагнитного поля через корпус изделия необходимо считать для каждого составного элемента.

Толщина экрана 1 — $l = 18\text{мм}$, удельная проводимость материала $\sigma = 37,7 \cdot 10^6 \text{ См/м}$, магнитная проницаемость $\mu = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$.

Толщина экрана 2 — $l = 10,3\text{мм}$, удельная проводимость материала $\sigma = 1,36 \cdot 10^6 \text{ См/м}$, магнитная проницаемость $\mu = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/м}$.

Эквивалентная максимальная глубина проникновения электромагнитного поля через экран 1 изделия составит:

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{1}{37,7 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^6}} = 5,79 \cdot 10^{-5} \text{ мм}$$

Эквивалентная максимальная глубина проникновения электромагнитного поля через экран 2 изделия составит:

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{1}{1,36 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 1,26 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^6}} = 3,04 \cdot 10^{-5} \text{ мм}$$

Эффективность экранирования корпуса изделия необходимо считать для каждого составного элемента.

Эффективность экранирования экрана 1 может составить:

$$\mathcal{E}_1 = e^{\frac{18}{5,79 \cdot 10^{-5}}} \left(0,5 + 415 \left(2 \cdot \frac{255}{2} \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 5,79 \cdot 10^{-5} \right) \right) = \infty \quad (0,5 + 7,69 \cdot 10^{-6}) \approx \infty$$

Эффективность экранирования экрана 2 может составить:

$$\mathcal{E}_2 = e^{\frac{10,3}{3,04 \cdot 10^{-5}}} \left(0,5 + 415 \left(2 \cdot \frac{255}{2} \cdot 1,26 \cdot 10^{-4} \cdot 3,04 \cdot 10^{-5} \right) \right) = \infty \quad (0,5 + 9,76 \cdot 10^{-7}) \approx \infty$$

Таким образом, напряжение электромагнитного поля, проникающего в корпус изделия, можно считать равным нулю.

Следующий шаг в данной работе необходимо проверить соответствия рассматриваемого оптоэлектронного изделия, входящего в состав бортового радиоэлектронного оборудования, требованиям ГОСТ РВ6601-002-2008 к уровням создаваемых электромагнитных помех.

Основное целью данной работы является проверка соответствия опытного образца оптоэлектронного изделия требованиям ГОСТ РВ 6601-002-2008 к уровням создаваемых электромагнитных помех.

Необходимо проверить соответствие изделия требованиям ГОСТ РВ 6601-002-2008 в пунктах:

5.1 Требования к напряжению помех в цепях питания в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц.

5.2 Требования к току помех в жгутах линий связи, диапазон частот от 0.15 до 30 МГц.

5.3 Требования к излучению электромагнитного поля в диапазоне частот от 0.01 МГц до 18 ГГц.

Испытания проводились в аттестованном безэховом экранированном помещении.

Испытания проводились по методикам ГОСТ РВ 6601-002-2008:

- измерение напряжения помех в проводах питания в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц по методике ЭП1 (с учетом п.5.1.1 ГОСТ РВ 6601-002-2008);
- измерение тока помех в жгутах линий связи в диапазоне частот от 0,15 до 30 МГц по методике ЭП2;
- измерение напряженности электромагнитного поля радиоизлучения от изделия в диапазоне частот от 2 МГц до 18 ГГц по методике ЭИ1.

Материально-техническое обеспечение испытаний приводится в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Список оборудования для проведения проверок

List of inspection equipment

Наименование прибора	Тип
Пульт автономного включения	АД2.390.234
Источник питания	U8031A
Излучатель	АД2.890.047
Анализатор ЭМС Agilent	E7405A
Эквивалент сети Lindgren	3725/2M
Биконическая антенна ETS-Lindgren	3110C
Логопериодическая антенна ETS-Lindgren	3148B
Рупорная антенна ETS-Lindgren	3115
Штыревая антенна ETS-Lindgren	3303

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При проведении измерений для оценки уровня излучаемых радиопомех может возникнуть необходимость в сканировании по высоте, как это показано на схеме, приведенной на рисунке 3. Цель сканирования следующая: отрегулировать высоту антенны так, чтобы прямые и отраженные сигналы были максимальными. Высота антенны настраивается для достижения максимального измерения.

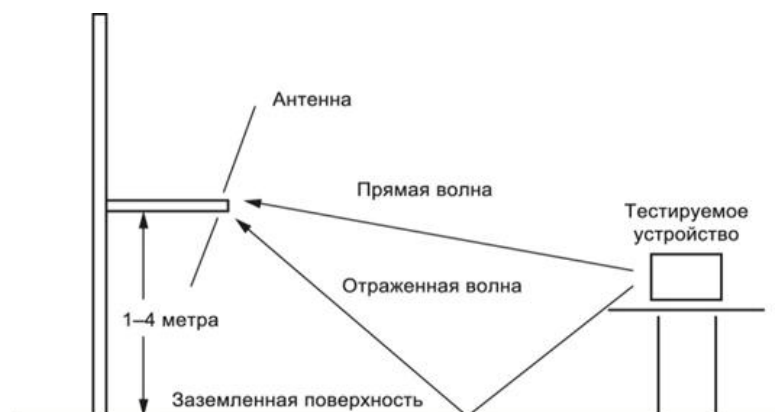


Рис. 3. Диаграмма, показывающая прямую и отраженную волны

Fig. 3. Diagram showing direct and reflected waves

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

Оценка напряжения помех в цепях питания в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц.

Оценку напряжения помех в цепях питания производили в безэховой камере с использованием перечня оборудования, отраженного в таблице 1.

Испытуемое изделие установили в камере в соответствии с рисунком 4.

Тестируемое устройство установили на заземляющей поверхности, в соответствии с рисунком 4.

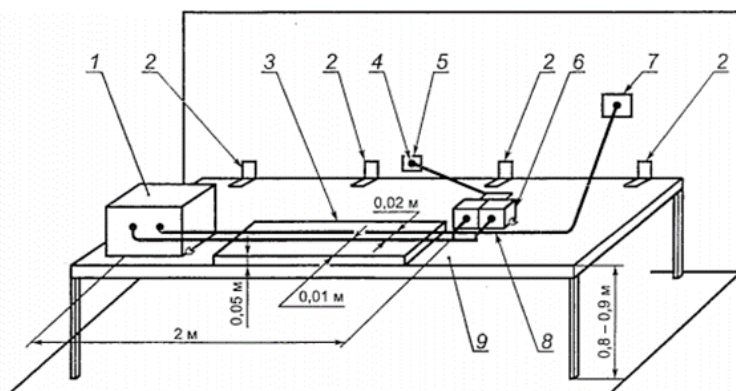


Рис. 4. Схема основной испытательной станции: 1 – ИБО, 2 – переключки металлизации, 3 – токонепроводящая пластина, 4 – источник питания, 5 – сетевой фильтр входного питания, 6 – ЭС, 7 – устройство вывода линий связи из ЭК, 8 – соединительный кабель, 9 – заземляющая пластина

Fig. 4. Diagram of the main test station: 1 – on-board equipment under test, 2 – metallization jumpers, 3 – non-conductive plate, 4 – power supply, 5 – input power supply network filter, 6 – ES, 7 – device for outputting communication lines from the EC, 8 – connecting cable, 9 – grounding plate

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Испытуемое бортовое оборудование (ИБО) должно быть установлено на заземляющей поверхности, которая моделирует фактическое размещение изделия на борту летательного аппарата.

Измерение напряжения помех в проводах питания в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц по методике ЭП1 (с учетом п. 5.1.1) в соответствии с ГОСТ РВ 6601-002-2008.

Пиковые значения напряжения помех в децибелах относительно 1мкВ, создаваемые в цепи питания, не должны превышать допустимые значения, определяемые ограничительной линией, показанной на рисунке 5.

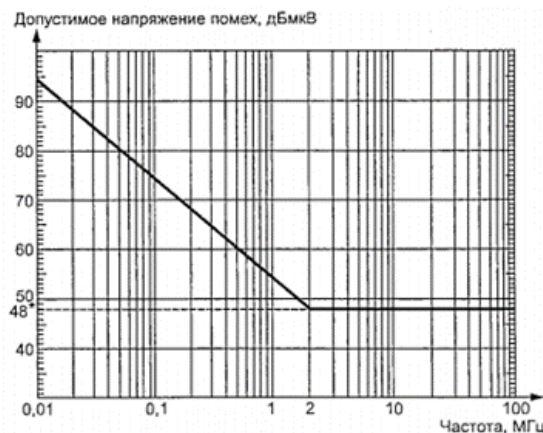


Рис. 5. Допустимые пиковые значения напряжения помех в цепи питания 27В. Для БО двойного назначения в диапазоне частот от 2 до 30 МГц допустимое напряжение задают на уровне 46 дБмкВ

Fig. 5. Permissible peak values of the interference voltage in the 27V supply circuit. For dual-use on-board equipment in the frequency range from 2 to 30 MHz, the permissible voltage is set at 46 dBμV

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты проведенных измерений демонстрируют, что в исследуемых цепях питания в частотном диапазоне 245 кГц – 15 МГц зафиксированы кондуктивные помехи с превышением допустимых пиковых значений напряжения на 25,1 мкВ, что визуализировано на рисунке 6. Полученные данные свидетельствуют о необходимости дополнительных мер по подавлению электромагнитных наводок в указанном частотном диапазоне.

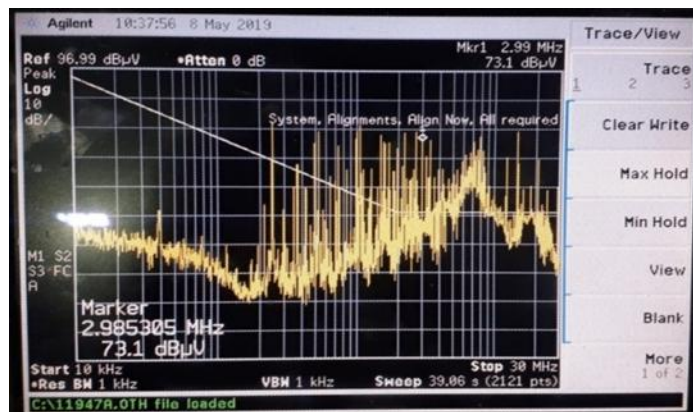


Рис. 6. Напряжение помех в цепях питания испытываемого изделия *Fig. 6. Interference voltage in the power supply circuits of the tested product*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

По результатам измерений, образец изделия не соответствует требованиям подраздела 5.1 ГОСТ РВ 6601-002-2008 к напряжению помех в цепях питания.

Оценка тока помех в жгутах линий связи в диапазоне частот от 0.15 до 30 МГц

Оценку тока помех в жгутах линий связи производили в безэховой камере с использованием перечня оборудования, отраженного в таблице 1.

Измерение тока помех в жгутах линий связи в диапазоне частот от 0,15 до 30 МГц по методике ЭП2 в соответствии с ГОСТ РВ 6601-002-2008.

Пиковые значения тока помех в жгутах линий связи в децибелах относительно 1мкА, создаваемые в жгутах линий связи, не должны превышать допустимые значения, определяемые ограничительной линией, показанной на рисунке 7 или вычисленных по формуле 3.

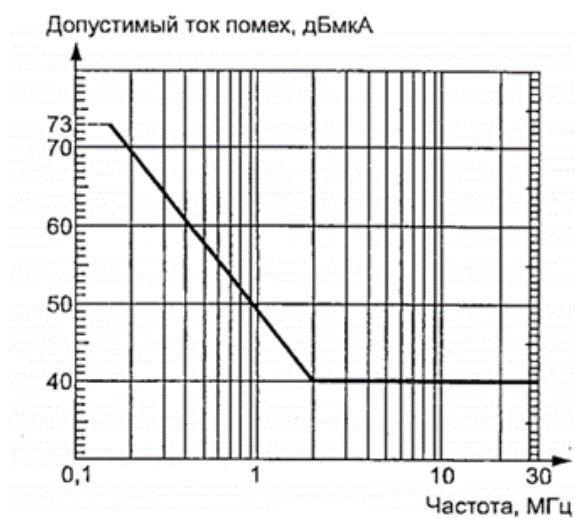


Рис. 7. Допустимые пиковые значения тока помех в жгутах линий связи *Fig. 7. Permissible peak values of the interference current in the harnesses of communication lines*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В диапазоне частот от 0.15 до 2.00 МГц:

$$I = 73 - 29.33 \lg \left(\frac{f}{0.15} \right), \quad (3)$$

где f – частота, МГц.

В диапазоне частот от 2 до 30 МГц $I = 40 \text{ дБмкА}$.

Требование по п.5.2 в соответствии с ГОСТ РВ 6601-002-2008 (п.5.2.1) предъявляет заказчик.

Измеренное значение тока помех в жгутах линий связи в диапазоне частот от 2 до 30 МГц $I = 37,22 \text{ дБмкА}$

Измеренные значения токов помех в жгутах линий связи не превышают допустимые пиковые значения токов помех.

Опытный образец изделия соответствует требованиям подраздела 5.2 ГОСТ РВ 6601-002-2008 к току помех в жгутах линий связи.

Оценка напряженности электромагнитного поля радиоизлучения от изделия в диапазоне частот от 2 МГц до 18 ГГц

Экспериментальная оценка напряженности электромагнитного поля радиоизлучения исследуемого изделия была выполнена в условиях безэховой камеры с применением измерительного комплекса, состав которого представлен в соответствующей таблице.

Измерения проводились в широком частотном диапазоне от 2 МГц до 18 ГГц с соблюдением требований методики ЭИ1, регламентированной нормативным документом ГОСТ РВ 6601-002-2008. Полученные результаты позволяют количественно оценить параметры электромагнитного излучения изделия в заданных условиях.

Изделие и антенны располагались в безэховой камере в соответствии с рисунком 8.

Пиковые значения напряженности электромагнитного поля радиоизлучения от изделия в децибелах относительно 1 мкВ/м не должны превышать значений, указанных на рисунке 9. В полосе частот от 0.01 до 30 МГц нормы должны выполняться для вертикально поляризованного электрического поля излучения. На частотах выше 30 МГц нормы должны выполняться как для горизонтально, так и для вертикально поляризованных электрических полей излучения.

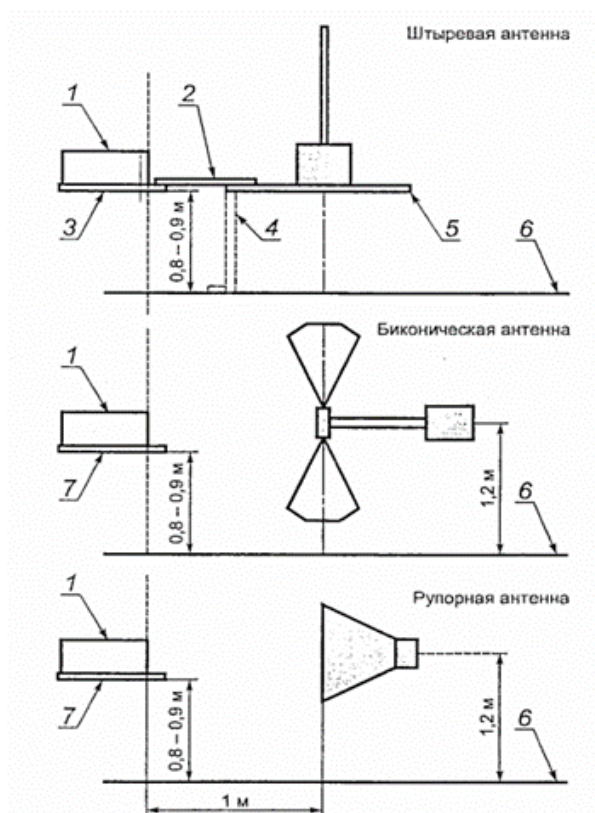


Рис. 8. Схема расположения антенн: 1 – границы испытательной установки; 2 – связующая металлическая пластина; 3 – заземляющая пластина или непроводящий стол; 4 – связующая металлическая пластина для непроводящих столов; 5 – противовес; 6 – пол; 7 – заземляющая пластина

Fig. 8. Antenna layout: 1 – test setup boundaries; 2 – connecting metal plate; 3 – ground plate or non-conductive table; 4 – connecting metal plate for non-conductive tables; 5 – counterweight; 6 – floor; 7 – ground plate

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

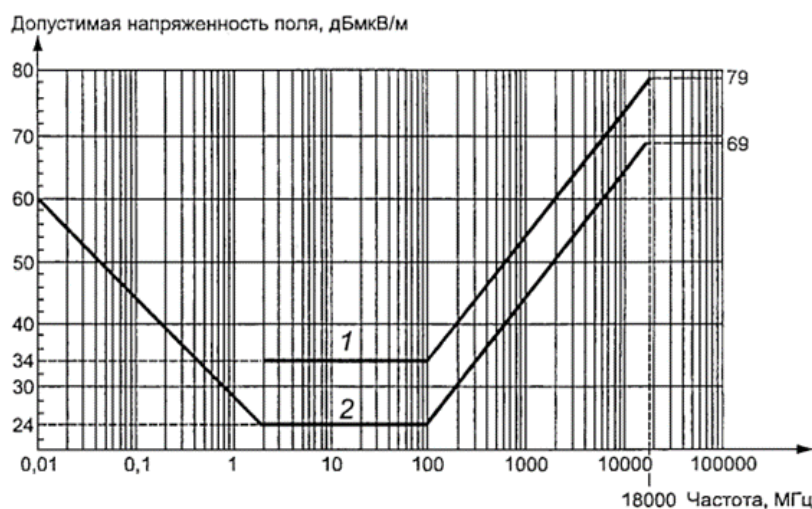


Рис. 9. Допустимые пиковые значения напряженности электромагнитного поля радиоизлучения: 1 – допустимые пиковые значения напряженности электрического поля излучения для БО, устанавливаемых внутри самолета; 2 – допустимые пиковые значения напряженности электрического поля излучения для БО, устанавливаемых на самолетах с внешней стороны фюзеляжа или на самолетах, корпус которых полностью или частично изготовлен из композитных материалов, а также для БО, устанавливаемых на вертолетах

Fig. 9. Permissible peak values of the electromagnetic field strength of radio emission: 1 – permissible peak values of the electric field strength of radiation for on-board equipment installed inside an aircraft; 2 – permissible peak values of the electric field strength of radiation for on-board equipment installed on aircraft on the outside of the fuselage or on aircraft whose body is fully or partially made of composite materials, as well as for on-board equipment installed on helicopters

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Измеренные значения напряжённостей электромагнитного поля (индуктивные помехи) имеют превышения допустимых пиковых значений на различных частотах:

- на частоте 2,71 МГц – на 23,5 дБ·мкВ/м (рис. 10);
- на частоте 14,95 МГц – на 46,67 дБ·мкВ/м (рис. 11);
- на частоте 73,7 МГц – на 8 дБ·мкВ/м (рис. 12).

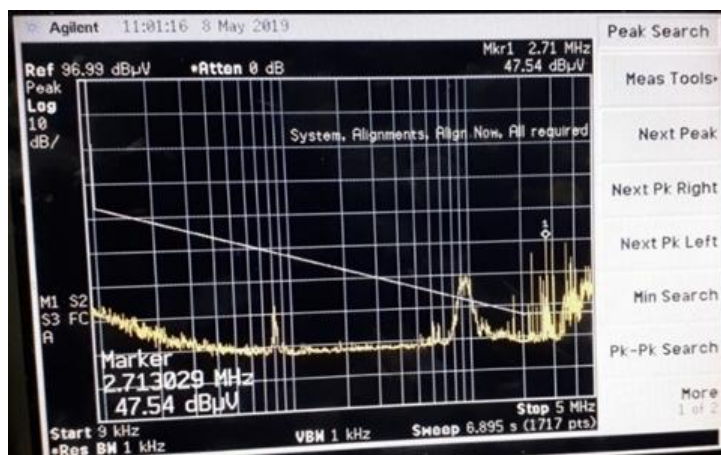


Рис. 10. Напряженность электромагнитного поля радиоизлучения от изделия на частоте 2,71 МГц

Fig. 10. The intensity of the electromagnetic field of radio emission from the product at a frequency of 2.71 MHz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

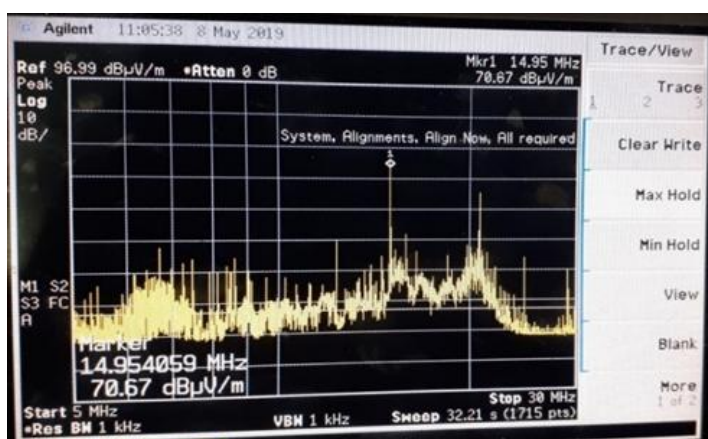


Рис. 11. Напряженность электромагнитного поля радиоизлучения от изделия на частоте 14,95 МГц

Fig. 11. The intensity of the electromagnetic field of radio emission from the product at a frequency of 14.95 MHz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

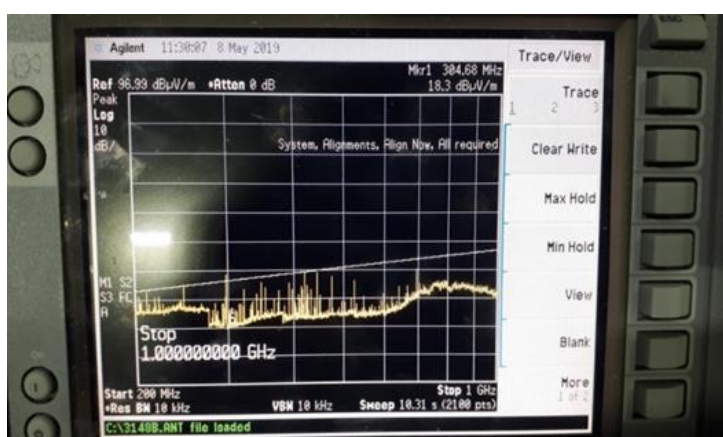


Рис. 12. Напряженность электромагнитного поля радиоизлучения от изделия на частоте 73,7 МГц

Fig. 12. Intensity of the electromagnetic field of radio emission from the product at a frequency of 73.7 MHz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Измеренные значения напряжённостей электромагнитного поля не превышают допустимого уровня напряжённости в диапазоне частот от 200 МГц до 18 ГГц, что изображено на рисунке 13.



Рис. 13. Напряженность электромагнитного поля радиоизлучения от изделия на частоте 18 ГГц

Fig. 13. Intensity of the electromagnetic field of radio emission from the product at a frequency of 18 GHz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Излучаемые помехи изделия имеют превышения допустимого уровня напряжённости на 1-46,67 дБ·мкВ/м на отдельных частотах.

Изделие не соответствует требованиям подраздела 5.3 ГОСТ РВ 6601-002-2008 к излучению электромагнитного поля.

В ходе проверки соответствия опытного образца оптоэлектронного изделия требованиям ГОСТ РВ 6601-002-2008 к уровням создаваемых электромагнитных помех было выявлено несоответствие следующим пунктам требований:

1. Пункт 5.1 Требования к напряжению помех в цепях питания в диапазоне частот от 10КГц до 100МГц.

2. Пункт 5.3 Требования к излучению электромагнитного поля в диапазоне частот от 0.01МГц до 18ГГц.

Измеренные значения напряжений помех в проводах питания (кондуктивные помехи) имеют превышения допустимых пиковых значений напряжений помех на 25,1 дБ·мкВ в диапазоне частот от 245 кГц до 15 МГц.

Излучаемые помехи изделия (индуктивные помехи) имеют превышения допустимого уровня напряжённости на 1–46,67 дБ·мкВ/м на отдельных частотах:

- на частоте 2,71 МГц – на 23,5 дБ·мкВ/м;
- на частоте 14,95 МГц – на 46,67 дБ·мкВ/м;
- на частоте 73,7 МГц – на 8 дБ·мкВ/м;

Сравнительный анализ результатов проверки изделия представлены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Сравнительный анализ параметров электромагнитной совместимости опытного образца

Comparative analysis of electromagnetic compatibility parameters of the prototype

Проверяемый параметр	Частотный диапазон	Ожидаемое значение*	Результаты измерений	Норматив ГОСТ РВ 6601-002-2008	Соответствие
Напряжение помех в цепях питания (п. 5.1)	245 кГц - 15 МГц	≤ 40 дБмкВ	Превышение на 25,1 дБмкВ	≤ 46 дБмкВ	Не соответствует
Ток помех в жгутах линий связи (п. 5.2)	2-30 МГц	≤ 45 дБмкА	В пределах нормы	≤ 48 дБмкА	Соответствует
Напряженность ЭМП (п. 5.3):					
– на частоте 2,71 МГц	2,71 МГц	≤ 30 дБмкВ/м	Превышение на 23,5 дБмкВ/м	≤ 28 дБмкВ/м	Не соответствует
– на частоте 14,95 МГц	14,95 МГц	≤ 28 дБмкВ/м	Превышение на 46,67 дБмкВ/м	≤ 24 дБмкВ/м	Не соответствует
– на частоте 73,7 МГц	73,7 МГц	≤ 32 дБмкВ/м	Превышение на 8 дБмкВ/м	≤ 34 дБмкВ/м	Не соответствует
– в диапазоне 200 МГц – 18 ГГц	200 МГц - 18 ГГц	≤ 40 дБмкВ/м	В пределах нормы	≤ 42 дБмкВ/м	Соответствует

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Ожидаемые значения установлены на 10-15% строже нормативных требований для создания запаса по помехоустойчивости.

Проведенные испытания выявили системное несоответствие опытного образца требованиям ГОСТ РВ 6601-002-2008 по параметрам кондуктивных и излучаемых помех. Наиболее значительные превышения нормативов зафиксированы в низкочастотном диапазоне:

- Напряжение помех в цепях питания превышает допустимые значения на 54,5%.
- Напряженность электромагнитного поля на частоте 14,95 МГц превышает норматив в 2,2 раза.

Полученные результаты подтверждают необходимость применения разработанной методики проектирования с комплексом мероприятий по улучшению экранирования и фильтрации. Для решения проблемы несоответствия исследуемой бортовой электроконструкции требованиям нормативных документов в области электромагнитной совместимости можно применить различные способы устранения кондуктивных и индуктивных помех.

Обсуждение (Discussions)

Для устранения индуктивных и кондуктивных помех необходимо пользоваться разными подходами при проектировании устройств и учитывать особенности распространения отдельного вида помех.

Рекомендации для устранения кондуктивных помех.

Для устранения проблемы превышения пиковых значений напряжений помех в проводах питания (кондуктивные помехи) необходимо рассмотреть возможность новой конструкции кабелей питания изделия с использованием высококачественного экранирования [36, 39, 40].

Конструктивные особенности электромагнитных экранов кабельных систем характеризуются наличием неизбежных неоднородностей, проявляющихся в виде локальных разрывов и нарушений целостности экранирующей структуры. Как показано на рисунке 14, такие дефекты преимущественно возникают в следующих критичных зонах соединений: на стыке экранирующей оплетки кабеля с металлическим кожухом кабельного разъема; в области сопряжения кожуха разъема с корпусом соединителя; в местах соединения ответных частей электрических разъемов; а также на участках крепления разъемов к корпусам бортового оборудования. Следует особо отметить, что величина переходного сопротивления в указанных зонах неоднородностей оказывает существенное влияние на общую эффективность экранирования, поскольку создает пути для проникновения электромагнитных помех. Данный фактор необходимо учитывать при проектировании высоконадежных кабельных систем авиационной техники, предусматривая специальные конструктивные решения для минимизации переходных сопротивлений в критичных точках соединений.

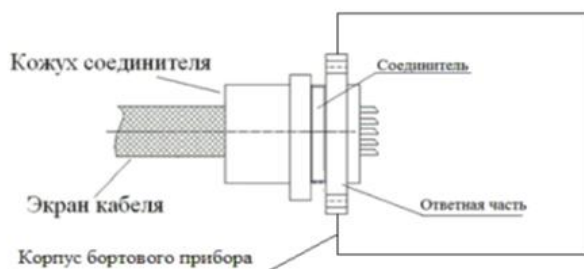


Рис. 14. Схема соединения экрана кабеля с электрическим кабельным соединителем

Fig. 14. Connection diagram of the cable shield with an electric cable connector

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Экраны бортовых кабелей конструктивно могут быть выполнены в виде сплошных тонкостенных труб, витых металлических лент, металлических и металлизированных тканей, сплетенных из металлических нитей оплеток (плетенки) или их комбинаций.

В современных системах кабельного экранирования перспективным решением выступает ленточная экранировка на основе алюминиевой или медной с нанесённым токопроводящим клеевым составом, где электрический контакт между витками обеспечивается как проводящими свойствами самого клея, так и механическим воздействием выступов гофрировки, создающих при намотке локальные зоны повышенного давления для улучшения межслойной проводимости; параллельно широкое применение находят металлизированные тканевые экраны, формируемые методом вакуумного напыления различных металлов на текстильную основу, что обеспечивает оптимальное сочетание лёгкости, гибкости и механической прочности с высокой технологичностью монтажа.

Наиболее сбалансированным решением по совокупности критериев эффективности экранирования, массогабаритных показателей, удобства монтажа и механических характеристик остаются традиционные плетёные экраны из металлических оплётки, параметры плетения которых (плотность, диаметр проволоки, шаг) могут варьироваться для достижения требуемого компромисса между степенью экранирования, массой и гибкостью кабельной продукции в конкретных условиях эксплуатации.

Рекомендации для устранения индуктивных помех.

Для устранения проблемы напряженности электромагнитного поля радиоизлучения от изделия (индуктивные помехи) необходимо рассмотреть возможность новой конструкции корпуса опытного образца оптоэлектронного изделия.

Металлические корпуса электронных устройств обеспечивает определенную защиту от проникновения из окружающего пространства в него электромагнитных помех. Однако неизбежные разрезы, швы, отверстия для кабелей и вентиляции сильно снижают их экранирующее воздействие. Для устранения данных проблем используют конструкции, обеспечивающие сплошное гальваническое соединение всех стенок прибора, с применением подходящих уплотнений, например, проволочных плетеных прокладок, схожих с кабельными оплетками. Хорошим примером являются стандартные электропроводящие листовые эластомеры ЗИПСИЛ 101 РЭП-01. Данный материал приклеивают непроводящим клеем с внутренней стороны изделия для улучшения качества электромагнитной совместимости.

Для устранения индуктивных наводок изделия на окружающие объекты бортовой сети используются специальные изолирующие уплотнительные прокладки.

Одним из промышленных вариантов, изолирующих уплотнительный прокладок, является серия профессиональных электропроводящих термостойких уплотнительных силиконовых жгутов серии ЗИПСИЛ 200 РЭП-01 для радиогерметизации, экранировки и одновременной герметизации от окружающей среды СВЧ-устройств и электронного оборудования.

Также используют специальный изолирующий скотч или жидкий изолирующий клей для устранения зазоров в корпусе изделия.

Заключение или Выводы (Conclusions)

Проведенное исследование подтвердило эффективность разработанной методики проектирования бортовой кабельной сети летательного аппарата, обеспечивающей выполнение требований электромагнитной совместимости на этапе конструкторского проектирования. Установлено, что ключевой проблемой современных оборонных предприятий является дефицит времени на проработку вопросов ЭМС при переходе от научно-исследовательских работ к опытно-конструкторским, что приводит к существенным затратам на доработки изделий на поздних стадиях.

Экспериментальные исследования выявили недостаточную эффективность существующих подходов к проектированию кабельных систем, не учитывающих взаимное электромагнитное влияние бортового оборудования. Предложенная методика демонстрирует принципиально новый подход, основанный на интеграции в процесс проектирования формализованных топологических моделей распространения помех и специализированных алгоритмов оптимизации трассировки.

Практическая значимость работы подтверждена результатами испытаний, показавшими необходимость и эффективность применения усовершенствованных экранирующих конструкций и электропроводящих уплотнительных материалов для подавления помех. Разработанный подход позволяет существенно сократить количество итераций проектирования и гарантировать соответствие бортового электрооборудования установленным нормативным требованиям ГОСТ РВ 6601-002-2008.

Литература

1. Нгуен Ван Хой. Разработка алгоритмов проектирования экранов кабелей электротехнических комплексов летательных аппаратов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва – 2014. Доступно по: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01007848852.pdf. Ссылка активна на 06.09.2025.
2. Васинова А.Н. Прогнозирование электромагнитной совместимости электронных систем беспилотного летательного аппарата при воздействии радиоэлектронных средств //4-я МНТК "Современные инновации в науке и технике"/ Казань, 2014 – с.188-190.
3. Vauché R., Mefteh R. A. B., Haddad F., et. al. Experimental Time–Domain Study for Bandpass Negative Group Delay Analysis With Lill–Shape Microstrip Circuit. IEEE Access, 2021. Vol. 9. Pp. 155–167.
4. M. Z. M. Hamdalla, J. M. Roacho-Valles, A. Caruso, et. al. Electromagnetic Compatibility Study of Quadcopter UAVs: Characteristic Mode Analysis of the Frame's Material and Shape Effect. Prog. Electromagn. Res. M, vol. 112, 2022, pp. 1–14.
5. Залалиев И.Р., Ференец А.В. Влияние электромагнитных полей высокой интенсивности на электрические цепи летательных аппаратов // V Всероссийская научно-техническая конференция (к 50-летию юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники). Министерство образования и науки российской федерации, Тольяттинский государственный университет, Институт энергетики и электротехники, 2017.- с.572-578
6. Belousov A. O., Zhechev E. S., Chernikova E. B., Nosov A. V., Gazizov T. R. UAVs protection and countermeasures in a complex electromagnetic environment // Complexity. 2022. Vol. 2022. pp. 1–16.

7. Belousov A. O., Medvedev A. V., Chernikova E. B., et. al. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation. *Symmetry*. 2021. Vol. 13(6). № 1074. pp. 1–22.
8. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., et. al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual–Axis Rotary Platform for an Anti–UAV System, *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. № 13. pp. 1–17.
9. Иванов А. А., Комнатнов М. Е. Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой // Доклады ТУСУР. 2021. Т. 24. № 1. С. 16–23
10. Ларин В. П., Желудева К. В. Проблемы проектирования системы электроснабжения гиперзвукового летательного аппарата // Научное периодическое издание «INSITU» №4, 2016.- с.33-37
11. Мясников А.Ю. Проектирование компонентов бортовых кабельных сетей с учетом требований технологичности // Онтология проектирования, №3, том 13, 2023 – С.368-379
12. Ivanov A. A., Demakov A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Semi–analytical approach for calculating shielding effectiveness of an enclosure with a filled aperture. *ELECTRICA*. 2022. № 22. pp. 220–225.
13. Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Способ трассировки проводников модального фильтра на основе плоского кабеля. Патент на изобретение №RU2749994. 21.06.2021, бюл. №18. Доступно по: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002749994_20210621_C1_RU/. Ссылка активна на 06 сентября 2025.
14. Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Способ трассировки проводников модального фильтра с круговым сечением. Патент на изобретение №RU2747104. 27.04.2021, бюл. №12. Доступно по: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002749994_20210621_C1_RU/. Ссылка активна на 06 сентября 2025.
15. Суздальцев И.В., Гаранин И.Н. Методика автоматизированной раскладки кабельных соединений по каналам беспилотного летательного аппарата, с учетом критерия электромагнитной совместимости // Современные материалы, техника и технология: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф. - 2015. С. 41 - 44.
16. Tay Sui Jiana, Muhammad Hafidz Fazli Md Fauadia, Saifudin Hafiz Yahaya. et al. // A deep learning approach for automated PCB defect detection: A comprehensive review. *XXII Multidisciplinary Reviews* 8(1):2025011.
17. Fung, K. C., Xue, K. W., Lai, C. M., et. al. // Improving PCB defect detection using selective feature attention and pixel shuffle pyramid. *Results in Engineering*, 21.
18. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Методология обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости бортового оборудования беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника, 2016. № 4, Казань – С.155-160
19. Bielsky T., Junemann M., Thielecke F. Parametric modeling of the aircraft electrical supply system for overall conceptual systems design. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Hamburg University of Technology, Institute of Aircraft Systems Engineering, Hamburg*, 2021, pp. 1–13.
20. Das, D., Elfrgani, A., and Reddy, C.J. Simulation of Conductive and Radiated Emission for Off and OnBoard Radio Receivers according to CISPR 12 and 25, *SAE Technical Paper 2020-01-1371*, 2020.
21. Клыков А.В., Кириллов В. Ю.. «Возможности компьютерного моделирования при решении задач электромагнитной совместимости бортовых кабельных сетей самолетов». *Электронный журнал «Труды МАИ»*, 2012. Выпуск № 57. С. 54-59
22. Mohamed Z. M. Hamdalla, Anthony N. Caruso, Ahmed M. Hassan. Electromagnetic Compatibility Analysis of Quadcopter UAVs Using the Equivalent Circuit Approach. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation* 3, September 2022, pp. 1090 – 1101
23. Коптев А. Н., Мясников А. Ю. Теоретические основы проектирования простых жгутов бортовой кабельной сети летательного аппарата // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая Техника, Технологии и Машиностроение № 4, 2019. С.76-86
24. Дементьев А. Н. Ключев Д. С. Новиков А.Н. и др. Модель процесса оценки электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры летательного аппарата // Труды МАИ № 123. - 2022. - С.1-21
25. Суздальцев И.В., Исмагилов Р.Н. Автоматизированное размещение бортовых электронных средств во внутрифюзеляжном пространстве беспилотного летательного аппарата с учетом критериев электромагнитной совместимости // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли, Казань, 2016. С. 232-238.
26. Das A., Campbell S. D., Werner D. H. An Augmented Y-parameter Method for Macromodeling Electromagnetic Structures in the Presence of Plane-Waves. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Denver, CO, Jul. 10, 2022*.

27. Ten Have. Waveform model to characterize time-domain pulses resulting in EMI on static energy meters. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, April 2021.
28. Zhao Ta, Xueming Liu, Ping Sun et. al. Improved electromagnetic compatibility testing for rail vehicles using a quantum-based 3D reconstruction algorithm. - Optical and Quantum Electronics (2024), 30 January 2024.
29. Жуков П.А. Исследования средств защиты электротехнических комплексов летательных аппаратов от электромагнитных воздействий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 05.09.03. Москва, 2022. Доступно по: <https://mai.ru/upload/iblock/c13/67t2n32mobnku0c0ym35kkmlit50bev/avtoreferat-ZHukov-P.A.-dlya-sayta-MAI.pdf>. Ссылка активна на 06.09.2025.
30. Masoudi, N. *Geometric-Based Optimization Algorithms for Cable Routing and Branching in Cluttered Environments* [dissertation]. Clemson University, 2020. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/354492874.pdf>. Accessed 06 Sep 2025.
31. Yuanyuan Li, Yuanyuan Fang, Kaiyuan Li et. al. Morphological Tracing and Functional Identification of Monosynaptic Connections in the Brain: A Comprehensive Guide. - Neuroscience Bulletin, May 2024.
32. Punsisi Pamarathne, T.G.I. Fernando, Ant Colony Optimization Algorithm to Solve Electrical Cable Routing. Advances in Electronics Engineering, 2020, pp.69-85.
33. Nafiseh Masoud, Georges Fadel. An Optimization Framework for The Design of Cable Harness Layouts in Planar Interconnected Systems. Journal of Mechanical Design 144(1), July 2021. pp.1-29.
34. Qian Y., Du B. Ye Z, et. al. Simulation on transient electromagnetic influence of lightning strike for turboprop engine,” in 2019 4th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECOT), Dec. 2019, pp. 1–7.
35. Hartman T., Grootjans R., Moonen N., et.al. Electromagnetic compatible energy measurements using the orthogonality of nonfundamental power components. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 63, no. 2, Apr. 2021. pp. 598–605.
36. Belousov A. O., Vlasova N. O., Gordeyeva V. O. , et.al. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal Decomposition to Protect Critical Equipment Against UWB Pulses. Symmetry. 2022. Vol. 14(6), № 1228. pp. 1–34.
37. Ромащенко М.А., Коновалов Р.Г., Воробьев М.Е. Основные этапы методики обеспечения электромагнитной совместимости для подвижных объектов связи // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 1. 2023. С. 62-68.
38. Ромащенко М.А., Коновалов Р.Г. Структура функциональных связей оборудования подвижного объекта связи для решения задач обеспечения ЭМС // Проблемы обеспечения надёжности и качества приборов, устройств и систем: сб. науч. тр. Воронеж, 2022. С. 140-145
39. Helko B., Zander M., Ronald L. Testing of DC Electricity Meters with Broadband Conducted Electromagnetic Disturbances, Conference: 2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP), May 2022.
40. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость летательных аппаратов. М.: МАИ, 2012. 162 с.
41. Hamdalla, M. Z. M., et al. Characteristic mode analysis prediction and guidance of electromagnetic coupling measurements to a UAV model. IEEE Access, Vol. 10, 2022. pp. 914–925
42. Mohamed Z. M. Hamdalla, Jesus M. Roacho-Valles, Anthony N. Caruso, et. al. Electromagnetic Compatibility Study of Quadcopter UAVs: Characteristic Mode Analysis of the Frame’s Material and Shape Effect. Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 112, 2022. pp. 1–14.
43. Xiaobing Niu, Shenglin Lium Runze Qiu. Efficient Electromagnetic Compatibility Optimization Design Based on the Stochastic Collocation Method. The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES), June 2024.
44. Yaojia Zhang, Li Wang, Lexuan Meng. An Analytical AC Resistance Calculation Method for Multiple-Conductor Feeder Cables in Aircraft Electric Power Systems. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics 67.5 (2020), pp. 3340–3349.
45. Белоусов А. О. // Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением. Системы управления, связи и безопасности № 3. 2023. С.134-196.
46. Mingazov A.L. Design of on-board electrical structures with regard to electromagnetic compatibility // Английский язык в сфере профессиональной коммуникации. Материалы VIII Всероссийской молодежной научной конференции. Казань, 2022. С. 244-245
47. Zhechev Y. S., Belousov A. O., Zabolotsky A. M., et.al. Serpentine and Spiral Routing

Schemes for Microwave Transmission Lines to Ensure UWB Interference Immunity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2023. pp. 1–13.

48. Мингазов А.Л., Федоров Е.Ю. Проектирование бортовых электроконструкций с учетом электромагнитной совместимости // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса. Сборник статей XVI Международной научно-практической конференции. Пенза, 2022 С. 94-97.

49. Evgenii Fedorov, Andrey Ferenets, Artur Mingazov. Features and limitations in the design of a light aircraft generation system. 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: The international scientific and practical conference materials. Ufa State Aviation Technical University. – Ufa: USATU publishing complex, 2021 - pp. 343-346

50. Evgenii Fedorov, Andrey Ferenets, Artur Mingazov. The Method of Selecting Protection Devices in the Automated Design of an Electrical Complex of a Transport Vehicle. International Conference on Automatics and Energy. *Journal of Physics: Conference Series* 2096 (2021). pp. 1-8.

51. Mingazov A.L. Application of genetic algorithms for solving the problem of structural components of aircraft electrical equipment // Английский язык в сфере профессиональной коммуникации. Сборник тезисов докладов VI Всероссийской молодежной научной конференции. Казань, 2020. С. 119-121.

Авторы публикации

Мингазов Артур Ленарович – аспирант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. mingazow.artur@yandex.ru

Федоров Евгений Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. zhenek_fed@mail.ru

References

1. Nguyen Van Hoi. *Development of algorithms for designing cable screens for electrical complexes of aircraft*. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow – 2014. Available by: https://new-dissert.ru/_avtoreferats/01007848852.pdf. Accessed: 09 Sep 2025. (In Russ).

2. Vasinova A.N. Forecasting electromagnetic compatibility of electronic systems of an unmanned aerial vehicle under the influence of radio-electronic means. *4-th ISTK "Modern innovations in science and technology"*, Kazan, 2014– pp.188-190. (In Russ).

3. Vauché R., Mefteh R. A. B., Haddad F., et. al. Experimental Time–Domain Study for Bandpass Negative Group Delay Analysis With Lill–Shape Microstrip Circuit. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 24155–24167. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3056221

4. M. Z. M. Hamdalla, J. M. Roacho-Valles, A. Caruso, et. al. Electromagnetic Compatibility Study of Quadcopter UAVs: Characteristic Mode Analysis of the Frame's Material and Shape Effect. *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 112, 2022, pp. 1–14. doi: 10.2528/PIERM22062907.

5. Zalaliev I.R., Ferenets A.V. The influence of high-intensity electromagnetic fields on the electrical circuits of aircraft. *V All-Russian Scientific and Technical Conference (dedicated to the 50th anniversary of the Department of Power Supply and Electrical Engineering of the Institute of Energy and Electrical Engineering)*. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Tolyatti State University, Institute of Energy and Electrical Engineering, 2017, pp.572-578. (In Russ).

6. Belousov A. O., Zhechev E. S., Chernikova E. B., et. al. UAVs protection and countermeasures in a complex electromagnetic environment // *Complexity*, 2022. Vol. 2022. pp. 1–16. doi:10.1155/2022/8539326

7. Belousov A. O., Medvedev A. V., Chernikova E. B., et. al. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation. *Symmetry*, 2021. Vol. 13(6). № 1074. pp. 1–22. doi: 10.3390/sym13061074

8. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., et. al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual–Axis Rotary Platform for an Anti–UAV System. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. No. 13. pp. 1-17. doi: 10.3390/app9132583

9. Ivanov A. A., Komnatnov M. E. A semi-analytical method for evaluating the effectiveness of shielding a body with an aperture. *Reports of TUSUR*. 2021. Vol. 24. No. 1. pp. 16-23. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-16-23. (In Russ).

10. Larin V. P., Zheludeva K. V. Problems of designing a hypersonic aircraft power supply system. *SCIENTIFIC PERIODICAL "INSITU" No. 4*, 2016. pp.33-37. (In Russ).

11. A.Y. Myasnikov. Designing components of on-board cable networks taking into account the requirements of manufacturability. *Design Ontology*, No. 3, volume 13, 2023 – pp.368-379. (In Russ).
12. Ivanov A. A., Demakov A.V., Komnatnov M. E., et. al. Semi-analytical approach for calculating shielding effectiveness of an enclosure with a filled aperture. *ELECTRICA*. 2022. No. 22. pp. 220-225. (In Russ).
13. Belousov A. O., Gazizov T. R. A method for tracing modal filter conductors based on a flat cable. Patent RUS №RU2749994. 06.21.2021, Byul. №18. Available at: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002749994_20210621_C1_RU /. Accessed: 6 Sep 2025. (In Russ).
14. Belousov A. O., Gazizov T. R. A method for tracing modal filter conductors with a circular cross-section. Patent RUS №RU2747104. 04.27.2021, Byul. №12. Available at: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002749994_20210621_C1_RU /. Accessed: 6 Sep 2025. (In Russ).
15. Suzdaltsev I.V., Garanin I.N. A technique for automated laying of cable connections through the channels of an unmanned aerial vehicle, taking into account the criterion of electromagnetic compatibility. *Modern materials, machinery and technology: proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference*, 2015, pp. 41-44. (In Russ).
16. Tay Sui Jiana, Muhammad Hafidz Fazli Md Fauadia, Saifudin Hafiz Yahaya. et al. A deep learning approach for automated PCB defect detection: A comprehensive review. *XXII Multidisciplinary Reviews* 8(1):2025011, 2025. doi:10.31893/multirev.2025011
17. Fung, K. C., Xue, K. W., Lai, C. M., et. al. Improving PCB defect detection using selective feature attention and pixel shuffle pyramid. *Results in Engineering*, 21, 101992. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.101992>
18. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F.. Methodology for ensuring intra-system electromagnetic compatibility of on-board equipment of unmanned aerial vehicles // *Izv. vuzov. Aviation Technology*, 2016. No. 4, Kazan – pp.155-160. (In Russ).
19. Bielsky T., Junemann M., Thielecke F. Parametric modeling of the aircraft electrical supply system for overall conceptual systems design. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Hamburg University of Technology, *Institute of Aircraft Systems Engineering*, Hamburg, 2021, pp. 1–13, doi: 10.25967/530143.
20. Das, D., Elfrgani, A., and Reddy, C.J. Simulation of Conductive and Radiated Emission for Off and OnBoard Radio Receivers according to CISPR 12 and 25, *SAE Technical Paper* 2020-01-1371, 2020. doi: 10.4271/2020-01-1371
21. Klykov A.V., Kirillov V. Y. Computer simulation capabilities in solving problems of electromagnetic compatibility of aircraft on-board cable networks. *Electronic journal "Proceedings of MAI"*, 2012. Issue No. 57. pp. 54-59. (In Russ).
22. Mohamed Z. M. Hamdalla, Anthony N. et. al. Electromagnetic Compatibility Analysis of Quadcopter UAVs Using the Equivalent Circuit Approach. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation* 3, September 2022, pp. 1090 – 1101 doi:10.1109/OJAP.2022.3206893
23. Koptev A. N., Myasnikov A. Yu. Theoretical foundations of designing simple harnesses for an aircraft's on-board cable network. *Bulletin of Samara State University. Aerospace Engineering, Technology and Mechanical Engineering* No. 4, 2019. pp.76-86. (In Russ).
24. Dementiev A. N. Klyuev D. S. Novikov A.N. et al. A model of the electromagnetic compatibility assessment process for on-board aircraft equipment. *Proceedings of MAI* No. 123. - 2022. - pp.1-21. (In Russ).
25. Suzdaltsev I.V., Ismagilov R.N. Automated placement of on-board electronic devices in the interior of an unmanned aerial vehicle, taking into account electromagnetic compatibility criteria. *New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry*, Kazan, 2016, pp. 232-238. (In Russ).
26. Das A., Campbell S. D., Werner D. H. An Augmented Y-parameter Method for Macromodeling Electromagnetic Structures in the Presence of Plane-Waves. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Denver, CO, Jul. 10, 2022. doi:10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9887307
27. Ten Have. Waveform model to characterize time-domain pulses resulting in EMI on static energy meters. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. April 2021, doi: 10.1109/TEM.2021.3062948.
28. Zhao Ta, Xueming Liu, Ping Sun et. al. Improved electromagnetic compatibility testing for rail vehicles using a quantum-based 3D reconstruction algorithm. *Optical and Quantum Electronics* (2024), 30 January 2024. doi: 10.1007/s11082-023-06067-y
29. Zhukov P.A. *Research of means of protection of electrotechnical complexes of aircraft from electromagnetic influences* [dissertation]. Moscow, 2022. Available at: <https://mai.ru/upload/iblock/c13/67>

t2n32mobnku0c0ym35kkmclit50bev/avtoreferat-ZHukov-P.A.-dlya-sayta-MAI.pdf. Accessed 09 Sep 2025. (In Russ)

30. Masoudi, N. *Geometric-Based Optimization Algorithms for Cable Routing and Branching in Cluttered Environments* [dissertation]. Clemson University, 2020. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/354492874.pdf>. Accessed 06 Sep 2025.

31. Yuanyuan Li, Yuanyuan Fang, Kaiyuan Li et. al. Morphological Tracing and Functional Identification of Monosynaptic Connections in the Brain: A Comprehensive Guide. *Neuroscience Bulletin*, May 2024. doi: 10.1007/s12264-024-01196-0

32. Punsisi Pamarathne, T.G.I. Fernando. Ant Colony Optimization Algorithm to Solve Electrical Cable Routing. *Advances in Electronics Engineering*, 2020, pp.69-85. doi:10.1007/978-981-15-1289-6_7.

33. Nafiseh Masoud, Georges Fadel. An Optimization Framework for The Design of Cable Harness Layouts in Planar Interconnected Systems. *Journal of Mechanical Design* 144(1), July 2021. pp.1-29. doi:10.1115/1.4051685.

34. Qian Y.-F., Du B., Ye Z.-F., et. al. Simulation on transient electromagnetic influence of lightning strike for turboprop engine. *4th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECOT)*, Dec. 2019, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICEECOT46775.2019.9114767.

35. Hartman T., Grootjans R., Moonen N. et.al. Electromagnetic compatible energy measurements using the orthogonality of nonfundamental power components. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 2, pp. 598–605, Apr. 2021. doi: 10.1109/TEM.2020.3019974

36. Belousov A. O., Vlasova N. O., Gordeyeva V. O., et.al. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal Decomposition to Protect Critical Equipment Against UWB Pulses. *Symmetry*. 2022. Vol. 14(6), № 1228. P. 1–34, doi: 10.3390/sym14061228.

37. Romashchenko M.A., Konovalov R.G., Vorobyov M.E. The main stages of the methodology for ensuring electromagnetic compatibility for mobile communication facilities. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. Vol. 19. No. 1. 2023. – pp. 62-68. (In Russ).

38. Romashchenko M.A., Konovalov R.G. The structure of functional connections of mobile communication facility equipment for solving EMC problems. *Problems of ensuring reliability and quality of devices, devices and systems: collection of scientific papers Voronezh*, 2022. pp. 140-145. (In Russ).

39. Helko B., Zander M., Ronald L. Testing of DC Electricity Meters with Broadband Conducted Electromagnetic Disturbances. *Conference: 2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*, May 2022, doi: 10.1109/ICHQP53011.2022.9808496

40. Kirillov V.Y. *Electromagnetic compatibility of aircraft*. Moscow: MAI, 2012. (In Russ).

41. Hamdalla, M. Z. M., et al. Characteristic mode analysis prediction and guidance of electromagnetic coupling measurements to a UAV model. *IEEE Access*, Vol. 10, 914–925, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3138296.

42. Mohamed Z. M. Hamdalla, Jesus M. Roacho-Valles, Anthony N. Caruso et. al. Electromagnetic Compatibility Study of Quadcopter UAVs: Characteristic Mode Analysis of the Frame's Material and Shape Effect. *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 112, 2022 . pp.1–14. doi:10.2528/PIERM22062907

43. Xiaobing Niu, Shenglin Lium Runze Qiu. Efficient Electromagnetic Compatibility Optimization Design Based on the Stochastic Collocation Method. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, June 2024. doi: 10.13052/2024.ACES.J.390607

44. Yaojia Zhang, Li Wang, and Lexuan Meng. An Analytical AC Resistance Calculation Method for Multiple-Conductor Feeder Cables in Aircraft Electric Power Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67.5 (2020), pp. 3340–3349. doi: 10.1109/TIE.2019.2917417

45. Belousov A. O. Approaches to ensuring electromagnetic compatibility of radio–electronic devices as part of a complex of functional destruction of unmanned aerial vehicles by powerful electromagnetic radiation. *Control, communication and security systems* No. 3. 2023 - pp.134-196. (In Russ).

46. Mingazov A.L. Design of on-board electrical structures with regard to electromagnetic compatibility. *English in the field of professional communication. Materials of the VIII All-Russian Youth Scientific Conference*, Казань. 2022 – pp. 244-245. (In Russ).

47. Zhechev Y. S., Belousov A. O., Zabolotsky A. M., et. al. Serpentine and Spiral Routing Schemes for Microwave Transmission Lines to Ensure UWB Interference Immunity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2023. pp. 1–13. doi: 10.1109/TMTT.2023.3276029

48. Mingazov A.L., Fedorov E.Y. Design of on-board electrical structures taking into account electromagnetic compatibility. *Promising areas of development of the motor transport complex. Collection of articles of the XVI International Scientific and Practical Conference*. Penza, 2022– pp. 94-97. (In Russ).

49. Fedorov E., Ferenets A., Mingazov A.. Features and limitations in the design of a light aircraft generation system. *2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: The*

international scientific and practical conference materials. Ufa State Aviation Technical University. – Ufa: USATU publishing complex, 2021 - pp. 343-346. doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657309

50. Fedorov E., Ferenets A., Mingazov A. The Method of Selecting Protection Devices in the Automated Design of an Electrical Complex of a Transport Vehicle. *International Conference on Automatics and Energy. Journal of Physics: Conference Series* 2096 (2021) – pp. 1-8. doi: 10.1088/1742-6596/2096/1/012201

51. Mingazov A.L. Application of genetic algorithms for solving the problem of structural components of aircraft electrical equipment. *English in the field of professional communication. Collection of abstracts of the VI All-Russian Youth Scientific Conference*. Kazan, 2020 – pp. 119-120.

Authors of the publication

Artur L. Mingazov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. mingazow.artur@yandex.ru

Evgenii Yu. Fedorov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. zhenek_fed@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **07.09.2025 г.**

Отредактировано **22.10.2025 г.**

Принято **01.11.2025 г.**



РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Петров А.Р., Грачева Е.И.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

petroval13@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В настоящее время для развития электроэнергетики и электротехнической промышленности необходимым условием является разработка и создание новых типов и конструкций отечественных низковольтных коммутационных аппаратов. В статье представлена разработанная компьютерная модель для исследования и оценки технических и конструктивных характеристик низковольтных коммутационных аппаратов на примере автоматических выключателей (АВ). *ЦЕЛЬ.* Разработка компьютерной модели для исследования и оценки технических параметров контактных соединений АВ. *МЕТОДЫ.* В статье представлен мультиплатформенный подход к проектированию и оценке технических и конструктивных характеристик контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов на примере АВ. Трехмерное моделирование выполнено в программе Solid Edge, ввод значений параметров геометрии элементов контактных соединений проводится с помощью Microsoft Excel, физические процессы моделируются в программе COMSOL Multiphysics. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* С помощью компьютерной модели возможно получить данные о нагреве контактных соединений, потерях мощности на полюс аппарата, а также сопротивлении контактных соединений при изменении коэффициента загрузки аппарата от 0,1 до 1,2. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Определены значения температуры нагрева контактных соединений, вероятности безотказной работы, сопротивления контактных соединений, потери мощности на полюс аппарата в зависимости от изменения числа циклов коммутаций АВ. Разработанная компьютерная модель позволяет проводить исследования контактных соединений АВ технических параметров в динамике в процессе эксплуатации. Результаты исследования позволяют контролировать техническое состояние исследуемых АВ в режимах эксплуатации.

Ключевые слова: автоматический выключатель; коммутационный ресурс; вероятность безотказной работы; сопротивление контактных соединений; нагрев контактных соединений; потери мощности на полюс.

Для цитирования: Петров А.Р., Грачева Е.И. Разработка компьютерной модели и исследование технических и конструктивных характеристик автоматических выключателей в различных режимах эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 72-84. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-72-84.

DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL AND RESEARCH OF TECHNICAL AND DESIGN CHARACTERISTICS OF CIRCUIT BREAKERS IN VARIOUS OPERATING MODES

Petrov A.R., Gracheva E.I.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

petroval13@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Currently, the development and creation of new types and designs of domestic low-voltage switching devices is a prerequisite for the development of the electric power industry and the electrical industry. The article presents a developed computer model for the study and evaluation of the technical and design characteristics of low-voltage switching devices using the example of circuit breakers (CB). *THE PURPOSE.* Development of a computer model for the

study and evaluation of the technical parameters of contact connections CB. METHODS. The article presents a multiplatform approach to the design and evaluation of technical and constructive characteristics of contact connections of low-voltage switching devices using the example of CB. Three-dimensional modeling is performed in the Solid Edge program, input of the geometry parameters of the contact joints is carried out using Microsoft Excel, physical processes are modeled in the COMSOL Multiphysics program. RESULTS. Using a computer model, it is possible to obtain data on the heating of the contact connections, power losses to the pole of the device, as well as the resistance of the contact connections when the load factor of the device changes from 0.1 to 1.2. CONCLUSIONS. The values of the heating temperature of the contact connections, the probability of trouble-free operation, the resistance of the contact connections, and the loss of power to the pole of the device are determined depending on the change in the number of switching cycles of the CB. The developed computer model allows conducting studies of contact connections and technical parameters in dynamics during operation. The results of the study make it possible to monitor the technical condition of the studied CB in operating modes.

Keywords: circuit breaker; switching resource; probability of trouble-free operation; resistance of contact connections; heating of contact connections; loss of power to the pole.

For citation: Petrov A.R., Gracheva E.I. Development of a computer model and research of technical and design characteristics of circuit breakers in various operating modes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (6): 72-84. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-72-84.

Литературный обзор (Literature Review)

Ученым А.Ю. Верстуниным в [1] разработана и апробирована математическая модель процесса установления стационарного теплового состояния контактно-токоведущих контуров контакторов.

Авторами Петровым В. Н., Николаевым Д. Н., Никитиным Д. Н. в [2] разработано устройство управления электромагнитными приводами, обеспечивающее снижение потребляемой мощности, а также увеличение их электрической износостойкости.

Иванов И. П., Михайлов А. В., Моисеев С. А. в [3] провели оценку формы при обратном проектировании коммутационных аппаратов, повторяющую форму прототипа.

Иванов И. П., Самуилов Д. В. и др. в [4] усовершенствовали методику проектирования токопроводящих частей главной цепи электромагнитных контакторов. Особенность методики заключается в использовании в расчетах постоянной распределения температуры вдоль длины проводника.

Афанасьев П. А., Ивахненко А. Г. в [5] предложили алгоритм верификации методов испытаний в лаборатории, проводящей испытания низковольтного оборудования.

Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. и др. в [6] исследовали вопрос повышения эффективности работы низковольтных коммутационных аппаратов путем тепловизионного обследования.

Львов М.Ю., Никитина С.Д., Лесив А.В. в [7] разработали методологию применения термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений электрооборудования.

Авторы Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю. в [8] исследовали вопросы оценки параметров надежности контактов низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в электрических сетях систем электроснабжения промышленных предприятий.

Петровой Р. М., Грачевой Е. И. в работе [9] выявлены законы изменения вероятностных характеристик надежности коммутационных аппаратов, а также кабельных линий низкого напряжения.

Зацепина В. И., Астанин С. С. в [10] исследовали иерархию и структуру систем электроснабжения, вероятностные характеристики работы оборудования, а также проанализировали методы расчета предполагаемой частоты отказов элементов.

Feng Z. в [11] исследовал различные типы неисправностей электрооборудования и основные влияющие на неисправности факторы в распределительных сетях низкого и среднего напряжения, а также предложил модель анализа надежности на основе теории дерева отказов.

Liu Z., Huang S., Zhao C. в [12] исследовали законы изменения восстанавливающегося напряжения при отключении автоматического выключателя при различных режимах нагрузки и коротких замыканиях.

Arrighetti P., Corfdir P., Ilıc T. в [13] разработали модель автоматического выключателя для исследования технических характеристик при отключении аппаратом токов короткого замыкания.

Dalal S. N., Gohel M. V., Mehta C. R. в [14] исследовали тепловые характеристики автоматического выключателя в литом корпусе и определили влияние тепловыделения на элементы конструкции внутри корпуса.

Sen P. M., Kanojia S. S. в [15] предложили эффективные методы улучшения тепловых характеристик автоматических выключателей, а также исследовали влияющие факторы на тепловые характеристики.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что в настоящее время проводятся исследования в области повышения точности оценки технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов.

Научная и практическая значимость предлагаемого исследования заключается в повышении точности оценки технического состояния АВ внутрицехового электроснабжения.

Актуальностью и научной новизной исследования является разработка компьютерной модели для исследования и оценки технических и конструктивных характеристик АВ. Трехмерное моделирование выполнено в программе Solid Edge, ввод значений параметров геометрии элементов контактных соединений в Microsoft Excel, физические процессы моделируются в программе COMSOL Multiphysics.

Введение (Introduction)

Компьютерное моделирование конструктивных и технических характеристик электрических аппаратов необходимо для повышения точности и сокращения времени определения основных параметров контактных соединений. В связи с этим результаты моделирования аппаратов необходимо представлять в доступной форме для инженерно-конструкторского персонала. Это позволит сократить проведение натурных испытаний образцов в лабораториях.

Компьютерная модель позволяет описать изменение технических параметров электрических аппаратов при изменении условий их работы. Системы электроснабжения промышленных предприятий характеризуются высокой стоимостью обслуживания оборудования и рисками отказа коммутационных аппаратов. Поэтому компьютерное моделирование является целесообразным при проектировании новых типов аппаратов и их эксплуатации.

В предлагаемой статье представлена разработанная компьютерная модель для расчета технических параметров контактных соединений АВ для различных режимов эксплуатации.

Под режимом эксплуатации понимается:

- характеристика срабатывания (кривая тока) – С,
- частота коммутаций – от 2 до 5 за один рабочий день;
- коэффициент загрузки аппарата – от 0,1 до 1,2.

Основными задачами моделирования при этом являются:

- определение температуры нагрева контактных соединений;
- определение потерь активной мощности на полюс аппарата;
- определение сопротивления контактных соединений.

С помощью предлагаемой модели осуществляется проверка геометрии элементов контактных соединений, выбор контактного нажатия и допустимых шероховатостей материалов контактных соединений АВ.

Результаты моделирования возможно использовать при проведении расчетов и исследований на стадии разработки конструкции АВ. Это позволит в дальнейшем устранить ошибки, возникающие при проектировании, определить оптимальные размеры контактных соединений и сократить при этом число итераций. Допустимое значение температуры нагрева контактных соединений, потерь активной мощности и сопротивления контактных соединений свидетельствует о правильном выборе и учете конструктивных особенностей параметров исследуемых аппаратов.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для разработки геометрической структуры контактных соединений использована программа Solid Edge, которая позволяет получить достоверные параметры аппаратов при проектировании. Для ввода значений параметров контактных соединений используется

Microsoft Excel, что упрощает процессы сбора и накопления базы данных необходимых технических характеристик. Физические параметры контактных соединений аппаратов учитываются в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Упрощенная схема моделирования представлена на рисунке 1.

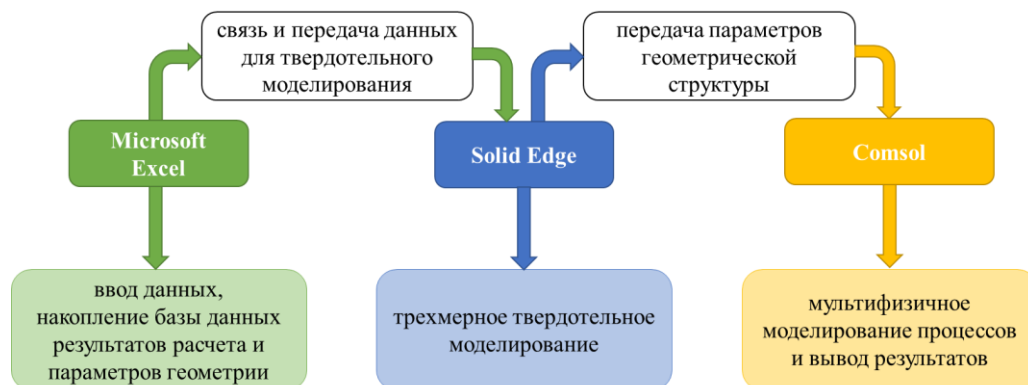


Рис. 1. Схема моделирования контактных соединений АВ Fig. 1. Scheme of modeling contact connections CB

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Моделирование выполнено для АВ с рычажным подвижным контактом. Разработанная геометрическая структура представлена на рисунке 2.

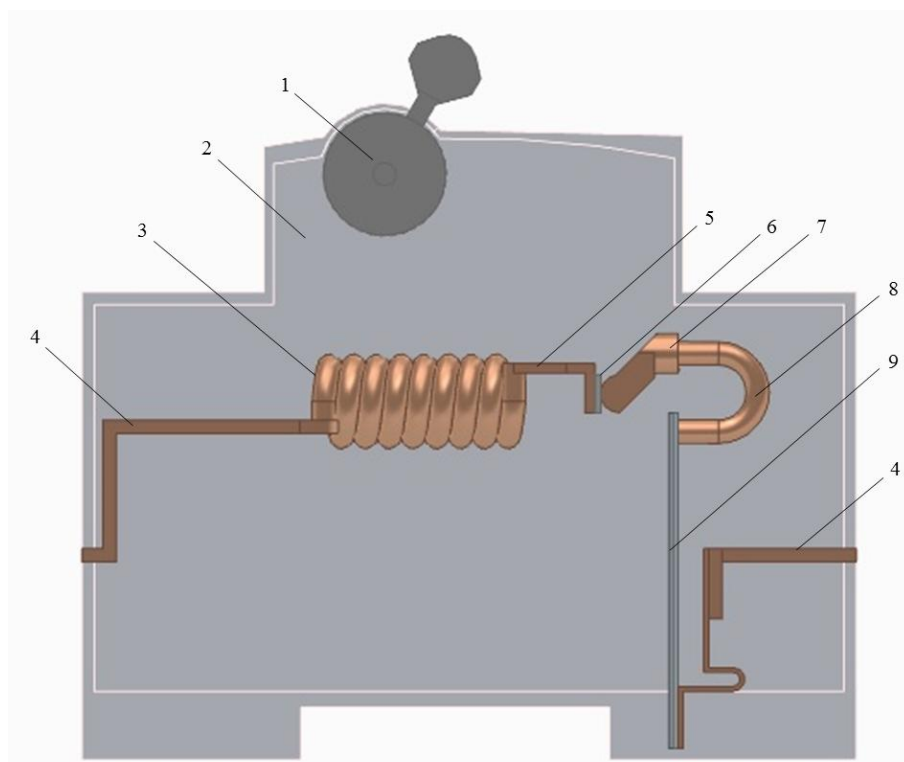


Рис. 2. Модель АВ в программе Solid Edge: Fig. 2. The CB model in the Solid Edge program:
1 – рычаг управления; 2 – корпус; 3 – электромагнитный (ЭМ) расцепитель; 4 – ввод для клеммы подключения; 5 – неподвижный контакт; 6 – напайка; 7 – подвижный контакт; 8 – гибкая связь; 9 – биметаллическая пластина
1 – control lever; 2 – housing; 3 – electromagnetic (EM) release; 4 – input for connection terminals; 5 – fixed contact; 6 – soldering; 7 – moving contact; 8 – flexible connection; 9 – bimetallic plate

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В таблице 1 представлены уравнения описания физических процессов, протекающих в контактных соединениях АВ. Все процессы учитываются в программе COMSOL Multiphysics.

Таблица 1
Table 1Физические процессы, протекающие в контактных соединениях
Physical processes occurring in contact connections

№	Физический процесс	Уравнение	Описание
1	Протекание тока по контактным соединениям	$J = \sigma E + J_e$	J – вектор плотности тока, А/м ² ; σ – электропроводность, См/м; E – вектор напряженности электрического поля, В/м; J_e – внешняя плотность тока, А/м ²
		$E = -\nabla V$	∇V – ротор электрической потенциальной энергии, В
		$\nabla J = Q_{j,v}$	∇J – ротор плотности тока, $Q_{j,v}$ – скорость изменения заряда, Кл/м ³
2	Изменение сопротивления контактных соединений в зависимости от температуры нагрева	$\sigma = \frac{1}{\rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_{ref})]}$	ρ_0 – удельное сопротивление при температуре t_{ref} , Ом·мм ² /м; α – температурный коэффициент сопротивления, 1/К; t – текущее значение температуры, К; t_{ref} – эталонное значение температуры, К
3	Охлаждение элементов контактного соединения	$\rho \cdot C_p \cdot u \cdot \nabla T + \nabla q = Q_p + Q_{ted}$	ρ – плотность, кг/м ³ ; C_p – удельная теплоемкость при постоянном напряжении, Дж/(кг·К); u – вектор скорости поступательного движения, м/с; T – абсолютная температура, К; q – тепловой поток за счет теплопроводности, Вт/м ² ; Q_p – дополнительные источники тепла, Вт/м ³ ; Q_{ted} – термоупругое демпфирование для учета термоупругих эффектов в твердых телах
		$Q = h \cdot (T_{cs} - T_{air}) \cdot F$	Q – тепловой поток, Вт; h – коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·К; T_{cs} – температура контактных соединений, К; T_{air} – температура окружающего воздуха, К; F – поверхность теплообмена, м ²

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обсуждение результатов (Discussions)

Для моделирования параметров контактных соединений исследуются АВ с номинальным током ($I_{ном}$) 16 А и 32 А. Технические данные аппаратов должны соответствовать ГОСТ ИЕС 60947-2-2021 и ГОСТ 60898-1-2020. В таблице 2 приведены данные для моделирования, которые задаются в Microsoft Excel.

Таблица 2
Table 2Технические параметры АВ для моделирования
Technical parameters of the CB for modeling

Ток $I_{ном}$, А	Ширина подвижного контакта, мм	Ширина напайки, мм	Ширина неподвижного контакта, мм	Диаметр гибкой связи, мм	Диаметр ЭМ расцепителя	Количество витков ЭМ расцепителя
16	3	4,5	4,5	1,6	1,6	9
32	3	4,5	4,5	2,3	2,3	8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для повышения точности моделирования в разработанной программной модели учитываются следующие параметры: M_{asp} – шероховатость поверхности, неровности среднего наклона; Q_{asp} – шероховатость поверхности, выступы средней высоты; P – контактное нажатие, кПа; H_c – микротвердость, Па; h_k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К).

Для представления результатов моделирования в удобной форме переходим в программе COMSOL в инструмент создания приложений Application Builder. С помощью инструмента приложений возможно разрабатывать отдельные пользовательские приложения, чтобы применять их без установки и навыков владения программой COMSOL. Рабочая область разработанного приложения представлена на рисунке 3.

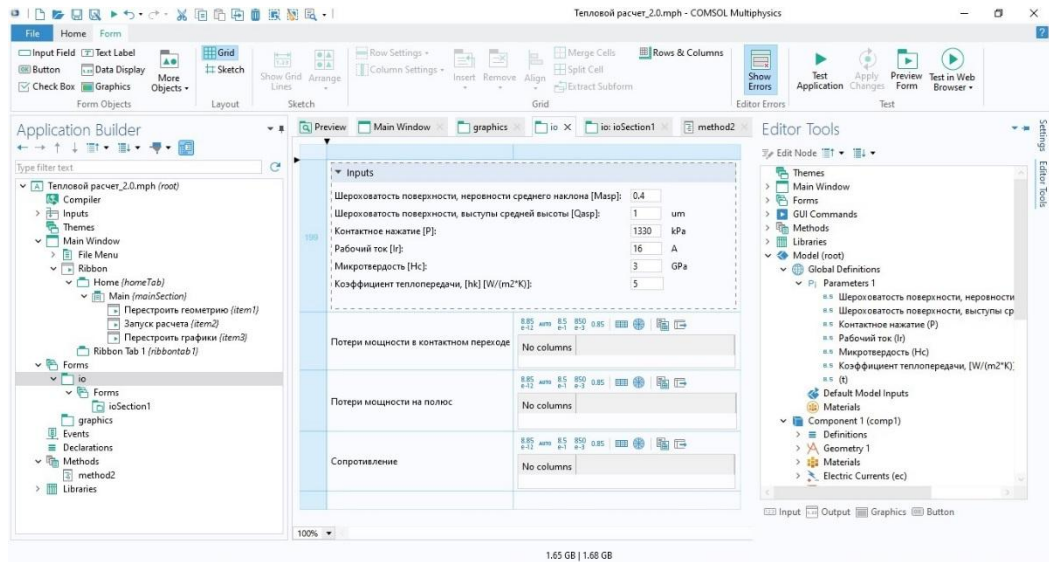


Рис. 3. Рабочая область приложения

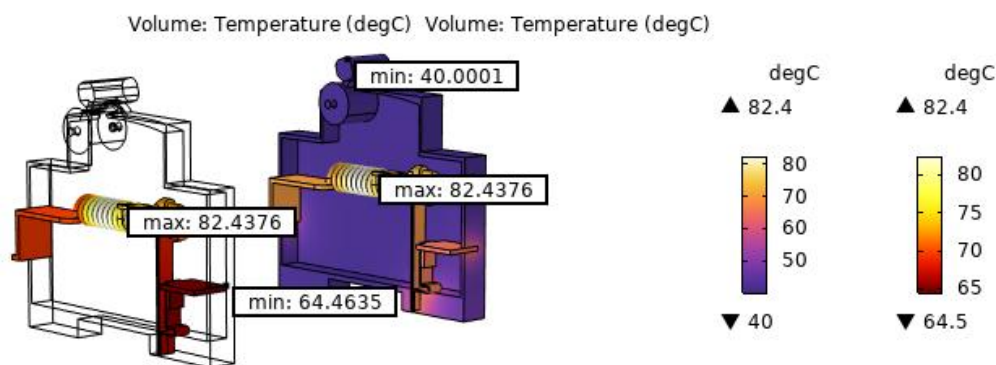
Fig. 3. Application workspace

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Формирование результатов моделирования параметров контактных соединений АВ возможно с использованием блока расчета, который является разделом для визуализации разработанной модели. С помощью разработанного приложения осуществляется запуск расчета, перестроение геометрии модели, а также вывод графических зависимостей требуемых параметров. Ввод необходимых данных для моделирования производится в блоке задания параметров. На рисунках 4 и 5 представлены результаты моделирования для исследуемых АВ.

Inputs	
Шероховатость поверхности, неровности среднего наклона [Masp]:	0.4
Шероховатость поверхности, выступы средней высоты [Qasp]:	1 um
Контактное нажатие [P]:	1330 kPa
Рабочий ток [Ir]:	16 A
Микротвердость [Hc]:	3 GPa
Коэффициент теплопередачи, [hk] [W/(m²·K)]:	5
Потери мощности в контактном переходе	Surface loss density, electromagnetic (W) 0.0038981
Потери мощности на полюс	Volumetric loss density, electromagnetic (W) 0.69398
Сопротивление	Resistance (mΩ) 2.7266

а)



б)

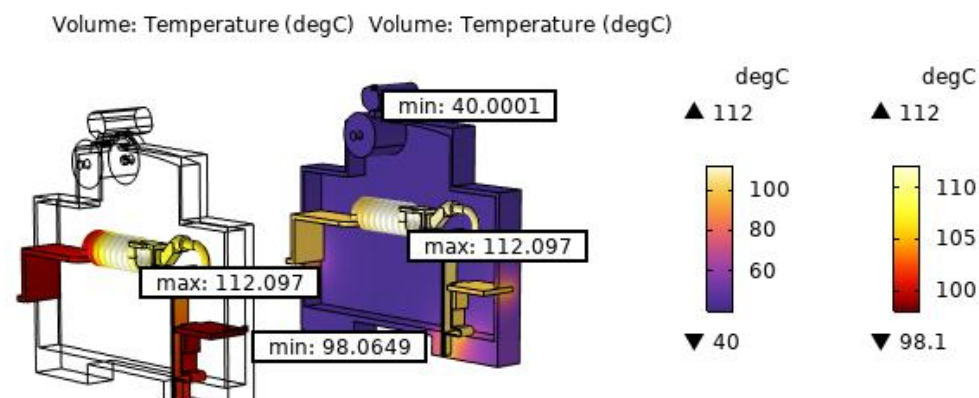
Рис. 4. Результаты применения разработанной компьютерной модели АВ с $I_{ном} = 16$ А

Fig. 4. Results of application of the developed computer model of CB with $I_{nom} = 16$ A

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Inputs	
Шероховатость поверхности, неровности среднего наклона [Maspr]:	0.4
Шероховатость поверхности, выступы средней высоты [Qasp]:	1 um
Контактное нажатие [P]:	1330 kPa
Рабочий ток [I _r]:	32 A
Микротвердость [Hc]:	3 GPa
Коэффициент теплопередачи, [hk] [W/(m ² *K)]:	5
Потери мощности в контактом переходе	Surface loss density, electromagnetic (W) 0.016577
Потери мощности на полюс	Volumetric loss density, electromagnetic (W) 1.5498
Сопротивление	Resistance (mΩ) 1.5300

а)



б)

Рис. 5. Результаты применения разработанной компьютерной модели АВ с $I_{ном} = 32$ А

Fig. 5. Results of application of the developed computer model of CB with $I_{nom} = 32$ A

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунках 4 и 5:

а – блок ввода и вывода данных;

б – распределение температуры нагрева по контактным соединениям и на корпус АВ.

Результаты моделирования параметров контактных соединений АВ приведены в таблице 3.

Таблица 3
Table 3Результаты моделирования параметров контактных соединений АВ
The results of modeling the parameters of contact connections CB

Тип аппарата	Коэффициент загрузки K_z	Минимальная температура нагрева контактных соединений $t_{\min}, ^\circ\text{C}$	Максимальная температура нагрева контактных соединений $t_{\max}, ^\circ\text{C}$	Потери мощности на полюс $\Delta P, \text{Вт}$	Сопротивление контактных соединений $R, \text{мОм}$
АВ на 16А	0,3	41,9	43,4	0,06	2,43
	0,5	45,6	49,6	0,16	2,48
	1,0	64,5	82,4	0,69	2,73
АВ на 32А	0,3	44,3	45,3	0,15	1,25
	0,5	52,3	55,2	0,33	1,29
	1,0	98,1	112,1	1,55	1,53

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Определим изменение исследуемых параметров контактных соединений АВ при изменении коэффициента загрузки аппаратов. Результаты представлены на рисунках 6-8.

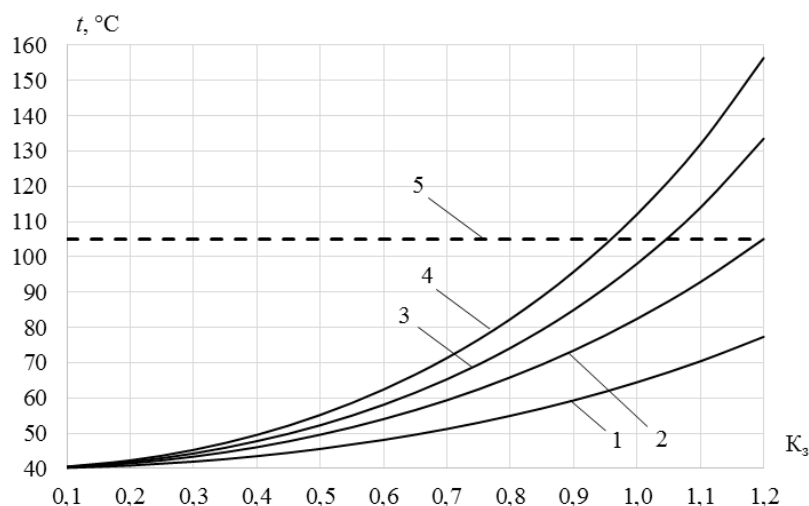


Рис. 6. Графические зависимости изменения температуры нагрева контактных соединений от коэффициента загрузки аппаратов: 1, 2 – минимальное и максимальное значения температуры нагрева для АВ с $I_{\text{ном}} = 16 \text{ А}$; 3, 4 – минимальное и максимальное значения температуры нагрева для АВ с $I_{\text{ном}} = 32 \text{ А}$; 5 – допустимое значение температуры нагрева в соответствии ГОСТ 403-73

Fig. 6. Graphical dependences of the change in the heating temperature of the contact connections on the load factor of the devices: 1, 2 – the minimum and maximum values of the heating temperature for CB with $I_{\text{ном}} = 16 \text{ А}$; 3, 4 – the minimum and maximum values of the heating temperature for CB with $I_{\text{ном}} = 32 \text{ А}$; 5 – the permissible value of the heating temperature in accordance with GOST 403-73

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Превышения температуры нагрева контактных соединений низковольтных аппаратов должны соответствовать требованиям ГОСТ. Для проверки проводится сравнение значений температуры нагрева с требованиями регламентирующих стандартов. При этом должно соблюдаться условие соответствия полученного значения превышения температуры допустимому. Допустимое превышение температуры нагрева контактных соединений регламентирует ГОСТ 403-73, т.е. допустимое значение температуры нагрева контактных соединений внутри аппаратов составляет $t_{\text{доп}} = 105^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды, равной 40°C . Графические зависимости на рисунке 6 показывают, что при $K_z = 1$ для АВ с $I_{\text{ном}} = 16 \text{ А}$, максимальная абсолютная температура нагрева контактных соединений составляет $82,4^\circ\text{C}$, т.е. превышение температуры нагрева контактных соединений относительно допустимого значения температуры отсутствует. Для АВ с $I_{\text{ном}} = 32 \text{ А}$ температура нагрева контактных соединений при номинальной нагрузке аппарата равна $112,1^\circ\text{C}$, в этом случае превышение температуры составляет $7,1^\circ\text{C}$.

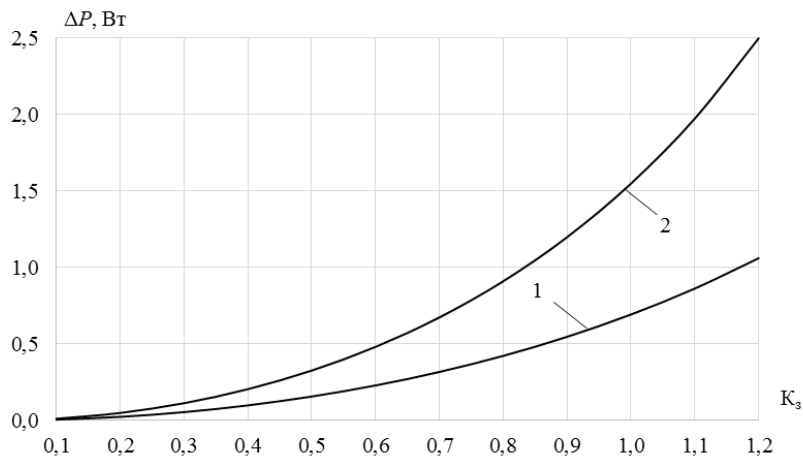


Рис. 7. Графические зависимости изменения потерь активной мощности на полюс АВ от его коэффициента загрузки: 1 – для АВ с $I_{ном} = 16$ А; 2 – для АВ с $I_{ном} = 32$ А

Fig. 7. Graphical dependences of the change in the loss of active power to the CB pole on its load factor: 1 – for CB with $I_{nom} = 16$ A; 2 – for CB with $I_{nom} = 32$ A

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графические зависимости на рисунке 7 показывают, что для исследуемых аппаратов потери активной мощности на полюс находятся в допустимых пределах в соответствии с ГОСТ. Согласно ГОСТ 60898-1-2020, максимально допустимое значение потерь мощности на полюс при номинальной загрузке для АВ на токи, не превышающие 16 А составляет 3,5 Вт, а для АВ с $I_{ном} = 32$ А – 4,5 Вт.

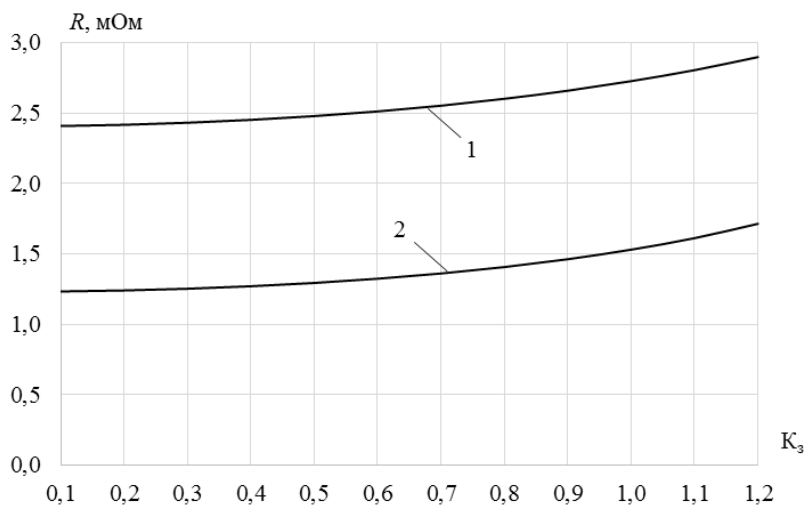


Рис. 8. Графические зависимости изменения сопротивления контактных соединений АВ от коэффициента загрузки аппарата: 1 – для АВ с $I_{ном} = 16$ А; 2 – для АВ с $I_{ном} = 32$ А

Fig. 8. Graphical dependences of the change in the resistance of the CB contact connections on the load factor of the device: 1 – for CB with $I_{nom} = 16$ A; 2 – for CB with $I_{nom} = 32$ A

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графические зависимости на рисунке 8 показывают, что при изменении коэффициента загрузки от 0,1 до 1,2 для аппарата с $I_{ном} = 16$ А сопротивление контактных соединений не превышает значения 2,9 мОм, а для АВ с $I_{ном} = 32$ А – 1,7 мОм.

Далее определим изменение вероятности безотказной работы $P(n)$ и сопротивления контактных соединений $R(n)$ исследуемых АВ при изменении цикла коммутаций. Разработанная модель позволит учитывать интенсивность отказов АВ. При этом интенсивность отказов аппаратов определяется с учетом поправочных коэффициентов [8].

Тогда $P(n)$ для АВ с $I_{ном} = 16$ А имеет вид:

$$P(n) = e^{-7,44 \cdot 10^5 \cdot n} \quad (1)$$

$P(n)$ для АВ с $I_{ном} = 32$ А.

$$P(n) = e^{-6,83 \cdot 10^5 \cdot n} \quad (2)$$

Графические зависимости изменения $P(n)$ и $R(n)$ от числа коммутационных циклов представлены на рисунках 9 и 10.

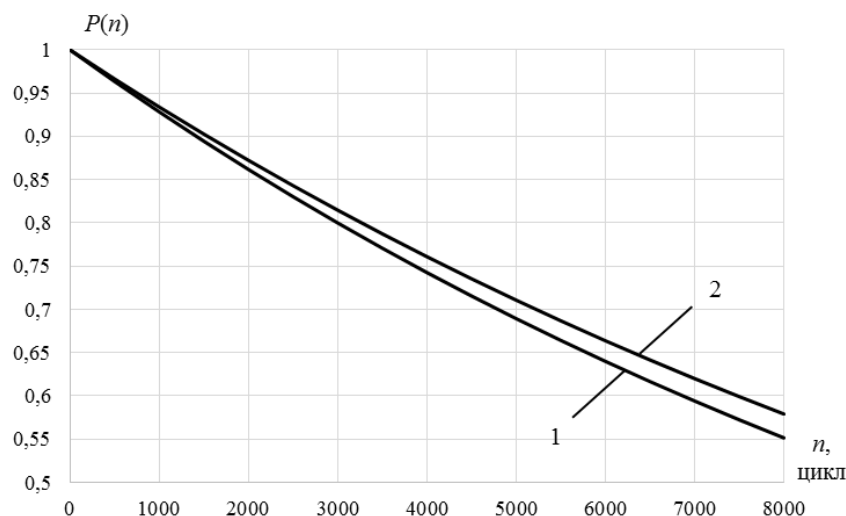


Рис. 9. Графические зависимости изменения вероятности безотказной работы АВ от числа цикла коммутаций: 1 – для АВ с $I_{ном} = 16$ А; 2 – для АВ с $I_{ном} = 32$ А

Fig. 9. Graphical dependences of the change in the probability of failure-free operation of an CB on the number of switching cycles: 1 – for CB with $I_{nom} = 16$ A; 2 – for CB with $I_{nom} = 32$ A

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графические зависимости на рисунке 9 показывают, что значение вероятности безотказной работы $P(n)$ для исследуемых АВ менее 0,85 наблюдается при числе коммутаций более 2300, что является недопустимым согласно ГОСТ 12434-83. Поэтому предлагается провести модернизацию контактных соединений аппаратов, например, увеличение площади поперечного сечения контактного перехода. С помощью результатов исследования возможно определять максимально возможный уровень корректировки параметров конструкции аппаратов, т.е. когда будет рентабельно перейти к новой конструкции для повышения эффективности эксплуатации.

Изменение сопротивления контактных соединений $R(n)$ в процессе эксплуатации для АВ с $I_{ном} = 16$ А определяется выражением [8].

$$R(n) = 3 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + 0,0005 \cdot n + 2,55 \quad (3)$$

Для АВ с $I_{ном} = 32$ А функция $R(n)$ имеет вид [8].

$$R(n) = 2 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + 0,0005 \cdot n + 1,39 \quad (4)$$

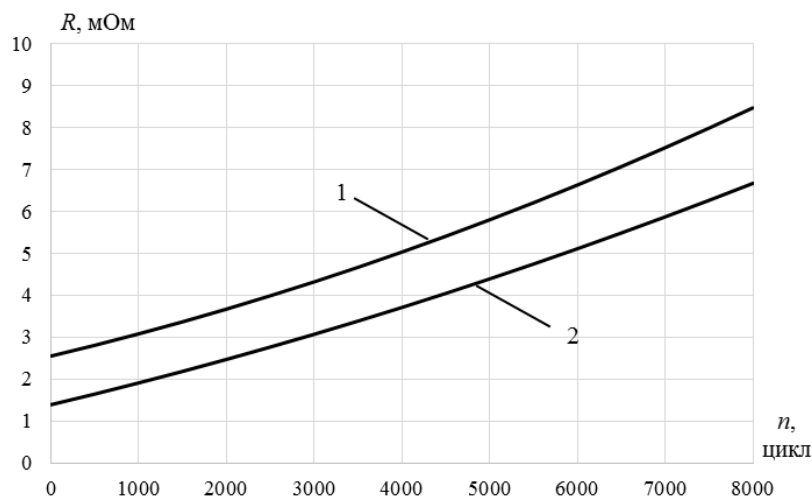


Рис. 10. Графические зависимости изменения сопротивления контактных соединений АВ от числа цикла коммутаций: 1 – для АВ с $I_{ном} = 16$ А; 2 – для АВ с $I_{ном} = 32$ А

Fig. 10. Graphical dependences of the change in the resistance of the CB contact connections on the number of switching cycles: 1 – for CB with $I_{nom} = 16$ A; 2 – for CB with $I_{nom} = 32$ A

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графические зависимости на рисунке 10 показывают, что для АВ с $I_{\text{ном}} = 16$ А сопротивление контактных соединений при числе циклов коммутаций $n = 8000$ увеличивается в 3 раза относительно начального значения сопротивления контактных соединений. Для АВ с $I_{\text{ном}} = 32$ А сопротивление контактных соединений при паспортном числе циклов коммутаций увеличивается в 4 раза относительно начального значения сопротивления нового аппарата (до начала эксплуатации). Результаты расчетов исследуемых параметров для АВ представлены в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Результаты расчетов $P(n)$ и $R(n)$ для АВ
The results of calculations of $P(n)$ and $R(n)$ for CB

Тип аппарата	Параметр	Количество циклов, n						
		500	1000	2000	3000	5000	7000	8000
АВ на 16 А	$P(n)$	0,9635	0,9283	0,8617	0,8000	0,6894	0,5940	0,5515
	$R(n)$, МОм	2,81	3,08	3,67	4,32	5,80	7,52	8,47
АВ на 32 А	$P(n)$	0,9664	0,9340	0,8723	0,8147	0,7107	0,6200	0,5790
	$R(n)$, МОм	1,65	1,91	2,47	3,07	4,39	5,87	6,67

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Закключение (Conclusions)

Проведенные исследования показывают, что разработанная для АВ компьютерная модель позволяет с требуемой точностью определять основные технические параметры низковольтных коммутационных аппаратов. При этом для оценки технического состояния аппаратов необходимо получить достоверные данные о нагреве контактных соединений, сопротивлении контактных соединений и потерях активной мощности на полюс аппарата. Результаты применения компьютерной модели сопоставлены с действующими государственными стандартами, регламентирующими исследуемые параметры, такие как нагрев контактных соединений, сопротивление контактных соединений и потери активной мощности на полюс.

Для оценки возможного технического ресурса АВ определены зависимости изменения сопротивления контактных соединений и вероятности безотказной работы от числа циклов коммутаций. Исследование показало, что для АВ значение $P(n)$ уменьшается до значения 0,85 при числе циклов коммутаций $n = 2300$. Т.е., при превышении числа циклов коммутаций свыше указанного значения требование ГОСТ 12434-83 не выполняется.

Сопротивление контактных соединений при достижении паспортного значения числа циклов коммутаций аппаратов увеличивается в 3 раза для АВ с $I_{\text{ном}} = 16$ А и, примерно, в 4 раза для АВ с $I_{\text{ном}} = 32$ А, что соответствует процессу износа контактных соединений АВ при эксплуатации, уменьшению контактного нажатия и увеличению шероховатостей поверхностей материалов контактных соединений.

Результаты работы рекомендуется использовать для оценки технического состояния контактных соединений АВ в режимах эксплуатации.

Дальнейшие исследования возможны при разработке компьютерных моделей для анализа оценки технических характеристик для различных типов низковольтных аппаратов, таких, как магнитные пускатели, контакторы, рубильники и пакетные выключатели с различными номинальными токами.

Литература

1. Верстунин А. Ю. Математическая итеративно-адапционная модель процесса установления стационарного теплового состояния контактнотоковедущих контуров контакторов // Вестник МЭИ. – 2023. – №2. – с. 27-36.
2. Петров В. Н., Николаев Д. Н., Никитин Д. Н. Экспериментальное исследование оптимального по потребляемой мощности устройства управления электромагнитным приводом контактора // Вестник ЧГУ. 2024. №4. С. 98–106. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-98-106.
3. Иванов И. П., Михайлов А. В., Моисеев С. А. Особенности промышленного дизайна при обратном проектировании коммутационных аппаратов // Вестник Чувашского университета. 2024. №4. С. 36 – 44. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-36-44.
4. Иванов И. П., Самуилов Д. В., Свинцов Г. П., Федимиров А. А., Шпаков Е. В. Усовершенствованная методика проектирования токопроводящих частей электромагнитных

контакторов // Вестник Чувашского университета. 2021. №3. С. 73 – 82. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-73-82.

5. Афанасьев П. А., Ивахненко А. Г. Верификация методов испытаний низковольтного оборудования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №12. С. 343–348. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-343-349.

6. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петров А.Р., Грачева Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.

7. Львов М.Ю., Никитина С.Д., Лесив А.В. Применение термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электрооборудования // Электрические станции. 2023. № 2. С. 44-51. doi:http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1099.2.008.

8. Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю. Повышение точности оценки параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в системах внутрицехового электроснабжения с учетом основных воздействующих факторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 38 -52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52.

9. Петрова Р. М., Грачева Е. И. Алгоритмы оценки основных параметров надежности низковольтного оборудования схем цеховых сетей // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.

10. Зацепина В. И., Астанин С. С. Возможности мониторинга состояния системы относительно её отказоустойчивости // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №12. С. 98 – 102.

11. Feng Z. A Study of Reliability of Low and Medium Voltage Distribution Networks Based on Fault Tree Theory // 2024 IEEE 4th International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), Changchun, China, 2024, pp. 955-960, doi: 10.1109/ICETCI61221.2024.10594689.

12. Liu Z., Huang S., Zhao C. Study on the Influence of Reignition on Electrical Life Distribution of Low-Voltage Circuit Breakers // in IEEE Access, vol. 9, pp. 91500-91511, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091735.

13. Arrighetti P., Corfdir P., Ilic T. System level and multiphysics approaches to simulate low voltage circuit breaker interruption // 2023 IEEE 68th Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), Seattle, WA, USA, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/HOLM56075.2023.10352272.

14. Dalal S. N., Gohel M. V., Mehta C. R. Analysis and Thermal Performance Implementation of MCCB with Aluminium Busbar and Enclosure // 2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Delhi, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10307722.

15. Sen P. M., Kanojia S. S. Analysis of Thermal Performance of an Air Circuit Breaker // 2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/GUCON50781.2021.9573594.

Авторы публикации

Петров Алмаз Радикович – аспирант Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru

References

1. Verstunin A.Yu. Iterative-Adaptive Mathematical Model of Settling a Stationary Thermal State of the Contactor Live Circuits. Bulletin of MPEI. 2023;2:27—36. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-2-27-36.

2. Petrov V. N., Nikolaev D. N., Nikitin D. N. Experimental study of optimal power consumption control device for the electromagnetic drive of a contactor // Bulletin of the Chuvash University. 2024. No.4. pp. 98–106. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-98-106.

3. Ivanov I. P., Mikhailov A. V., Moiseev S. A. Features of industrial design in reverse engineering of switching devices // Bulletin of the Chuvash University. 2024. No.4. pp. 36–44. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-36-44.

4. Ivanov I. P., Samuilov D. V., Svintsov G. P., Fedimirov A. A., Shpakov E. V. Improved design technique for conducting parts of electromagnetic contactors // Bulletin of the Chuvash University. 2021. No.3. pp. 73 – 82. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-73-82.

5. Afanasyev P.A., Ivakhnenko A.G. Verification of low-voltage equipment test methods // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021. No.12. pp. 343–348. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-343-349.
6. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Petrov A.R., Gracheva E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (2): 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.
7. Lvov M. Yu., Nikitina S. D., Lesiv A. V. Methodological principles of monitoring the condition of contacts and contact connections during the operation of electrical equipment using thermal indicators // Electrical stations. 2023. n. 2. pp. 44-51. doi:http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1099.2.008.
8. Petrov A.R., Gracheva E.I., Abdullazyanov E.Yu. Improving the accuracy of estimation of reliability parameters of low-voltage switching devices installed in the systems of inhouse power supply taking into account the main influencing factors. Power engineering: research, equipment, technology. 2025; 27 (3):38-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52.
9. Petrova R. M., Gracheva E. I. Algorithms for estimating the main reliability parameters of low-voltage equipment of shop-floor network schemes // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.
10. Zatsepina V.I., Astanin S.S. Possibilities of monitoring the state of the system relating to its failure touch // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021. No.12. pp. 98–102.
11. Feng Z. A Study of Reliability of Low and Medium Voltage Distribution Networks Based on Fault Tree Theory // 2024 IEEE 4th International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), Changchun, China, 2024, pp. 955-960, doi: 10.1109/ICETCI61221.2024.10594689.
12. Liu Z., Huang S., Zhao C. Study on the Influence of Reignition on Electrical Life Distribution of Low-Voltage Circuit Breakers // in IEEE Access, vol. 9, pp. 91500-91511, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091735.
13. Arrighetti P., Corfdir P., Ilic T. System level and multiphysics approaches to simulate low voltage circuit breaker interruption // 2023 IEEE 68th Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), Seattle, WA, USA, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/HOLM56075.2023.10352272.
14. Dalal S. N., Gohel M. V., Mehta C. R. Analysis and Thermal Performance Implementation of MCCB with Aluminium Busbar and Enclosure // 2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Delhi, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10307722.
15. Sen P. M., Kanojia S. S. Analysis of Thermal Performance of an Air Circuit Breaker // 2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/GUCON50781.2021.9573594.

Authors of the publication

Almaz R. Petrov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **31.08.2025 г.**

Отредактировано **12.09.2025 г.**

Принято **01.10.2025 г.**



МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗМЕЩЕНИЮ ЗАРЯДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В ГОРОДЕ

Казак П.Р., Павлюченко Д.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
kazak-p@inbox.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Рост парка электромобилей в России и мире опережает развитие зарядной инфраструктуры, что приводит к неравномерному размещению электрозарядных станций (ЭЗС) и снижает эффективность их эксплуатации. Необходима методика, учитывающая технические, градостроительные и поведенческие факторы. *ЦЕЛЬ.* Разработать и апробировать многофакторную модель оценки пригодности городской территории для размещения ЭЗС на основе метода анализа иерархий (МАИ), учитывающую результаты опросов экспертов и пользователей, а также корректирующие коэффициенты по типу городской зоны и плотности существующих станций. *МЕТОДЫ.* Сформирован перечень факторов на основе анкетирования двух целевых групп (эксперты в электроэнергетике и владельцы электромобилей). Проведено попарное сравнение факторов по девятибалльной шкале Т. Саати, рассчитаны весовые коэффициенты и проверена согласованность суждений. Разработана интегральная формула для расчета показателя пригодности участка с поправками на функциональную зону и насыщенность инфраструктурой. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Модель апробирована на пяти участках с различным функциональным зонированием в Новосибирске и Москве. Выявлены участки с высокой и низкой степенью пригодности, показана чувствительность модели к структуре факторов и поправочным коэффициентам. Подтверждена способность методики выявлять зоны с избыточной инфраструктурой и предотвращать дублирование. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предложенная модель может использоваться органами городского планирования, инвесторами и проектировщиками для обоснованного выбора мест установки ЭЗС, а также масштабироваться для других городов. Методика повышает эффективность инфраструктурного планирования и снижает риски нерационального использования ресурсов.

Ключевые слова: электрозарядная станция; электромобили; метод анализа иерархий; городская инфраструктура; моделирование; апробация модели.

Для цитирования: Казак П.Р., Павлюченко Д.А. Методологический подход к размещению зарядной инфраструктуры электромобилей в городе // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 85-98. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-85-98.

A METHODOLOGICAL APPROACH TO THE DEPLOYMENT OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE IN URBAN AREAS

Kazak P.R., Pavluchenko D.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
kazak-p@inbox.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The rapid growth of electric vehicle (EV) fleets worldwide and in Russia outpaces the deployment of charging infrastructure, causing uneven distribution of charging stations (EVCS) and reducing operational efficiency. A comprehensive methodology is required to account for technical, urban planning, and behavioral factors influencing EVCS siting decisions. *THE PURPOSE.* To develop and test a multifactor model for assessing the suitability of urban sites for EVCS deployment using the Analytic Hierarchy Process (AHP). The model integrates

expert and user survey results and applies correction coefficients for urban zone type and existing EVCS density. **METHODS.** A set of factors was identified from a survey of two target groups: power engineering experts and EV owners. Pairwise comparisons of factors were performed using T. Saaty's nine-point scale to determine weight coefficients, followed by a consistency check. The resulting weights were incorporated into an integral suitability formula adjusted for functional zoning and infrastructure saturation. The model was tested on five sites in Novosibirsk and Moscow with different functional zoning types (business, residential, transit, industrial, and high-density EVCS areas). **RESULTS.** The model identified sites with high and low suitability scores, demonstrating sensitivity to both factor structure and correction coefficients. High-scoring sites showed balanced factor contributions, while low-scoring sites revealed critical constraints such as low traffic, poor connectivity, or over-saturation with charging infrastructure. The model successfully detected zones with excessive infrastructure, thus preventing resource duplication. **CONCLUSIONS.** The proposed methodology provides a practical decision-support tool for urban planners, investors, and developers to optimize EVCS siting. It enables early-stage planning, reduces risks of inefficient investment, and is adaptable to other cities and contexts. The integration of technical, spatial, and behavioral parameters improves infrastructure efficiency and supports sustainable urban mobility strategies.

Keywords: electric charging station; electric vehicles; analytical hierarchy process; urban infrastructure; modeling; model testing.

For citation: Kazak P.R., Pavluchenko D.A. A methodological approach to the deployment of electric vehicle charging infrastructure in urban areas. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (6): 85-98. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-85-98.

Введение (Introduction)

Рост парка электромобилей является устойчивым мировым трендом, оказывающим существенное влияние на развитие транспортной и энергетической инфраструктуры. По данным Международного энергетического агентства, к 2023 году количество электромобилей в эксплуатации превысило 26 миллионов единиц, что в три раза больше показателя 2020 года [1]. В России, несмотря на сравнительно небольшой текущий парк, темпы прироста составляют 30-40% ежегодно, особенно в крупнейших городах и агломерациях, таких как Москва, Санкт-Петербург и Новосибирск [2].

Развитие зарядной инфраструктуры в стране отстает от темпов роста парка электромобилей, что приводит к точечному размещению электростанций (ЭЭС) без учета прогнозного спроса и технических возможностей электросетей. В ряде случаев это вызывает эксплуатационные проблемы: станции устанавливаются в местах с низким трафиком или в зонах дефицита мощности, что снижает рентабельность проектов и увеличивает риск перегрузки сети [3].

Актуальность комплексного подхода к выбору мест установки ЭЭС подтверждается исследованиями, в которых выявлены как технические ограничения (например, стохастическая нагрузка от зарядки электромобилей на распределительные сети [4]), так и организационно-экономические проблемы (развитие инфраструктуры в условиях ограниченного спроса и отсутствия комплексного планирования [8]). При этом работы по развитию зарядной сети в российских регионах показывают значительные различия в сценариях и эффективности решений в зависимости от структуры города и особенностей энергосистемы [9].

Зарубежный опыт демонстрирует, что эффективность интеграции электростанций в городскую среду напрямую зависит от использования многофакторных методик, учитывающих одновременно технические, пространственные и поведенческие параметры. В исследовании Karolemeas и др. [5] применен метод анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process, АНР) в сочетании с тематическим анализом для определения оптимальных локаций ЭЭС в Греции, что позволило учесть как экспертные оценки, так и мнение конечных пользователей. Работа Guler и Yomralioglu [6] показала, что объединение МАИ и нечеткого МАИ с геоинформационными системами (ГИС) обеспечивает более точное выявление приоритетных точек для размещения станций быстрой зарядки.

В отчете Международного совета по чистому транспорту (ICCT) [7] проведена количественная оценка дефицита зарядной инфраструктуры на ключевых рынках США с учетом прогнозов продаж электромобилей и динамики строительства ЭЭС. Результаты подчеркивают важность синхронизации темпов установки станций с ростом автопарка. В

исследовании Евдокимова и Пономарева [8] рассмотрены сценарии развития зарядной сети в российских регионах и показано, что недостаток системного планирования приводит к дисбалансу между плотностью сети и реальной потребностью.

В работе Солуянова и соавт. [9] предложена методика актуализации удельных электрических нагрузок для общественных помещений в жилых зданиях, что может быть использовано при расчете энергопотребления ЭЗС в городских условиях. Эти исследования формируют основу для разработки более комплексных и адаптированных к местным условиям методик.

Несмотря на наличие разработанных подходов, большинство существующих методик имеет ограничения, препятствующие их прямому применению в российских городах. Высокая плотность застройки и ограниченные возможности подключения к электросетям нередко исключают потенциально выгодные с точки зрения трафика локации [10]. Отсутствие обязательной интеграции ЭЗС в схемы территориального планирования и градостроительные регламенты создает условия для фрагментарного размещения инфраструктуры [11].

Важно подчеркнуть, что разработка методики размещения ЭЗС должна осуществляться в рамках действующих градостроительных регламентов и нормативных требований к планировке территории. Предлагаемый подход не предполагает утопических сценариев неограниченного насыщения городской территории станциями зарядки, а направлен на обеспечение баланса между потребностями владельцев электромобилей и ограничениями, связанными с функциональным зонированием, плотностью застройки и транспортной доступностью в соответствии с СП 42.13330.2016 «Градостроительство» и СНиП 2.07.01-89*.

Метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т. Саати [10, 11], зарекомендовал себя как эффективный инструмент многокритериального выбора в условиях ограниченности статистических данных и необходимости сопоставления разнородных факторов. Примеры его применения включают задачи планирования транспортной инфраструктуры [12, 13], оптимизации размещения объектов на основе комплексных критериев [14, 15], а также проектирования устойчивых транспортных систем [16]. В исследовании Камольцевой и Писарева [17] показана применимость подхода к определению параметров сети зарядных станций, однако отсутствует детализированная процедура интеграции факторов градостроительного, технического и поведенческого характера в единую модель.

Суммируя результаты анализа, можно сделать вывод, что для обеспечения рационального развития зарядной инфраструктуры необходим подход, позволяющий:

- учитывать одновременно технические, пространственные и поведенческие факторы;
- формализовать экспертные и пользовательские оценки;
- корректировать интегральную оценку пригодности участка с учетом функционального зонирования и текущей плотности ЭЗС.

Цель исследования заключается в разработке и апробации многофакторной модели оценки пригодности городской территории для размещения электрозарядных станций на основе метода анализа иерархий, включающей корректирующие коэффициенты по типу зоны и насыщенности инфраструктурой.

Научная значимость исследования состоит в формализации системы разнотипных факторов (технических, градостроительных, поведенческих) и обосновании их весов с применением МАИ, что обеспечивает объективность оценки и воспроизводимость результатов в условиях дефицита статистики.

Практическая значимость исследования заключается в создании прикладного инструмента для органов городского планирования, инвесторов и проектных организаций, позволяющего на раннем этапе обосновывать выбор мест установки ЭЗС, предотвращать дублирование инфраструктуры, минимизировать риски неэффективного распределения ресурсов и адаптировать методику под специфику различных городов.

Материалы и методы (Materials and methods)

Одной из ключевых проблем при выборе места размещения зарядной станции для электромобиля является необходимость учета множества факторов разной природы. Некоторые из них имеют физический или экономический характер (например, наличие подключения к сетям, стоимость земли), другие – поведенческий (например, удобство подъезда, социальное восприятие), третьи выражаются в форме экспертных суждений. Для сопоставления таких параметров в рамках единой модели необходим метод,

обеспечивающий нормализацию разнотипных факторов и расчет их относительной значимости.

В качестве основы для построения модели оценки пригодности участков использован метод анализа иерархий, предложенный Т. Саати [10]. Метод широко применяется в задачах многокритериального выбора, где требуется формализовать субъективные оценки, провести ранжирование факторов и определить их вклад в итоговый результат [12-16]. В отличие от математических методов с высокой зависимостью от входной статистики, МАИ устойчив к ограниченности исходных данных и позволяет использовать результаты анкетирования или экспертных опросов в структурированном виде.

Практика применения МАИ доказала его эффективность в энергетике [5], в логистике [6], при территориальном планировании [12] и при размещении объектов распределенной инфраструктуры, включая ЭЗС [13]. Метод позволяет не только определить веса факторов, но и провести проверку согласованности суждений, исключив случайные или логически несогласованные оценки.

В рамках настоящего исследования метод применяется следующим образом:

- формируется итоговый перечень факторов, объединяющий оценки двух целевых групп – экспертов в области электроэнергетики и владельцев электромобилей. Выборка построена по результатам анкетирования, включавшего открытые и закрытые вопросы. Все предложенные респондентами показатели были агрегированы, частотный анализ позволил исключить малозначимые и дублирующие параметры;
- проводится попарное сравнение факторов с применением девятибалльной шкалы Т. Саати. Экспертам предлагается оценить, насколько один фактор важнее другого с точки зрения влияния на выбор локации для ЭЗС;
- составляется матрица попарных сравнений, на основе которой рассчитываются весовые коэффициенты;
- производится расчет индекса согласованности (CI) и отношения согласованности (CR) с целью проверки логичности экспертных суждений. Если CR превышает 0,1, матрица подлежит уточнению или исключению.

На рисунке 1 представлена логика применения в контексте построения модели: от формирования системы факторов до использования весов в расчетах.



Рис. 1. Применение метода МАИ в модели оценки пригодности участка под установку ЭЗС Fig. 1. Application of the AHP method in the site suitability assessment model for EVCS deployment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Применение метода позволяет перейти от качественных описаний факторов к количественной оценке их влияния, что особенно важно в условиях отсутствия единой нормативной системы размещения ЭЗС [17]. Впоследствии рассчитанные веса используются в составе интегральной формулы пригодности участка, позволяя сравнивать между собой разные по структуре территории.

Разработка модели оценки пригодности участков под размещение электростанций требует четкого определения факторов, оказывающих влияние на выбор локации. Для формирования обоснованного перечня факторов было проведено анкетирование двух целевых групп:

- эксперты в области электроэнергетики и градостроительства, обладающие профессиональным опытом в проектировании, подключении и эксплуатации объектов инфраструктуры;
- владельцы электромобилей, как непосредственные потребители услуг ЭЗС в городской среде.

В исследовании приняли участие 49 респондентов: 12 экспертов в области электроэнергетики, проектирования и градостроительства, а также 37 владельцев электромобилей с практическим опытом эксплуатации ЭЗС. В рамках опроса респонденты указывали наиболее значимые, по их мнению, факторы, влияющие на выбор места размещения ЭЗС. Полученные формулировки были далее обработаны и агрегированы.

На рисунке 2 представлена сводная диаграмма частотности упоминаний факторов двумя целевыми группами.

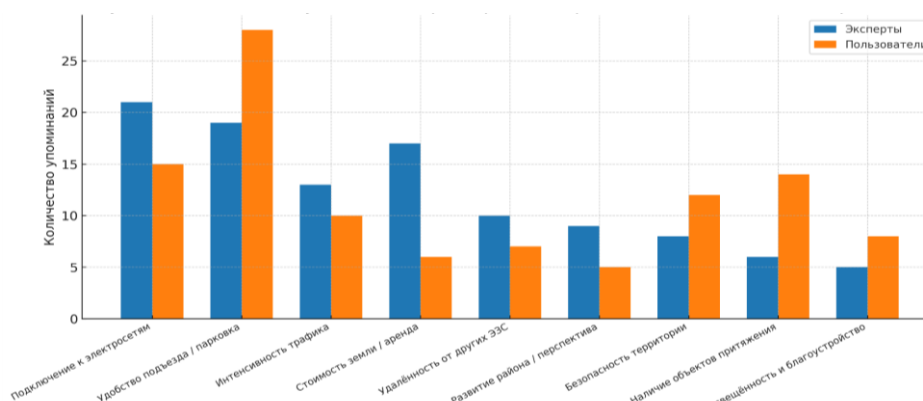


Рис. 2. Сравнение частотности факторов по данным опроса двух групп

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Применение МАИ для решения задач территориального планирования обосновывается его способностью структурировать сложные многокритериальные задачи и обеспечивать количественную оценку качественных факторов. Согласно рекомендациям Т. Саати, для получения достоверных результатов в рамках МАИ достаточно привлечение 8-12 экспертов при условии обеспечения согласованности экспертных оценок ($CR < 0,15$) [10]. В настоящем исследовании обеспечение репрезентативности экспертной группы достигается за счет диверсификации состава участников: наряду с профильными экспертами (инженеры-энергетики, проектировщики, специалисты градостроительной сферы) в опросе участвовали владельцы электромобилей как представители целевой группы пользователей инфраструктуры.

В таблице 1 представлены частотные данные по упоминаемости факторов, предложенных респондентами в ходе опроса. Один участник мог указать несколько факторов, поэтому общее число упоминаний превышает число опрошенных. Отдельно учтены мнения экспертов и владельцев электромобилей, что позволяет выявить различия в приоритетах целевых групп.

Таблица 1

Table 1

Сравнение факторов, предложенных экспертами и владельцами электромобилей
Comparison of factors proposed by experts and electric vehicle owners

Формулировка респондента	Частота упоминаний (эксперты)	Частота упоминаний (владельцы)	Комментарий
Удобство подъезда / парковка	19	28	Особенно значим у владельцев электромобилей
Подключение к электросетям	21	15	Особенно значим у экспертов
Интенсивность трафика	13	10	Близкий по значимости в обеих группах
Удаленность от других ЭЭС	10	7	Уточняет насыщенность сети
Стоимость земли / аренда	17	6	Экономический барьер реализации
Перспективы развития района / перспектива	9	5	Связан с потенциалом локации
Безопасность территории	8	12	Важнее для пользователей
Наличие объектов притяжения	6	14	Явный пользовательский приоритет
Освещенность и благоустройство	5	8	Поведенческий и комфортный фактор

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Данные опроса подтвердили, что ключевые ожидания экспертов связаны с технической реализуемостью и стоимостными ограничениями, тогда как пользователи чаще упоминают доступность, безопасность и удобство повседневного использования [12].

Несмотря на различия в формулировках, значительная часть факторов пересекается по смыслу, что позволило перейти к их укрупненной группировке.

Для обеспечения компактности и применимости модели все исходные формулировки были агрегированы по тематике. В процессе объединения учитывались:

- семантическая близость (например, «наличие парковки» и «удобство подъезда»);
- логическая совместимость (например, «близость к другим ЭЭС» и «насыщенность района инфраструктурой»);
- нормативная интерпретируемость (возможность формализованной оценки).

В результате агрегирования сформированы шесть укрупненных факторов, охватывающих все ключевые направления:

1. интенсивность трафика – отражает потенциальный спрос, доступность и проходимость участка;
2. наличие свободных площадей и парковки – объединяет доступность территории и возможность размещения оборудования;
3. возможность подключения к электросетям – охватывает как физическое, так и техническое подключение;
4. стоимость земельного участка – включает арендную ставку, кадастровую или рыночную стоимость;
5. расстояние до ближайшей зарядной станции – регулирует плотность сети и предотвращает дублирование;
6. перспективы развития района – учитывает градостроительные планы, застройку, рост населения.

Эти шесть факторов легли в основу дальнейшего расчета весов методом анализа иерархий и последующего построения модели оценки пригодности участка [5, 6, 17].

Для сопоставления факторов, вошедших в модель, и определения их относительной значимости использован метод анализа иерархий, разработанный Т. Саати [10]. Метод позволяет формализовать экспертные суждения путем попарного сравнения факторов, переведенных в числовую шкалу предпочтений. Это особенно актуально при наличии разнотипных факторов – как количественных, так и качественных – с невозможностью их непосредственного сопоставления по абсолютной шкале.

В соответствии с классической процедурой МАИ, экспертам была предложена матрица, в которой каждый фактор сравнивался с каждым по степени важности относительно цели – определения пригодности участка под размещение ЭЭС. Сравнение проводилось по девятибалльной шкале Саати: от 1 (равнозначны) до 9 (один фактор крайне значительно важнее другого). Для повышения надежности результатов использовалась средняя агрегированная матрица.

На основе собранной матрицы был рассчитан вектор весов факторов по методу среднегеометрических значений. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Расчет весов факторов метод МАИ
Calculation of factor weights using the AHP method

№	Фактор	Весовой коэффициент
1	Интенсивность трафика	0,2348
2	Перспективы развития района	0,1920
3	Наличие свободных площадей и парковки	0,1527
4	Расстояние до ближайшей ЭЭС	0,1476
5	Возможность подключения к электросетям	0,1454
6	Стоимость земельного участка	0,1275

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для оценки согласованности суждений был рассчитан индекс согласованности CI и отношение согласованности CR. Значение CR составило 0,124, что ниже допустимого порога 0,15, рекомендованного Т. Саати. Это подтверждает внутреннюю логичность экспертных оценок и обоснованность полученного ранжирования.

Полученные весовые коэффициенты были использованы в интегральной модели оценки пригодности участка, позволяя осуществлять сравнительный анализ различных территорий с учетом различной природы факторов. Рисунок 3 наглядно демонстрирует приоритетность факторов по результатам метода МАИ: наибольший вклад приходится на интенсивность трафика и перспективы развития района.

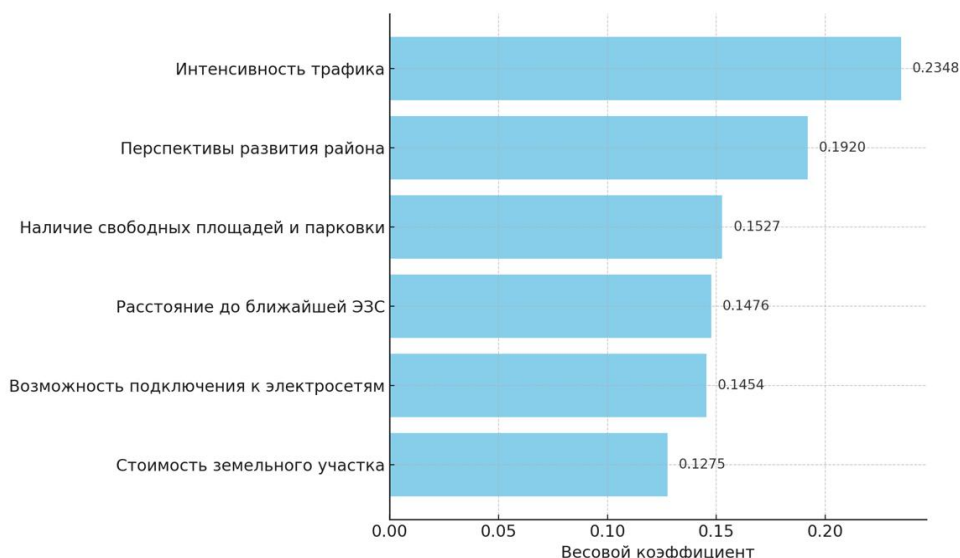


Рис. 3. Диаграмма приоритетов факторов, *Fig. 3. Priority diagram of factors obtained using the AHP method*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Полученные весовые коэффициенты позволяют перейти к построению количественной модели, предназначенной для сравнительной оценки различных участков городской территории с точки зрения их пригодности под размещение электрозарядной станции.

Модель основана на интегральной формуле (1), в которую входят нормированные значения по каждому из шести факторов, умноженные на соответствующие весовые коэффициенты. Расчетная формула имеет вид:

$$S = K_1 \cdot K_2 \cdot \sum_{i=1}^6 \omega_i \cdot x_i, \quad (1)$$

где:

S – интегральная оценка пригодности участка под установку ЭЭС,

ω_i – весовой коэффициент i -го фактора, полученный методом анализа иерархий,

x_i – балльная оценка показателя по дискретной шкале от 1 до 9, отражающая уровень соответствия участка данному фактору,

K_1 – поправочный коэффициент, учитывающий функциональный тип городской зоны:

- $K_1 = 1,00$ – жилая зона (базовый уровень),
- $K_1 = 0,95$ – смешанная зона,
- $K_1 = 0,85$ – деловая зона,
- $K_1 = 0,75$ – транзитная зона,
- $K_1 = 0,70$ – промышленная зона.

K_2 – поправочный коэффициент, отражающий уровень насыщенности района существующими ЭЭС.

- $K_2 = 1,00$, если в радиусе 200 м присутствуют ЭЭС,
- $K_2 = 1,05$, если ЭЭС поблизости отсутствуют.

Корректировка по типу зоны (K_1) вводится для учета сценариев эксплуатации: она отражает не только формальное зонирование, но и поведенческую вероятность возникновения потребности в зарядке [12]. Например, в жилых зонах наблюдаются устойчивые ночные сценарии зарядки, а в деловых и транзитных – короткие стоянки, менее подходящие для полной зарядки, особенно при медленных ЭЭС.

Поправка по плотности (K_2) позволяет снижать итоговую оценку в районах, где уже присутствует достаточное число зарядных точек, чтобы избежать дублирования и неэффективного распределения [17].

Таким образом, итоговое значение S позволяет ранжировать участки по степени их пригодности с учетом как внутренних характеристик, так и пространственного контекста.

Для проверки работоспособности модели проведена апробация на четырех реальных участках в г. Новосибирск и одном в г. Москва. Участки подбирались таким образом, чтобы отразить основные типы функционального зонирования, встречающиеся в городской среде: деловая, жилая, транзитная, условно нейтральная зона, а также зона с высокой плотностью существующих ЭЭС. Это обеспечило репрезентативность и позволило проверить чувствительность модели к различным условиям.

Оценка производилась по шести факторам, описанным ранее, с применением весов, рассчитанных методом анализа иерархий. Нормированные значения факторов получены по данным открытых картографических источников 2ГИС и OpenStreetMap, градостроительной документации, а также данным сетевых компаний и публичных кадастровых карт. Поправочные коэффициенты были определены на основе классификации городских зон [5, 6, 13, 17].

- участок А – ул. Гоголя, 13, на территории торгово-развлекательного центра «Галерея Новосибирск». Район характеризуется высоким уровнем транспортной активности, насыщенной пешеходной и коммерческой инфраструктурой, а также возможностью подключения к городской ТП. Преобладает кратковременное пребывание пользователей, что делает приоритетной быструю зарядку;

- участок Б – ул. Дуси Ковальчук, 248, территория жилого комплекса «Созвездие». Зона плотной жилой застройки, высокая стоимость земли, ограниченные свободные площади. Преобладает ночное или длительное пребывание транспортных средств. ЭЗС здесь ориентированы на продолжительную зарядку с минимальным трафиком;

- участок В – Бердское шоссе, 277, у юго-западного въезда в город. Вблизи расположены автозаправочная станция, придорожные кафе, парковочные площадки. Характеризуется высоким транзитным потоком и низкой плотностью существующих ЭЗС. Имеет потенциал для установки станции экспресс-зарядки;

- участок Г – ул. Сухарная, 96/1, промышленная территория с элементами деловой застройки. Умеренный уровень трафика, высокая обеспеченность энергомощностями, наличие свободных площадей. Используется как нейтральная контрольная точка сравнения в структуре модели;

- участок Д – в г. Москва, в районе станции метро «Фрунзенская». В радиусе 400 метров зафиксировано не менее шести действующих зарядных станций различных операторов, включая точки на ул. Савельева, ул. Ефремова, ул. Усачева и др. Район характеризуется высокой транспортной доступностью, плотной деловой застройкой и устойчивым пешеходным трафиком.

Для каждого участка определялись значения по шести факторам. Также были учтены поправочные коэффициенты K_1 и K_2 . Расчеты представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Table 3

Результаты апробации модели для участков А – Г

Results of the model pilot for sites A – G

Участок	Функциональная зона	Наличие ЭЗС	S	Комментарий
А (ул. Гоголя, 13)	Деловая	Да	5,73	Центр города, высокая инфраструктурная насыщенность
Б (ул. Дуси Ковальчук, 248)	Жилая	Да	7,35	Высокая плотность, отсутствие ЭЗС поблизости, развитая среда
В (Бердское шоссе, 277)	Транзитная	Да	5,5	Сложные условия подключения
Г (ул. Сухарная, 96/1)	Промышленная	Нет	2,96	Удаленность, отсутствие перспектив, низкий трафик

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 4

Table 4

Результаты апробации модели для участка Д

Results of the model pilot for site D

№	ЭЗС	K_1	K_2	S
1	Electro.cars (ул. Савельева, 5)	1,00	1,00	5,05
2	Electro.cars (ул. 3-я Фрунзенская, 9)	1,00	1,00	4,65
3	Энергия Москвы (ул. Ефремова, 10)	0,85	1,00	5,07
4	Green Drive (ул. Усачева, 26)	1,00	1,00	5,32
5	Заряди авто (ул. Большая Пироговская, 27)	0,85	1,00	3,95

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 4 показаны итоговые оценки пригодности участков А – Г, полученные на основе модели. Видно, что участки с разной функциональной принадлежностью демонстрируют заметную разницу в значениях интегрального показателя S.

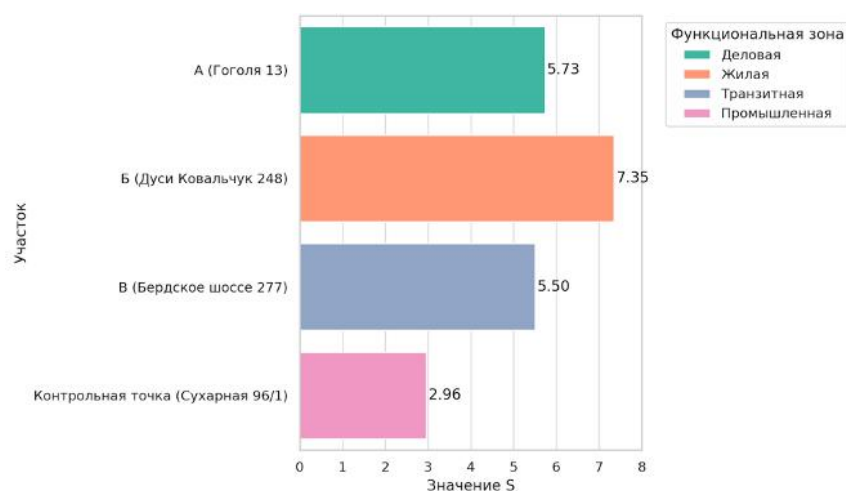


Рис. 4. Сравнительная диаграмма итоговых оценок пригодности участков в Новосибирске
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рисунок 5 иллюстрирует структуру вкладов каждого из шести факторов в итоговую оценку. Диаграмма показывает, за счет каких характеристик формируется высокий или низкий балл у того или иного участка.

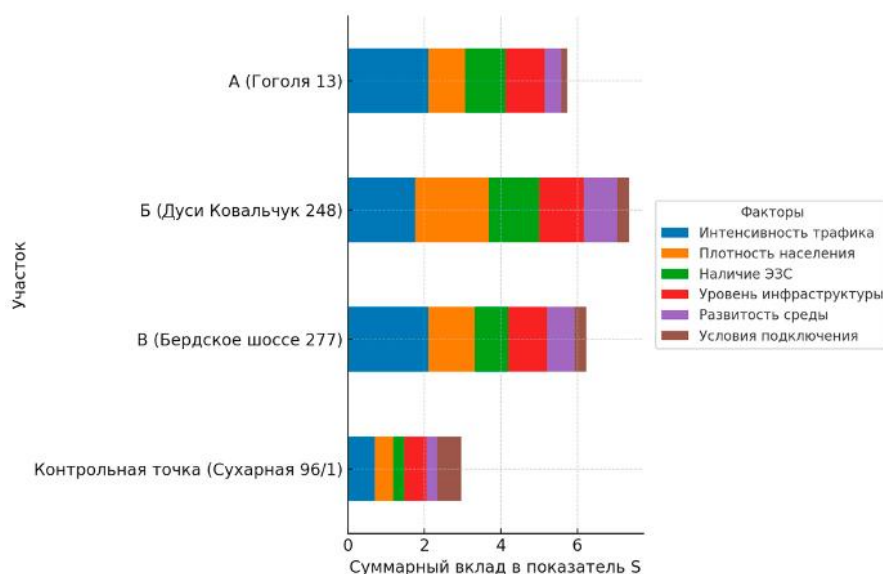


Рис. 5. Структура вкладов факторов в значение интегральной оценки S
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ диаграммы позволяет выявить несколько типовых сценариев. На участках с высокой интегральной оценкой, таких как Б (7,35 балла), наблюдается сбалансированный вклад всех факторов без выраженных провалов. Это указывает на комплексную пригодность территории и подтверждает соответствие модели многофакторному подходу. Напротив, на участках с низкой оценкой (например, участок Г – 2,96 балла) явно проявляются критические ограничения по ряду ключевых параметров – трафику, перспективам развития, условиям подключения, – что системно снижает общую оценку, несмотря на формальную доступность площадки.

Характерную структуру демонстрируют участки А и В. В деловой зоне (участок А) зафиксированы высокие значения по трафику, электросетевой доступности и уровню развития, однако итоговая оценка снижается под влиянием высокой стоимости земли и корректирующего коэффициента зоны ($K_1 = 0,85$). Участок В, напротив, опирается на факторы доступности и слабую насыщенность района ЭЭС, но ограничен по условиям подключения, что отражается в узкой полосе соответствующего вклада на диаграмме.

Таким образом, визуальная расшифровка структуры оценки по факторам позволяет уточнить интерпретацию модели и повысить информативность результатов.

Представленный инструмент может быть использован для ранней диагностики проблемных характеристик участков и целевой корректировки проектных решений.

Результаты апробации демонстрируют высокую чувствительность модели к изменению входных данных и корректирующих коэффициентов. Участки А и В получили одинаковые интегральные оценки, но при разных структурных причинах: для А приоритетом стало электросетевое подключение и трафик, для В – наличие площадей и низкая плотность сети. По участку Д видно, что при близких значениях по основным факторам итоговая оценка существенно снижается в участках с перенасыщенной инфраструктурой, чем подтверждается эффективность введения поправки на плотность.

Наивысшее значение интегральной оценки по участку Д зафиксировано у станции Green Drive (ул. Усачева, 26), что обусловлено развитой уличной инфраструктурой и устойчивым пользовательским трафиком. Станции на ул. Савельева и у «Энергии Москвы» также продемонстрировали высокую пригодность к эксплуатации. Вместе с тем, объекты на ул. 3-я Фрунзенская и ул. Большая Пироговская получили граничные либо пониженные значения, что отражает чувствительность модели к плотности размещения и ограничениям городской среды (рис. 6).

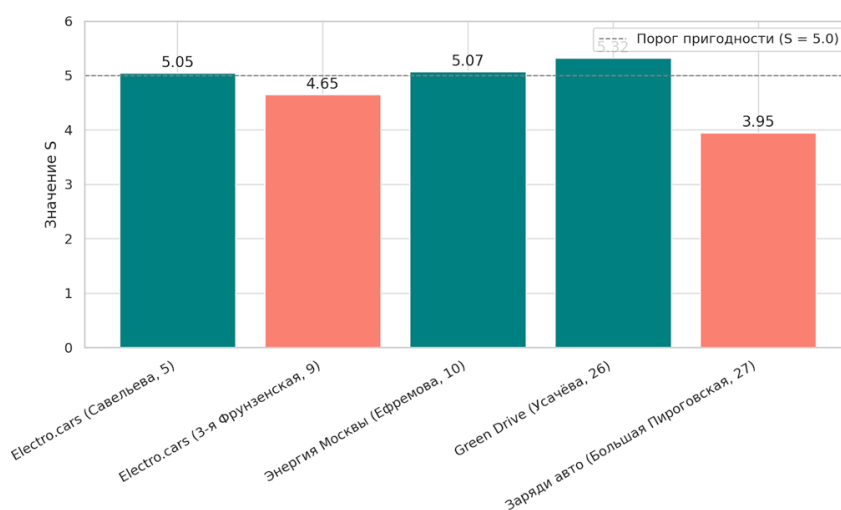


Рис. 6. Сравнительная столбчатая диаграмма значений S по каждой станции в г. Москва

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для обобщенного визуального сравнения участков А – Г по всем нормированным факторам построена паучья диаграмма (рис. 7). Она позволяет оценить, какие сильные и слабые стороны имеются у каждого участка по ключевым параметрам модели.

Проведенное исследование подтверждает, что разработанный подход позволяет не только выявлять приоритетные направления для нового строительства, но и эффективно использовать его в целях аудита действующих объектов. Это особенно актуально для зон, где возможна избыточность инфраструктуры или функциональное дублирование.

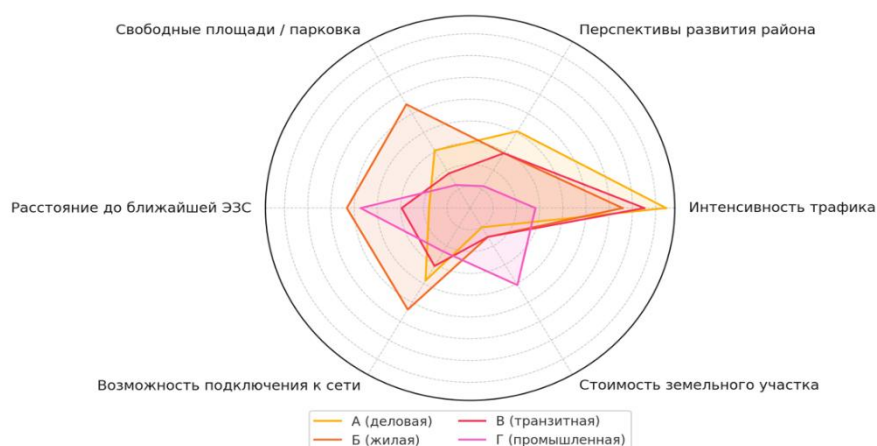


Рис. 7. Сравнение профилей нормированных факторов по всем участкам

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, апробация показала, что модель адекватно отражает как физическую реализуемость установки ЭЗС, так и ее целесообразность с точки зрения распределения инфраструктуры.

В соответствии с разработанной моделью и характеристиками функциональных зон была сформирована рекомендуемая структура распределения типов зарядной инфраструктуры (рис. 8). Эта структура отражает оптимальные пропорции между быстрой и медленной зарядкой с учетом сценариев использования и специфики городской среды.

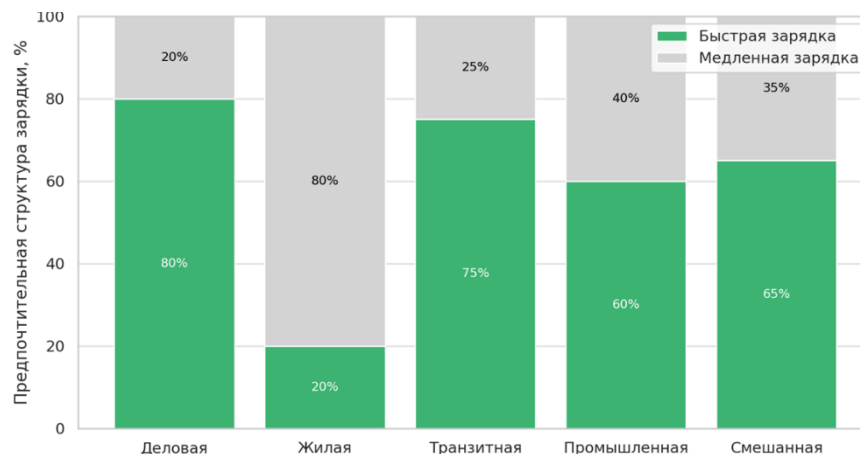


Рис. 8. Рекомендуемая структура типов зарядки по функциональным зонам Fig. 8. Recommended structure of charging types by functional zones

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Предложенная структура позволяет учитывать не только тип функциональной зоны, но и поведенческие сценарии пользователей, обеспечивая адаптацию инфраструктурных решений к различным условиям городской эксплуатации.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Результаты апробации модели подтвердили ее чувствительность к различным условиям городской среды и способность отражать как технические, так и поведенческие аспекты размещения ЭЗС [12]. Модель продемонстрировала высокую дифференцирующую способность: итоговые оценки участков существенно варьировались даже при близких значениях отдельных факторов, что указывает на корректную работу весов и влияние поправочных коэффициентов.

Особо показательной стала низкая оценка участка Д, несмотря на его высокие показатели по физической доступности и инфраструктурному обеспечению. Это обусловлено поправкой на насыщенность территории существующими зарядными станциями, что позволило модели зафиксировать эффект перенасыщения и избежать рекомендации неэффективного дублирования [8, 13].

Участки А и В, относящиеся к деловой и транзитной зонам, получили высокие оценки, несмотря на различную структуру факторов. В случае участка А приоритет обеспечили высокая интенсивность трафика и доступ к энергомощностям, тогда как участок В продемонстрировал хорошую обеспеченность площадями и низкую плотность ЭЗС. Это демонстрирует, что модель не жестко привязана к одному типу условий, а работает как сбалансированный инструмент сопоставления.

Дополнительным преимуществом модели является ее масштабируемость: она может быть адаптирована под другие города или регионы при наличии базовых входных данных [5, 6, 13]. Методика позволяет включать дополнительные факторы, если они обоснованы нормативно или подтверждены пользователями, а также варьировать поправочные коэффициенты в зависимости от градостроительных приоритетов.

Важно подчеркнуть, что применение МАИ в основе модели позволило:

- количественно сопоставить факторы различной природы [10, 11];
- учесть экспертные оценки в условиях дефицита статистических данных;
- получить согласованную и воспроизводимую структуру весов.

Как следует из рисунка 8, приоритет в установке быстрой зарядки отдан деловым и транзитным зонам. В этих зонах наблюдается высокая оборачиваемость автотранспорта и преобладают кратковременные остановки, что делает минимизацию времени зарядки критически важной. Высокая плотность трафика и интенсивное использование инфраструктуры усиливают значимость быстрой зарядки как базового решения.

В жилых районах, напротив, преобладают сценарии длительного пребывания, особенно в вечернее и ночное время. Здесь целесообразно преимущественное развитие медленной зарядной инфраструктуры, что позволяет оптимизировать сетевую нагрузку и снизить капитальные затраты.

Для промышленных и смешанных территорий предлагается сбалансированное соотношение типов зарядки, с умеренным преобладанием быстрой. Это решение учитывает логистическую специфику, рабочую активность и присутствие транзитных потоков.

Таким образом, предложенная модель может быть использована в качестве инструмента предпроектной оценки и стратегического планирования развития зарядной инфраструктуры в городской среде.

Заключение (Conclusions)

В рамках настоящего исследования разработана и апробирована многофакторная модель оценки пригодности участков городской территории под размещение электрозарядных станций. Модель основана на методе анализа иерархий, что позволило формализовать экспертные и пользовательские представления о значимости факторов и учесть разнотипные параметры городской среды.

На основании анкетирования двух целевых групп – специалистов в области электроэнергетики и владельцев электромобилей – сформирован набор факторов, прошедших этап тематической агрегации и нормализации. Конечный состав модели включает шесть укрупненных факторов: интенсивность трафика, наличие площадей и парковки, возможность подключения к электросетям, стоимость участка, расстояние до ближайшей ЭЗС и перспективы развития района.

Модель позволяет рассчитывать интегральный показатель пригодности с учетом поправок по функциональному типу зоны и плотности существующих ЭЗС. Проведенная апробация на пяти участках в городе Новосибирске продемонстрировала чувствительность модели к изменению параметров, а также ее применимость в условиях ограниченной статистической базы.

Предложенная методика может быть использована органами городского планирования, проектными организациями и частными инвесторами как инструмент обоснованного выбора местоположения ЭЗС на ранних стадиях проектирования.

Литература

1. Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions. Paris: International Energy Agency, 2023. 176 с. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023> (дата обращения: 01.06.2025).
2. Национальная технологическая инициатива «Автонет». Электромобили в России: аналитический обзор. М.: Аналитический центр при Правительстве РФ, 2022. 48 с.
3. Ремизова Т. В. Развитие зарядной инфраструктуры в России: стимулы и перспективы применения технологии Vehicle-to-grid // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2023. № 3 (426). С. 49–65.
4. Антонова Е. И., Морозов Д. В., Акишев И. В. Анализ влияния стохастической нагрузки электромобилей на распределительную сеть // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. № 6. С. 45–51.
5. Karolemeas C., Tsigdinos S., Tzouras P. G., Nikitas A., Bakogiannis E. Determining Electric Vehicle Charging Station Location Suitability: A Qualitative Study of Greek Stakeholders Employing Thematic Analysis and Analytical Hierarchy Process // Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 4. Article 2298. DOI: 10.3390/su13042298.
6. Guler D., Yomralioglu T. Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS // Annals of GIS. 2020. Vol. 26, No. 2. P. 169–189. DOI: 10.1080/19475683.2020.1737226.
7. ICCT. Quantifying the electric vehicle charging infrastructure gap across U.S. markets. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2019. 32 p. URL: <https://theicct.org/publication/quantifying-the-electric-vehicle-charging-infrastructure-gap-across-u-s-markets/> (дата обращения: 01.06.2025).
8. Евдокимов Д. Ю., Пономарев Ю. Ю. Развитие электрозаправочной инфраструктуры в регионах России: сценарный анализ // Экономическое развитие России. 2022. Т. 29, № 11. С. 59–76.
9. Солуянов Ю. И., Ахметшин А. Р., Солуянов В. И. Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 47–57. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-47-57.
10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.

11. Golden B. L., Wasil E. A., Harker P. T. The Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies. New York: Springer, 1989. 302 p.
12. Karatzas S., Farmakis P., Chassiakos A., Farmakis T., Christoforou Z., Liappi G. Development of a multi-criteria model for assisting EV user charging decisions // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2023. Vol. 11, Issue 1. Article 1100439.
13. Liu J., Wang X., Wang Y. Location Optimization of EV Charging Stations Based on AHP and GIS: A Case Study in Beijing // Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 21. Article 8977. DOI: 10.3390/su12218977.
14. Al Harbi K. M. A. Application of the AHP in project management // International Journal of Project Management. 2001. Vol. 19, No. 1. P. 19–27. DOI: 10.1016/S0263-7863(99)00038-1.
15. Partovi F. Y. Determining what to benchmark: An analytic hierarchy approach // International Journal of Operations & Production Management. 1994. Vol. 14, No. 6. P. 25–39. DOI: 10.1108/01443579410062042.
16. Bottero M., Ferretti V. An analytic network process for the sustainable design of a transport system // European Journal of Operational Research. 2011. Vol. 215, No. 3. P. 648–657. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.06.006.
17. Камольцева А. В., Писарев Г. А. Подход к определению параметров сети зарядных станций для электромобилей // Транспорт на альтернативном топливе. 2020. № 5 (77). С. 62–69.

Авторы публикации

Казак Павел Романович – аспирант Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия. *kazak-p@inbox.ru*

Павлюченко Дмитрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия.

References

1. Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions. Paris: International Energy Agency; 2023. 176 p. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023> (accessed 1 June 2025).
2. Natsional'naya tekhnologicheskaya initsiativa "Avtonet". Elektromobili v Rossii: analiticheskii obzor [Electric vehicles in Russia: analytical review]. Moscow: Analiticheskii tsentr pri Pravitel'stve RF; 2022. 48 p. (In Russ).
3. Remizova TV. Razvitie zaryadnoi infrastruktury v Rossii: stimuly i perspektivy primeneniya tekhnologii Vehicle-to-grid [Development of charging infrastructure in Russia: incentives and prospects for applying Vehicle-to-grid]. Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost' [National Interests: Priorities and Security]. 2023;3(426):49–65. (In Russ).
4. Antonova EI, Morozov DV, Akishev IV. Analiz vliyaniya stokhasticheskoi nagruzki elektromobiley na raspredelitel'nyuyu set' [Analysis of the impact of stochastic electric-vehicle load on the distribution network]. Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electric Power. Transmission and Distribution]. 2022;6:45–51. (In Russ).
5. Karolemeas C, Tsigdinos S, Tzouras PG, Nikitas A, Bakogiannis E. Determining Electric Vehicle Charging Station Location Suitability: A Qualitative Study of Greek Stakeholders Employing Thematic Analysis and Analytical Hierarchy Process. Sustainability. 2021;13(4):2298. doi:10.3390/su13042298.
6. Guler D, Yomralioglu T. Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS. Annals of GIS. 2020;26(2):169–189. doi:10.1080/19475683.2020.1737226.
7. International Council on Clean Transportation (ICCT). Quantifying the electric vehicle charging infrastructure gap across U.S. markets. Washington, DC: ICCT; 2019. 32 p. Available at: <https://theicct.org/publication/quantifying-the-electric-vehicle-charging-infrastructure-gap-across-u-s-markets/> (accessed 1 June 2025).
8. Evdokimov DYU, Ponomarev YuYu. Razvitie elektrozapravochnoy infrastruktury v regionakh Rossii: stsennyy analiz [Development of electric refueling infrastructure in Russian regions: scenario analysis]. Ekonomicheskoe razvitie Rossii [Economic Development of Russia]. 2022;29(11):59–76. (In Russ).
9. Soluyanov YuI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI. Aktualizatsiya udel'nykh elektricheskikh nagрузок pomeshchenii obshchestvennogo naznacheniya, vstroennykh v zhilye zdaniya [Updating specific electrical loads of public premises embedded in residential buildings]. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2021;23(3):47–57. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-47-57. (In Russ).

10. Saaty TL. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill; 1980. 287 p.
11. Golden BL, Wasil EA, Harker PT. The Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies. New York: Springer; 1989. 302 p.
12. Karatzas S, Farmakis P, Chassiakos A, Farmakis T, Christoforou Z, Liappi G. Development of a multi-criteria model for assisting EV user charging decisions. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2023;11(1):1100439.
13. Liu J, Wang X, Wang Y. Location Optimization of EV Charging Stations Based on AHP and GIS: A Case Study in Beijing. Sustainability. 2020;12(21):8977. doi:10.3390/su12218977.
14. Al Harbi KMA. Application of the AHP in project management. International Journal of Project Management. 2001;19(1):19–27. doi:10.1016/S0263-7863(99)00038-1.
15. Partovi FY. Determining what to benchmark: An analytic hierarchy approach. International Journal of Operations & Production Management. 1994;14(6):25–39. doi:10.1108/01443579410062042.
16. Bottero M, Ferretti V. An analytic network process for the sustainable design of a transport system. European Journal of Operational Research. 2011;215(3):648–657. doi:10.1016/j.ejor.2011.06.006.
17. Kamoltseva AV, Pisarev GA. Podkhod k opredeleniyu parametrov seti zaryadnykh stantsii dlya elektromobilei [Approach to determining parameters of a charging-station network for electric vehicles]. Transport na al'ternativnom toplive [Transport on Alternative Fuel]. 2020;5(77):62–69. (In Russ).

Authors of the publication

Pavel R. Kazak – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *kazak-p@inbox.ru*

Dmitry A. Pavlyuchenko – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено	15.08.2025 г.
Отредактировано	22.10.2025 г.
Принято	26.10.2025 г.



МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ: АЛГОРИТМ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Борисов Д.А., Максимов В.В., Воркунов О.В., Куракина О.Е.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
borisovdanil49@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в оперативном прогнозировании электрических нагрузок как для технических, так и для экономических аспектов работы энергосистемы. Своевременный анализ предстоящих нагрузок позволяет определить наиболее эффективный режим функционирования системы, что напрямую влияет на показатели всего электротехнического комплекса при работе на энергетическом рынке. ЦЕЛЬ. Повысить точность прогнозирования потребления электроэнергии в электротехническом комплексе сетевой компании, обеспечивающий меньшую погрешность по сравнению с действующими методами. МЕТОДЫ. Для достижения цели был применён итерационный метод: в среде Microsoft Excel организован последовательный перебор и проверка существующих способов прогнозирования. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработана методология прогнозирования энергопотребления электрохозяйством энергетической организации. Предельная ошибка предложенной методологии составила всего 2,53%. Был разработан пошаговый алгоритм вычисления планируемого объема электропотребления клиентами, обеспечивающий последовательное выполнение операций для формирования комплексного прогноза. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Важным элементом работы стал алгоритм расчета предполагаемого объема потребления электроэнергии абонентами. Данный алгоритм представляет собой детально проработанную последовательность действий, необходимых для реализации комбинированного метода прогнозирования, а также обеспечивает системный подход к оценке будущего потребления электроэнергии, достигая высокой степени детализации, что позволяет осуществлять расчеты без использования специализированного программного обеспечения, применяя только базовые инженерные методы вычислений.

Ключевые слова: прогноз потребления электроэнергии; статистический анализ; относительная погрешность; экспоненциальное сглаживание; комбинированный подход.

Для цитирования: Борисов Д.А., Максимов В.В., Воркунов О.В., Куракина О.Е. Методика прогнозирования нагрузки в электроэнергетических системах: алгоритм эффективного управления // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 99-111. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-99-111.

THE METHODOLOGY OF LOAD FORECASTING IN ELECTRIC POWER SYSTEMS: EFFECTIVE MANAGEMENT ALGORITHM

Borisov D.A., Maximov V.V., Vorkunov O.V., Kurakina O.E.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
borisovdanil49@gmail.com

Abstract: RELEVANCE. The research consists in the operational forecasting of electrical loads for both technical and economic aspects of the operation of the power system. Timely analysis of the upcoming loads allows us to determine the most efficient system operation mode, which directly affects the performance of the entire electrical complex when operating in the energy market. THE PURPOSE. To increase the accuracy of forecasting electricity consumption in the electrical complex of the grid company, providing a lower margin of error compared to current methods. METHODS. To achieve this goal, an iterative method was applied: in the Microsoft Excel environment, a sequential search and verification of existing forecasting methods was organized. RESULTS. A methodology for forecasting energy consumption by an electric utility

of an energy organization has been developed. The marginal error of the proposed methodology was only 2.53%. A step-by-step algorithm for calculating the planned amount of electricity consumption by customers has been developed, ensuring consistent execution of operations to generate a comprehensive forecast. **CONCLUSION.** An important element of the work was the algorithm for calculating the estimated volume of electricity consumption by subscribers. This algorithm is a detailed sequence of actions necessary to implement a combined forecasting method, and also provides a systematic approach to estimating future electricity consumption, achieving a high degree of detail, which allows calculations to be performed without using specialized software, using only basic engineering calculation methods.

Keywords: electricity consumption forecast; statistical analysis; relative error; exponential smoothing; combined approach.

For citation: Borisov D.A., Maximov V.V., Vorkunov O.V., Kurakina O.E. The methodology of load forecasting in electric power systems: effective management algorithm. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (6): 99-111. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-99-111.

Введение (Introduction)

Работа электроэнергетики критически важна для всех отраслей экономики России и существенно влияет на формирование основных государственных финансово-экономических показателей. Наличие значительных запасов топливно-энергетических ресурсов, компетентных специалистов и развитой научной базы составляет ценнейшее достояние нации. Грамотное распоряжение этим потенциалом способствует экономическому росту и повышению благосостояния граждан.

Анализ динамики производства электроэнергии демонстрирует положительную тенденцию развития отрасли. Если сравнивать показатели 2020 года с данными 2010 года, то наблюдается рост выработки более чем на 20% (до 1087,8 млрд. кВт-ч) [1]. Прогнозируемый рост к 2030 году предполагает увеличение этого показателя до 1740 млрд. кВт-ч. Параллельно с наращиванием производства активно реализуются комплексные программы энергосбережения [2, 3].

В современных условиях функционирования российского электроэнергетического рынка наблюдается тенденция к ужесточению требований к объемам закупаемой и реализуемой электроэнергии. В связи с этим особое значение приобретает прогнозирование электропотребления, которое является основополагающим элементом финансового планирования всех участников рынка. Процесс прогнозирования электропотребления характеризуется высокой сложностью из-за необходимости учета множества взаимосвязанных факторов, определяющих динамику энергопотребления, а точность прогноза напрямую влияет на эффективность функционирования электроэнергетической системы и экономическую результативность предприятий.

Для компаний электроэнергетического сектора первостепенной задачей является точное определение нагрузки, оказываемой на электросети и генерирующее оборудование. Данный показатель формируется под воздействием ряда факторов, включая метеорологические условия, географическое расположение, сезонность и время суток [4].

В электроэнергетике критически важно максимально эффективно использовать имеющиеся данные для составления точных прогнозов энергопотребления, поскольку это позволяет минимизировать риски при принятии управленческих решений [5].

Динамика общего энергопотребления региона формируется под влиянием двух основных компонентов: изменений в промышленном секторе и колебаний потребления в секторе бытовых потребителей. Все эти колебания становятся предметом ответственности сбытовых организаций, которые обязаны обеспечить полное удовлетворение потребностей в электроэнергии всех категорий потребителей [6]. При этом необходимо учитывать, что любое изменение в потреблении может существенно повлиять на энергобаланс всего региона [7].

Прогнозирование уровня потребления электрической энергии является многоэтапным процессом, включающим ряд последовательно выполняемых шагов. Первый шаг заключается в предварительной обработке данных, где детально изучается вся доступная информация с помощью статистических данных, в том числе основанных на визуальном анализе. Это помогает определить ключевые тенденции и специфику изменения потребления электроэнергии потребителями. Затем выполняется анализ, привязанный ко

времени выполнения для выявления сезонных факторов, тенденций и цикличности изменений в потреблении. Данный этап способствует лучшему пониманию механизмов, лежащих в основе колебания спроса на электроэнергию. Следующим шагом становится разработка модели прогнозирования, включающая подбор наиболее адекватных методик и создание подходящей прогностической модели. При этом учитывается влияние множества переменных и особенностей конкретной ситуации, обеспечивая максимальную адаптивность и эффективность используемого подхода. Заключительным этапом выступает верификация прогноза, где оцениваются полученные данные и проверяется качество созданной модели. Если возникает необходимость, проводятся дополнительные настройки, после чего формируется итоговый прогноз. Такой последовательный подход обеспечивает наиболее высокую достоверность результатов и повышает эффективность планирования электропотребления.

Следует подчеркнуть, что этапы процедуры прогнозирования взаимосвязаны и образуют целостную методологическую систему. Точность прогноза зависит именно от последовательного прохождения всех стадий и тщательного выполнения каждой отдельной операции.

Качество прогноза энергопотребления напрямую связано с применяемыми методами и математическими моделями. Однако из всего многообразия существующих подходов активно используются лишь 15-20 [8, 9]. Ключевое различие заключается в методологии: для краткосрочного и долгосрочного планирования применяются разные инструменты, адаптированные под конкретные задачи и источники информации [10].

В современной практике выделяют следующие основные группы методов прогнозирования (табл. 1): экспертный подход предполагает использование знаний и опыта профессионалов отрасли [11]; экстраполяционный подход заключается в проецировании актуальных трендов на последующие временные отрезки [12]; регрессионный анализ представляет собой статистический метод, позволяющий исследовать взаимосвязи между переменным; технология нейронных сетей – на основе применении алгоритмов машинного обучения для предсказательной аналитики [13, 14].

Таблица **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**

Table 1

Общие параметры методов прогнозирования

General parameters of forecasting methods

Методы	Характеристика	Разновидности
Экспертные оценки	Экспертное прогнозирование опирается на профессиональную интуицию и субъективные компетенции специалиста, обеспечивая возможность предсказаний разной длительности.	Субъективные и консолидированные экспертные суждения.
Экстраполяция	Принцип работы основан на исследовании статистических рядов определенного показателя и выявлении трендов его развития, целесообразно применять при низкой волатильности, предполагает разработку индивидуального прогноза для каждого элемента.	Метод скользящего среднего. Метод экспоненциального сглаживания.
Регрессионный анализ	В основе лежит исследование статистических зависимостей между различными показателями, что делает его оптимальным инструментом для среднесрочного прогнозирования.	—
Нейронные сети	Система построена на принципах нейросетевого моделирования, где элементы могут обучаться на основе получаемой информации об окружении, чаще всего применяется для предсказаний на ближайший период.	—

**Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.*

Эмпирические данные подтверждают, что ни один из существующих методов не может абсолютно точно предсказать все влияющие факторы и характеристики изменения спроса на электроэнергию. Важно найти разумный баланс между требуемой точностью, скоростью обработки данных и способностью модели адаптироваться к меняющимся условиям, что позволит создать эффективную систему прогнозирования электропотребления [15].

Цель исследования заключается в разработке и внедрение усовершенствованной методики прогнозирования электропотребления, которая обеспечит существенное повышение точности по сравнению с применяемыми на практике методами за счет комплексного учета статистических закономерностей и влияния внешних факторов.

Научная значимость. Разработан инновационный подход к прогнозированию энергопотребления, основанный на комплексном использовании статистических методов, включая регрессионный и корреляционный анализ.

Практическая значимость. Повышение точности прогнозирования электропотребления позволяет оптимизировать планирование режимов работы энергосистемы, улучшить баланс электроэнергии и снизить риски перегрузок.

Материалы и методы (Materials and methods)

Эмпирическую базу исследования составила статистика МУП «Альметьевские электрические сети» за четырёхлетний период (2020-2023 гг.). В модель прогнозирования были включены метеорологические переменные. Наибольшую прогностическую значимость, подтвержденную расчетами корреляции, продемонстрировали температура и влажность воздуха, которые оказывают существенное влияние на формирование как сезонных, так и случайных отклонений в графиках электропотребления [16, 17]. Исследование проводилось на основании ежемесячной статистики энергопотребления (кВт·ч) за четырехлетний интервал, а также средних месячных температур (°C) и относительной влажности воздуха (%), предоставленных Альметьевским центром по гидрометеорологии.

Данные таблицы 2 и рисунка 1 свидетельствуют о выраженной сезонной динамике энергопотребления. Одновременно фиксируется общая тенденция к его снижению в 2020-2023 гг., обнаруживающая частичную корреляцию с повышением температурных показателей.

Периоды начала и завершения отопительного сезона (март-апрель, сентябрь-октябрь) характеризуются заметным ростом энергопотребления. Данная закономерность объясняется активным использованием дополнительных электронагревательных устройств, создающих дополнительную нагрузку.

Таблица 2

Table 2

Ежемесячный мониторинг электропотребления Альметьевских электрических сетей за 2020-2023 гг.

Monthly monitoring of electricity consumption of Almet'yevsk electric grids for 2020-2023

Месяц	2020 год, кВт*ч	2021 год, кВт*ч	2022 год, кВт*ч	2023 год, кВт*ч
Январь	134856470	114086452	124283287	122941998
Февраль	106210956	102439084	117004646	111491532
Март	117371640	123294917	103818245	102170187
Апрель	104515828	100105939	91412219	94190462
Май	92029744	83733901	97666664	103483310
Июнь	91071390	82691707	87210581	82166921
Июль	92231130	82917942	93433054	87550700
Август	100521003	87586273	92368801	84785832
Сентябрь	105612315	99152010	96759268	95988638
Октябрь	105143635	117294811	115271029	103182655
Ноябрь	118613190	106942162	104194625	104642196
Декабрь	119959113	130459098	111168526	125779768
Среднее	107344701,2	102558691,3	102882578,8	101531183,3
Суммарное	1288136414	1230704296	1234590945	1218374199

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

В таблицах 3 и 4 и на рисунках 2 и 3 представлены температурные данные и показатели влажности города Альметьевск за период 2020-2023 годов, необходимые для оценки воздействия метеорологических факторов на потребление электроэнергии.

Согласно рисункам 2 и 3, уровень энергопотребления демонстрирует корреляцию с влажностью воздуха и обратную зависимость от температуры. Для влажности характерна сезонная динамика: снижение летом и рост зимой. При этом её колебания значительно более нестабильны по сравнению с изменениями электропотребления и температуры [18].

Статистический анализ показывает, что коэффициент корреляции между электропотреблением и температурой составляет 0,878. Такое высокое значение (близкое к 1) указывает на наличие сильной обратной связи между этими параметрами [19].

Второй показатель коэффициента корреляции, отражающий зависимость между объемом потребления электроэнергии и уровнем влажности воздуха, составляет 0,7074. Данное значение подтверждает наличие значимой прямой связи между этими параметрами, характеризующейся выраженным влиянием влажности на объем потребляемой электроэнергии.

Процесс разработки должен включать тщательное тестирование различных комбинаций известных методов и формирование на их основе четкого, структурированного алгоритма действий. Такой подход позволит создать эффективную методику прогнозирования, учитывающую все особенности электропотребления в регионе и обеспечивающую необходимую точность результатов.

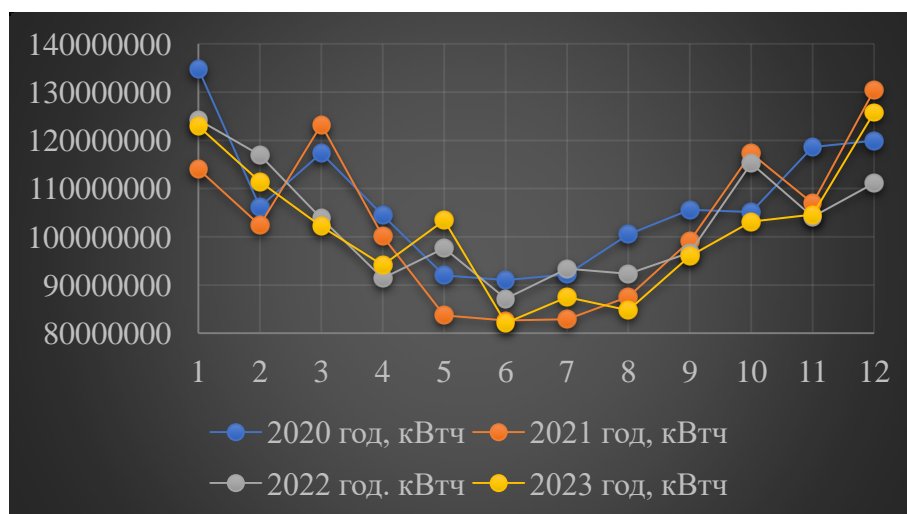


Рис. 1. Временная динамика энергопотребления за четырехлетний период Fig. 1. Time dynamics of energy consumption over a four-year period

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3

Table 3

Среднегодовая динамика температур в городе Альметьевск за 2020-2023 годы

Average annual temperature dynamics in the city of Almet'yevsk for 2020-2023 years

Месяц	2020 год, °C	2021 год, °C	2022 год, °C	2023 год, °C
Январь	-13,1	-9,4	-10,7	-15,9
Февраль	-9,5	-6,3	-9,2	-3,4
Март	-7,7	-1,4	-6	-0,9
Апрель	8,4	11,3	5,6	11
Май	18,2	21,5	19,4	14,8
Июнь	23,7	26,8	24,2	25,2
Июль	26,2	29	20,8	27,2
Август	24,8	30,4	19,4	26,6
Сентябрь	13,8	21,5	15,6	17,4
Октябрь	5,9	10,3	4,3	8,5
Ноябрь	3,3	3,8	-0,4	2,4
Декабрь	-5,9	4,1	-3,9	-12,8
Среднее	7,3	11,8	6,6	8,3

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Таблица 4

Table 4

Показатели относительной влажности в Альметьевске: средние значения за 2020-2023 годы

Relative humidity indicators in Almet'yevsk: average values for 2020-2023 years

Месяц	2020 год, %	2021 год, %	2022 год, %	2023 год, %
Январь	80	83	79	81
Февраль	75	70	67	77
Март	69	77	58	60
Апрель	65	51	67	58
Май	51	53	58	57
Июнь	46	68	49	51
Июль	45	52	71	58
Август	59	71	58	54
Сентябрь	60	75	67	63
Октябрь	58	72	60	60
Ноябрь	64	84	62	82
Декабрь	75	80	74	76
Среднее	62	70	64	65

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

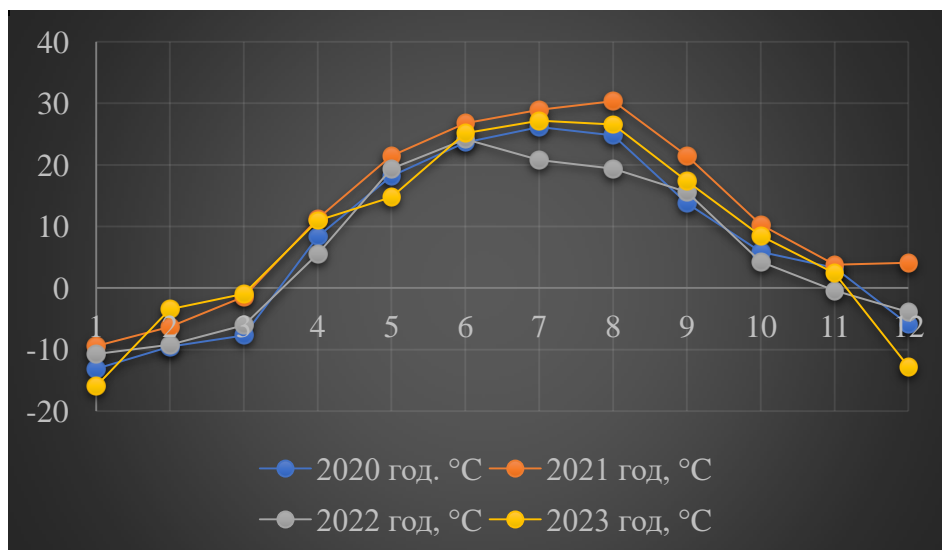


Рис. 2. Климатические графики температур воздуха за четырехлетний период
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

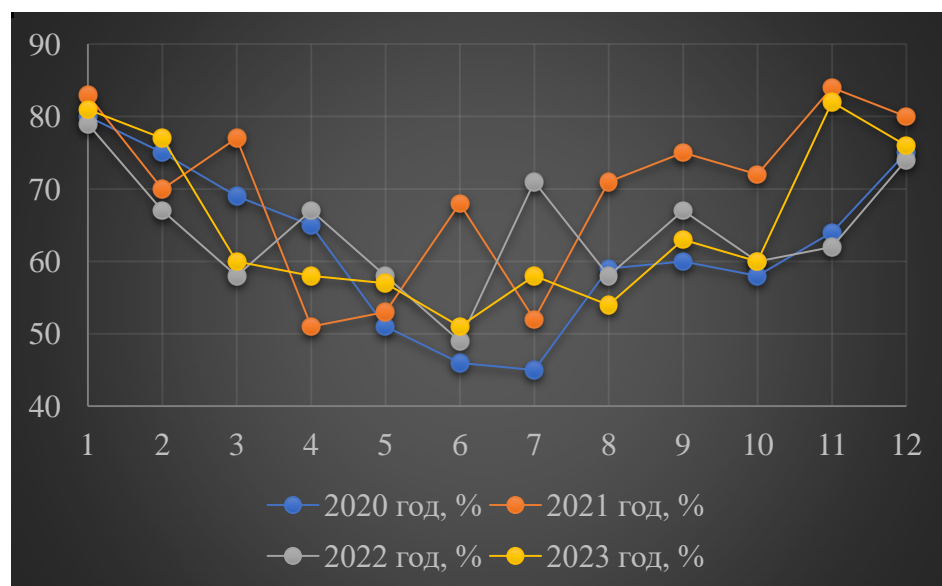


Рис. 3. Многолетний график изменения уровня влажности воздуха
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для определения предполагаемого месячного потребления электроэнергии целесообразно разработать систематизированную методологию прогнозирования, основанную на комплексном подходе. Важно отметить, что одним из ключевых требований к данной работе является исключение использования дорогостоящих коммерческих программных продуктов, требующих приобретения лицензий. При этом разработанная методика должна быть самодостаточной и не зависеть от платного программного обеспечения, что обеспечит её доступность и возможность широкого практического применения.

Математическая основа прогнозирования строится на классической формуле экспоненциального сглаживания, которая для рассматриваемой задачи имеет следующий вид:

$$E_{ij}^{p.esa} = \alpha \cdot E_{i(j-)} + (1 + \alpha) \cdot E_{i(j-1)}^{p.esa} \quad (1)$$

где $E_{ij}^{p.esa}$ – ожидаемый уровень потребления электроэнергии в i -м месяце j -го года;
 $E_{i(j-)}$ – зафиксированное потребление электроэнергии в соответствующем месяце предыдущего года; $E_{i(j-1)}^{p.esa}$ – прогнозируемое значение объема потребления электроэнергии

в i -ом месяце $(j-1)$ -го года (предыдущего года); α – подбираемый для прогноза коэффициент. Из первого уравнения системы (1) выразим коэффициент α_{1j} .

$$\alpha_{1i} = \frac{E_{i(j-2)} - \alpha_{2i} \cdot \Delta t_{i(j-3)}}{E_{i(j-3)}} \quad (2)$$

Для реализации комплексного метода при прогнозировании потребления электроэнергии необходимо правильно задать начальные условия. В нашем случае, используя данные за 2020-2023 годы, начальное прогнозное значение для каждого месяца рассчитывается как среднее арифметическое потребления электроэнергии за эти три года:

$$E_{1.20}^{p.esa} = \frac{E_{1.20} + E_{1.21} + E_{1.23}}{3} \quad (3)$$

Заменяя выражение (2) в уравнении (3) и проводя элементарные преобразования, мы получаем формулу для определения коэффициента α_{1j} :

$$\alpha_{2i} = \frac{E_{i(j-1)} \cdot E_{i(j-3)} - E_{i(j-2)}^2}{\Delta t_{i(j-2)} \cdot E_{i(j-3)} - \Delta t_{i(j-3)} \cdot E_{i(j-2)}} \quad (4)$$

Этот коэффициент входит в выражение (2), поэтому после соответствующей подстановки формула для расчета коэффициента α_{1j} примет вид:

$$\alpha_{1i} = \frac{E_{i(j-2)} - \frac{(E_{i(j-1)} \cdot E_{i(j-3)} - E_{i(j-2)}^2) \cdot \Delta t_{i(j-3)}}{\Delta t_{i(j-2)} \cdot E_{i(j-3)} - \Delta t_{i(j-3)} \cdot E_{i(j-2)}}}{E_{i(j-3)}} \quad (5)$$

В результате подстановки формул (4) и (5) в уравнение (3) получается итоговая формула, позволяющая рассчитать прогнозируемое потребление электроэнергии абонентами Альметьевской городской электросети. Данная формула применима для следующих месяцев: марта, апреля, июля и сентября.

$$E_{ij}^{p.r} = \frac{E_{i(j-1)}}{E_{i(j-3)}} \cdot \left[E_{i(j-2)} - \frac{(E_{i(j-1)} \cdot E_{i(j-3)} - E_{i(j-2)}^2) \cdot \Delta t_{i(j-3)}}{\Delta t_{i(j-2)} \cdot E_{i(j-3)} - \Delta t_{i(j-3)} \cdot E_{i(j-2)}} \right] + \frac{(E_{i(j-1)} \cdot E_{i(j-3)} - E_{i(j-2)}^2) \cdot \Delta t_{i(j-1)}}{\Delta t_{i(j-2)} \cdot E_{i(j-3)} - \Delta t_{i(j-3)} \cdot E_{i(j-2)}} \quad (6)$$

Формула, позволяющая рассчитать ожидаемое изменение потребления электроэнергии в январе относительно показателей прошлого года, описывается следующей формулой:

$$E_{1.23}^{p.esd} = \alpha \cdot \Delta E_{1.22} + \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot \Delta E_{1.21} + \frac{(1 + \alpha)^2 \cdot (\Delta E_{1.22} + \Delta E_{1.21})}{2} \quad (7)$$

Прогнозируемое потребление электроэнергии (по абсолютной величине) составит:

$$E_{1.23}^{p.esd} = E_{1.22} + \Delta E_{1.23}^{p.esd} \quad (8)$$

Обобщая формулы, можно записать общее выражение для прогноза потребления электроэнергии в i -ом месяце j -го года:

$$E_{ij}^{p.esd} = E_{i(j-1)} + \alpha \cdot \Delta E_{i(j-1)} + \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot \Delta E_{i(j-2)} + \frac{(1 - \alpha)^2 \cdot (\Delta E_{i(j-1)} + \Delta E_{i(j-2)})}{2} \quad (9)$$

где: $\Delta E_{i(j-2)} = E_{i(j-2)} - E_{i(j-3)}$; $\Delta E_{i(j-1)} = E_{i(j-1)} - E_{i(j-2)}$.

В соответствии с (8) и (9) расчет объемов потребления в январе, феврале, октябре и ноябре должен производиться по формуле:

$$E_{ij}^{p.com} = \frac{E_{i(j-1)}}{E_{7(j-1)}} \cdot E_{7j}^{p.r} \quad (10)$$

Для составления прогноза на июнь и ноябрь целесообразно применять следующую формулу:

$$E_{ij}^{p.com} = \frac{E_{i(j-1)}}{E_{5(j-1)}} \cdot E_{5j}^{p.r} \quad (11)$$

Проведённый анализ показал, что среднее квадратичное отклонение прогноза потребления электроэнергии за 2024 год составило величину равную 1.813. Важно отметить, что при выполнении расчетов был выбран коэффициент сглаживания $\alpha = 0,3$ на основе таблицы 5. Такой выбор параметра позволил достичь сопоставимого уровня относительной погрешности прогноза обеспечив тем самым стабильность оценок в указанный период.

Таблица 5

Table 5

Прогноз энергопотребления 2024 года, выполненный методом экспоненциального сглаживания с применением комбинированного анализа

2024 energy consumption forecast based on exponential smoothing and difference analysis

Месяц	Прогноз потребления электроэнергии, кВтч	Фактическое потребление электроэнергии, кВтч	Относительная погрешность прогноза $\delta E_{ij}^{esd}, \%$
Январь	126159179	123446706	2,15
Февраль	103448799	105199071	-1,69
Март	104963307	102361499	2,48
Апрель	98774998	97909089	0,88
Май	95792268	96702581	-0,95
Июнь	89367805	88613567	0,84
Июль	84290129	85950360	-1,97
Август	83808515	85929641	-2,53
Сентябрь	88726167	90365373	-1,85
Октябрь	110938909	108024646	2,43
Ноябрь	108039277	106587164	1,34
Декабрь	120162536	121377826	-1,01

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

На основе проведенного исследования становится возможным создание систематизированной методики прогнозирования потребления электроэнергии абонентами сетевой компании «Альметьевские электрические сети». Разработанная методология может быть представлена в форме четкого последовательного алгоритма вычислений, который наглядно продемонстрирован на рисунке 4.

Алгоритм позволяет структурировать процесс прогнозирования и сделать его максимально прозрачным и воспроизводимым для практического применения специалистами компании и обеспечивает последовательное выполнение всех необходимых расчетов с учетом специфики электротехнического комплекса.

Исходными данными для расчета являются реальные объемы потребления электрической энергии за три предыдущие года $E_{i(j-3)}; E_{i(j-2)}; E_{i(j-1)}$, а также среднемесячные температуры окружающего воздуха за четыре предыдущие года $t_{i(j-4)}; t_{i(j-3)}; t_{i(j-2)}; t_{i(j-1)}$. Данная методика и алгоритм предполагают проведение анализа исходных данных $E_{i(j-3)}; E_{i(j-2)}; E_{i(j-1)}$ поквартально и, в случаях обнаружения случайных аномалий (отклонений от линейных зависимостей, необъяснимых обычными факторами), предусматривают процедуру сглаживания путем усреднения показателей. Финальный этап расчета включает составление прогноза потребления электроэнергии на август и сентябрь согласно формуле (11). Для корректного выполнения прогноза необходимо дождаться поступления реальных данных об объеме потребления E_{sj} за май текущего года.

Особого внимания заслуживает тот факт, что разработанная методика прогнозирования потребления электроэнергии абонентами сетевой компании характеризуется высокой степенью детализации и не требует использования дорогостоящих специализированных программ. Все необходимые расчеты можно выполнить с помощью обычного калькулятора. При этом процесс прогнозирования легко автоматизируется посредством электронных таблиц, таких как Excel, входящих в пакет Microsoft Office и предустановленных на большинстве персональных компьютеров.

Результаты сравнительного анализа погрешностей различных моделей прогнозирования наглядно представлены в таблице 6, что позволяет объективно оценить преимущества каждого метода.

Анализ данных таблицы показывает значительное преимущество комбинированного метода прогнозирования: его применение позволяет уменьшить погрешность более чем в 2 раза по сравнению с традиционными методами.

Таблица 6

Table 6

Сравнение относительных погрешностей прогнозирования разными методами на 2024 год

Comparison of relative forecasting errors using different methods for 2024 year

	Минимальная относительная погрешность прогноза $\delta E_{ij}^Y, \%$	Средняя относительная погрешность прогноза $\delta E_{ij}^Y, \%$	Максимальная относительная погрешность прогноза $\delta E_{ij}^Y, \%$
Классический метод прогнозирования (экспоненциальное сглаживание)	0,047	2,098	4,869
Классический метод прогнозирования (регрессионный анализ)	0,403	3,209	9,264
Метод прогнозирования, применяемый на предприятии	0,043	1,959	6,490
Предлагаемый метод прогнозирования	0,84	1,676	2,53

**Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.*

Важно отметить прямую зависимость между затратами предприятия и точностью прогнозирования: чем меньше погрешность, тем ниже издержки. Следовательно, переход на комбинированный метод прогнозирования обеспечит сокращение затрат, связанных с ошибками в прогнозах, минимум в 2 раза.

Выводы (Conclusions)

1. На основе исходных данных об энергопотреблении «Альметьевских электрических сетей» и метеорологических факторов был выполнен комплексный анализ. Его результатом стало выявление устойчивой статистической взаимосвязи между объемами потребления в разные месяцы, что подтверждено расчетами коэффициентов корреляции.

2. На основе выявленных функциональных связей между месячными объемами энергопотребления построены регрессионные уравнения. Применение данной модели обеспечивает прогнозирование с общей погрешностью, не превышающей 3%.

3. Предложена методика прогноза энергопотребления для электротехнического комплекса компании, обеспечивающая точность с максимальной погрешностью 2,53%.

4. Разработан структурированный алгоритм, устанавливающий строгую последовательность действий для вычисления прогнозируемых объемов потребления электроэнергии пользователями комплексным способом.

5. Высокий уровень детализированности предложенной методики позволяет производить необходимые расчёты с использованием стандартных инженерных подходов, избавляя от потребности в специальном программном обеспечении.

Полученные результаты представляют собой целостный научный подход к прогнозированию потребления электроэнергии, отличающийся высокой точностью и практичностью применения.

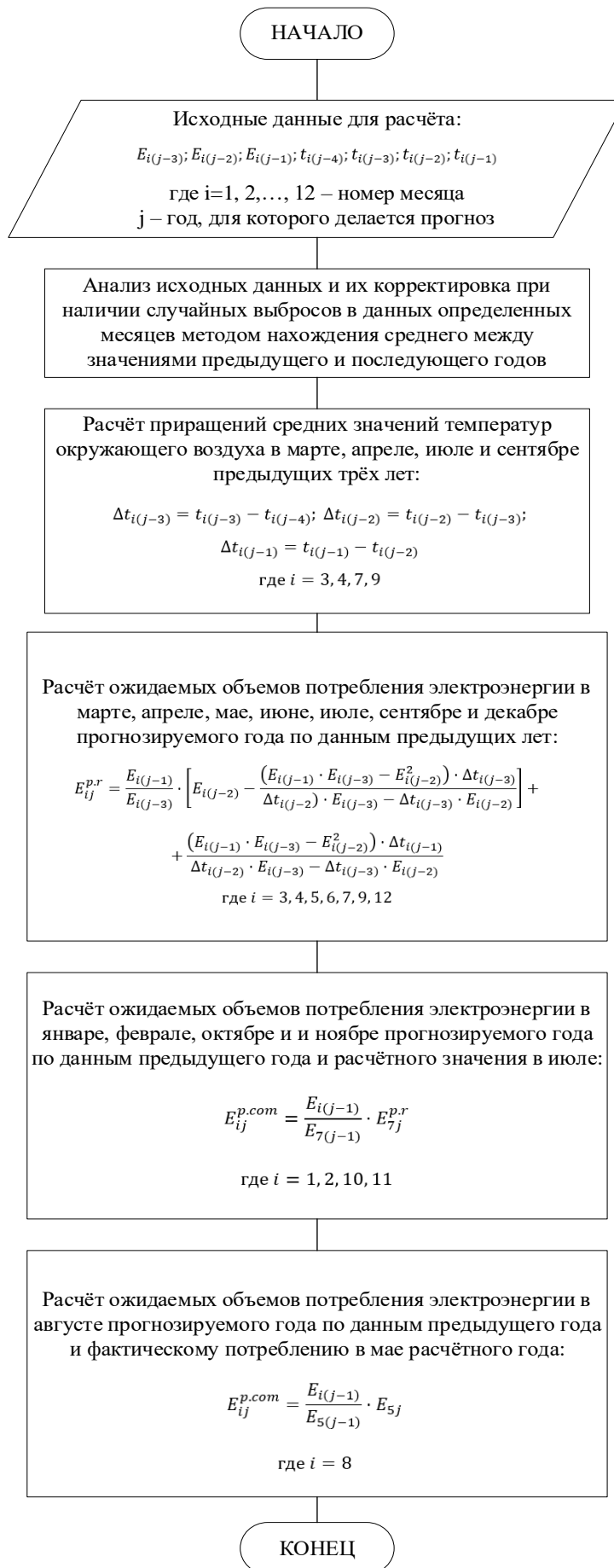


Рис. 4. Алгоритм вычисления прогнозируемых объёмов потребления электрической энергии

Fig. 4. The algorithm for calculating the projected volumes of electric energy consumption

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Литература

1. Бончук И.А., Ерохин П.М. Оперативное прогнозирование потребления мощности в изолированных энергосистемах // *Электричество*. 2022. № 1. С. 24-34.
2. Моттаева А.Б. Актуальные тренды и перспективы развития энергетики в России // *Вестник Сургутского государственного университета*. 2024. Т. 12. № 4. С. 77-91.
3. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Оценка воздействующих факторов и прогнозирование электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режима ее эксплуатации // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2022. № 2 (226). С. 31-46.
4. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др. Определение расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в электрические установки жилых и общественных зданий // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. № 6. С. 94-107.
5. Kapp S., Choi J.K., Hong T. Predicting industrial building energy consumption with statistical and machine-learning models informed by physical system parameters // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Т. 172. pp. 113.
6. Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Федотов Е.А. и др. Суммирование электрических нагрузок жилых и общественных зданий жилого комплекса // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2025. Т. 27, № 2. С. 76-89.
7. Булатов Ю.Н. Крюков А.В., Сулов К.В. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23, № 5. С. 184-194.
8. Peng L., Wang L., Xia D., et al. Effective energy consumption forecasting using empirical wavelet transform and long short-term memory // *Energy*. 2022. Т. 238. pp. 121.
9. Ghazal T.M. Energy demand forecasting using fused machine learning approaches // *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2022. Т. 31. № 1. pp. 539-553.
10. Mounir N., Ouadi H., Jrlhifa I. Short-term electric load forecasting using an EMD-BI-LSTM approach for smart grid energy management system // *Energy and Buildings*. 2023. Т. 288. pp. 113-122.
11. Кокшаров В.А. Концептуальный подход к реализации стратегии эффективного использования энергетических ресурсов на промышленном предприятии // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 7. С. 60-64.
12. Ванин А.С., Иванов Т.Ю. Исследование задачи краткосрочного прогнозирования графика нагрузки электроэнергетической системы // *Актуальные проблемы науки и техники*. 2022. С. 353-354.
13. Гужов С.В. О прогнозировании спроса на электроэнергию энергосистемами регионов российской федерации с применением искусственных нейронных сетей // *Известия Транссиба*. 2020. № 1 (41). С. 133-140.
14. Хомутов С.О., Серебряков Н.А. Создание нейросетевой математической модели краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей 6-35 кВ // *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2020. Т. 6. № 1. С. 80-91.
15. Brito T.C., Brito M.A. Forecasting of energy consumption: Artificial intelligence methods // *2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*. IEEE, 2022. pp. 1-4.
16. Батуева Д.Е. Прогноз энергопотребления в условиях изменяющегося климата // *Нефтяная столица*. 2020. С. 236-239.
17. Kim D.Y., Kim Y.H., Kim B.S. Changes in wind turbine power characteristics and annual energy production due to atmospheric stability, turbulence intensity, and wind shear // *Energy*. 2021. Т. 214. pp. 119.
18. Блохин А.В. Влияние временных и климатических факторов на потребление электроэнергии // *Информационные технологии в науке и производстве*. 2022. С. 42-50.
19. Русина А.Г. Прогнозирование суточного графика электропотребления рабочих дней с учетом метеофакторов для центральной энергосистемы Монголии // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24. № 2. С. 98-107.

Авторы публикации

Борисов Данил Александрович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. borisovdani49@gmail.com

Максимов Виктор Владимирович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия.

Воркунов Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия.

Куракина Ольга Евгеньевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия.

References

1. Bonchuk IA, Erokhin PM. Operational forecasting of power consumption in isolated power systems. *Electricity*. 2022; 1:24-34.
2. Mottaeva AB. Current trends and prospects of energy development in Russia. *Bulletin of Surgut State University*. 2024; 4:77-91.
3. Poluyanovich NK, Dubyago MN. Assessment of influencing factors and forecasting of power consumption in the regional energy system, taking into account its operating mode // *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Technical sciences*. 2022. No. 2 (226). pp. 31-46.
4. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR and others. Determination of calculated electrical loads of charging infrastructure for electric vehicles integrated into electrical installations of residential and public buildings. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2024; 6: 94-107.
5. Kapp S, Choi JK, Hong T. Predicting industrial building energy consumption with statistical and machine-learning models informed by physical system parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023; 172:113.
6. Fedotov AI, Akhmetshin AR, Fedotov EA and others. Summation of electrical loads of residential and public buildings of a residential complex. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2025; 2:76-89.
7. Bulatov YuN, Kryukov AV, Suslov KV Investigation of operating modes of an isolated power supply system with controlled distributed generation units, electric power storage and propulsion load. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2021; 5:184-194.
8. Peng L, Wang L, Xia D, et al. Effective energy consumption forecasting using empirical wavelet transform and long short-term memory. *Energy*. 2022; 238:121.
9. Ghazal TM. Energy demand forecasting using fused machine learning approaches. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2022; 1:539-553.
10. Mounir N, Ouadi H, Jrhilifa I. Short-term electric load forecasting using an EMD-BI-LSTM approach for smart grid energy management system. *Energy and Buildings*. 2023; 288:113-122.
11. Koksharov VA. A conceptual approach to the implementation of a strategy for the efficient use of energy resources in an industrial enterprise. *Innovations and investments*. 2021; 7:60-64.
12. Vanin AS, Ivanov TY. Investigation of the problem of short-term forecasting of the load schedule of the electric power system. *Actual problems of science and technology*. 2022; 353-354.
13. Guzhov SV. On forecasting electricity demand by the energy systems of the regions of the Russian Federation using artificial neural networks. *Izvestiya Transsib*. 2020; 1(41):133-140.
14. Khomutov SO, Serebryakov NA. Creation of a neural network mathematical model for short-term forecasting of electrical consumption of the electrical complex of the district electrical networks 6-35 kV. *Innovative transport systems and technologies*. 2020; 1:80-91.
15. Brito TC, Brito MA. Forecasting of energy consumption: Artificial intelligence methods. 2022 *17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), IEEE*. 2022;1-4.
16. Batueva DE. Forecast of energy consumption in a changing climate. *Oil Capital*. 2020; 236-239.
17. Kim DY, Kim YH, Kim BS. Changes in wind turbine power characteristics and annual energy production due to atmospheric stability, turbulence intensity, and wind shear. *Energy*. 2021;214:119.
18. Blokhin AV. The influence of temporal and climatic factors on electricity consumption. *Information technologies in science and production*. 2022;42-50.
19. Rusina AG. Forecasting the daily schedule of power consumption of working days, taking into account meteorological factors for the central energy system of Mongolia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2022;2:98-107.

Authors of the publication

Danil A. Borisov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. borisovdanil49@gmail.com

Victor V. Maksimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

© Борисов Д.А., Максимов В.В., Воркунов О.В., Куракина О.Е.

Oleg V. Vorkunov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Olga E. Kurakina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **20.11.2025 г.**

Отредактировано **01.12.2025 г.**

Принято **03.12.2025 г.**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-6-112-123

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Сигитов О.Ю.¹, Суслов К.В.^{2,3}

¹Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
OlegSigitov@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования связана с нарастающим развитием ветроэнергетики в России. В результате роста установленной мощности ВЭС в энергосистеме возникает необходимость анализа их режимов работы в задачах управления электроэнергетическим режимом. ЦЕЛЬ. Провести анализ режимов работы ВЭС в энергосистемах с целью дальнейшей интерполяции результатов для российских условий. Анализ режимов работы ВЭС основан на показателях, характеризующих маневренность энергосистемы: скорость изменения мощности и амплитуда изменения мощности. В связи с этим необходимо провести количественную оценку показателей и выявить закономерности их изменения. МЕТОДЫ. Для создания моделей использовалась кусочно-линейная аппроксимация временного ряда графика генерации ВЭС. Для обработки результатов использовались статистические методы. Автоматизация расчетов проведена в программном комплексе Microsoft Excel. РЕЗУЛЬТАТЫ. Анализ режимов работы реальных ВЭС показывает, что максимальная амплитуда колебаний может достигать значения до 80% от установленной мощности ВЭС. При этом повторяемость таких колебаний незначительная. Колебания амплитудой до 20% от установленной мощности ВЭС являются наиболее продолжительными – около 80% времени в течение года. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В статье проводится исследование режимов работы энергосистем с большой долей установленной мощности ВЭС. В первую очередь ВЭС оказывают влияние на регулировочный диапазон и скорость изменения мощности других электростанций, работающих в энергосистеме. Поэтому выявленные закономерности изменения данных параметров могут иметь практическую значимость в задачах управления электроэнергетическим режимом.

Ключевые слова: энергосистемы; режимы энергосистем; электростанции; ветровые электростанции; колебания мощности; маневренность; регулировочный диапазон.

Для цитирования: Сигитов О.Ю., Суслов К.В. Анализ режимов работы ветровых электростанций // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 112-123. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-112-123.

ANALYSIS OF OPERATING MODES OF WIND FARMS

Sigitov O.Yu.¹, Suslov K.V.^{2,3}

¹Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

³National Research University "MEI", Moscow, Russia
OlegSigitov@gmail.com

Abstract: RELEVANCE of the study is related to the increasing development of wind energy in Russia. As a result of the growth of wind farms installed capacity in the Russian energy system,

it becomes necessary to analyze their operating modes in the direction of electric power regime operating. **THE PURPOSE.** Analysis of wind farms operating modes in foreign power systems in order to interpolate the results for Russian conditions. The analysis of wind farms operating modes is based on indicators characterizing the power system flexibility: rate of power change and amplitude of power change. In this regard, it is necessary to carry out a quantitative assessment of the indicators and identify patterns of their change. **METHODS.** Piecewise linear approximation of wind farms generation schedule time series was used to create the models. Statistical methods were used to process the results. Calculations is carried out in the Microsoft Excel software package. **RESULTS.** The calculation results show that the oscillation amplitude can reach a maximum value of up to 80% of the installed capacity of the wind power plant. Similar results were obtained earlier in the analysis of wind power plant capacity fluctuations in the Czech power system. At the same time, in the considered example, oscillations with an amplitude of up to 20% of the in-installed capacity of the wind power plant are the longest - about 80% of the time during the year. **CONCLUSION.** Continuous development of wind farms sets the task of analyzing their impact on the operating modes of electric power systems. First of all, wind farms affect the control range and the rate of change in the capacity of other power plants operating in power system. The article studies the operating modes of power systems with a large share of wind farms installed capacity. Considering the ongoing construction of wind farms in the Russian energy system, the obtained results can be used in planning and managing electric power regimes.

Keywords: power systems; power system modes; power plants; wind power plants; wind farms; power fluctuations; flexibility; control range.

For citation: Sigitov O.Yu., Suslov K.V. Analysis of operating modes of wind farms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 112-123. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-112-123.

Введение (Introduction)

Ветровые электростанции с каждым годом становятся все более распространенным источником энергии во многих энергосистемах. По мере роста установленной мощности таких источников, их влияние на режимы работы энергосистем становится более заметным. Наибольшее влияние ВЭС оказывают на изменение баланса мощности и, как следствие, режимы работы всех электростанций в электроэнергетической системе (ЭЭС).

Влияние ВЭС на баланс мощности в основном зависит от скорости изменения мощности и амплитуды колебаний. Оба фактора определяют требования к характеристикам маневренности электростанций, работающих параллельно в ЭЭС.

Скорость изменения мощности ВЭС должна соответствовать скорости изменения мощности других электростанций. При их несоответствии необходимо вводить дополнительные высокоманевренные источники энергии, например энергоблоки ПГУ, ГТУ, а в некоторых случаях ГАЭС или литий-ионные системы накопления электрической энергии.

Амплитуда колебаний мощности ВЭС должна компенсироваться свободным регулировочным диапазоном электростанций, работающих в ЭЭС. В случае дефицита регулировочного диапазона, необходимо рассмотреть строительство электростанций с широким диапазоном регулирования мощности от технологического или технического минимума до установленной или располагаемой мощности, или рассмотреть возможность проведения комплекса мероприятий по расширению существующего диапазона [1]. К таким электростанциям относятся в первую очередь ГЭС и ГТУ, а также работающие в конденсационном режиме тепловые электростанции (ПГУ и ГРЭС).

В таких условиях важно учитывать, что строительство ВЭС в энергосистеме России показывает устойчивый рост с 2014 года. К 2024 году установленная мощность достигла 2,5 ГВт [2]. При этом основная доля в 2,2 ГВт располагается в энергосистеме ОЭС Юга. Строительство ВЭС продолжается и в других регионах России, в связи с чем исследование их режимов работы становится актуальной задачей.

По этим причинам, цель исследований заключается в проведении анализа режимов работы зарубежных энергосистем с большой долей установленной мощности ВЭС.

Научная значимость исследования состоит в определении максимального значения амплитуды колебаний мощности ВЭС и закономерности ее изменения.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов в задачах планирования и управления электроэнергетическими

режимами. Например, при составлении балансов активной мощности при краткосрочном планировании электроэнергетического режима или расчете перспективной структуры генерирующих мощностей в энергосистеме.

Исследования, посвященные анализу колебаний мощности возобновляемых источников энергии (ветровых и солнечных электростанций), являются актуальными и проводятся для решения различных задач в электроэнергетике.

Например, при создании энергетических комплексов для производства экологически чистого водорода на основе возобновляемых источников энергии оценка нестабильной генерации используется для определения характеристик и методов работы технологий электролиза воды [3]. В задачах оптимального распределения мощности между накопителями электрической энергии, ветровыми и солнечными электростанциями разрабатываются различные стратегии, целью которых является снижение колебаний мощности ВИЭ в режиме реального времени [4-5].

Правильная оценка колебаний мощности ВЭС играет важную роль и в задачах прогнозирования. От точности моделей прогноза зависит надежная работа электроэнергетической системы. В таких моделях важно точно определять колебания мощности на различных интервалах времени с учетом внезапных скачков мощности на загрузку и разгрузку ВЭС [6].

Колебания мощности ВИЭ особенно важно учитывать и в странах с централизованной системой теплоснабжения. Значительная доля в энергетическом балансе генерации на основе ВИЭ требует наличия высокоманевренных мощностей, которые будут компенсировать переменный график нагрузки. При этом в зимнее время характеристики маневренности генерирующего оборудования ограничиваются тепловым графиком нагрузки. По этой причине разрабатываются различные технические решения по использованию накопителей тепловой энергии для энергосистем с централизованной системой теплоснабжения и ВИЭ [7].

В задачах управления энергосистемами определение характеристик колебаний мощности ВЭС имеет положительный эффект [8]. Точное определение колебаний мощности и установление закономерностей их изменений улучшает управление энергопотреблением и прогнозированием режимов работы энергосистемы, что влияет на эффективную загрузку других электростанций и величину резервов мощности в энергосистеме.

В общем случае анализ колебаний мощности ВИЭ основывается на статистических методах обработки больших массивов данных, собранных на основании исторических графиков генерации ВЭС/СЭС или скорости ветра/инсоляции. Результаты анализа показывают закономерности колебаний мощности ВЭС и их частоты во времени.

В [9] предлагается алгоритм анализа колебаний мощности ВЭС для обнаружения и количественной оценки изменений графика генерации. Выделяются две группы изменений: значительные и стационарные. К первой группе относятся колебания, которые выходят за установленные пределы диапазона амплитуды колебания мощности, а ко второй группе относятся колебания, которые находятся в пределах диапазона. Колебания характеризуются временем начала и окончания, амплитудой, продолжительностью и повторяемостью.

В [10] анализ колебаний графика нагрузки ВЭС основан на том, что колебания возникают, когда определенный уклон (крутизна) графика сохраняется в течение некоторого интервала времени. Задача сводится к количественной оценке таких колебаний на каждом интервале времени графика нагрузки.

В [11] приводятся четыре классических метода определения колебаний мощности ВЭС, которые широко используются в современных расчетах и которые основаны на вычислении колебаний при превышении так называемого порогового значения. Выбор порогового значения зависит от множества факторов, в числе которых топология энергосистемы, номинальная мощность ветровых турбин и их расположение, а также местные климатические особенности. Сами колебания мощности ВЭС связаны со скачкообразным увеличением или уменьшением мощности ветрового потока, а их анализ включает в себя следующие характеристики: амплитуду, продолжительность и скорость нарастания/спада.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектом исследования являются графики генерации ВЭС энергосистемы северной и восточной Германии [12]. Графики представляют собой усредненные 15-минутные значения активной мощности ВЭС за период 2013-2022 гг. На их основании проводится анализ амплитуды колебаний мощности ВЭС. Учитывая, что значения активной мощности усредняются на 15-минутном интервале времени, в результатах расчета следует учитывать

коэффициент вариации. Несмотря на то, что в данных [12] значения коэффициента вариации отсутствуют, нижеизложенные методы исследования не приводят к значительной погрешности и не искажают полученные выводы.

Пример таких графиков показан на рисунке 1. Четыре графика относятся к разным сезонам (зиме, весне, лету, осени) и показывают изменение генерации всех ВЭС в энергосистеме в течение недели. Из графиков видно, что амплитуда колебаний мощности ВЭС может иметь разную величину и продолжительность. Например, в течение 32 часов мощность ВЭС изменялась на 15 400 МВт, 27 часов на 11 900 МВт, 6 часов на 5 500 МВт, 3 часов на 3 370 МВт.

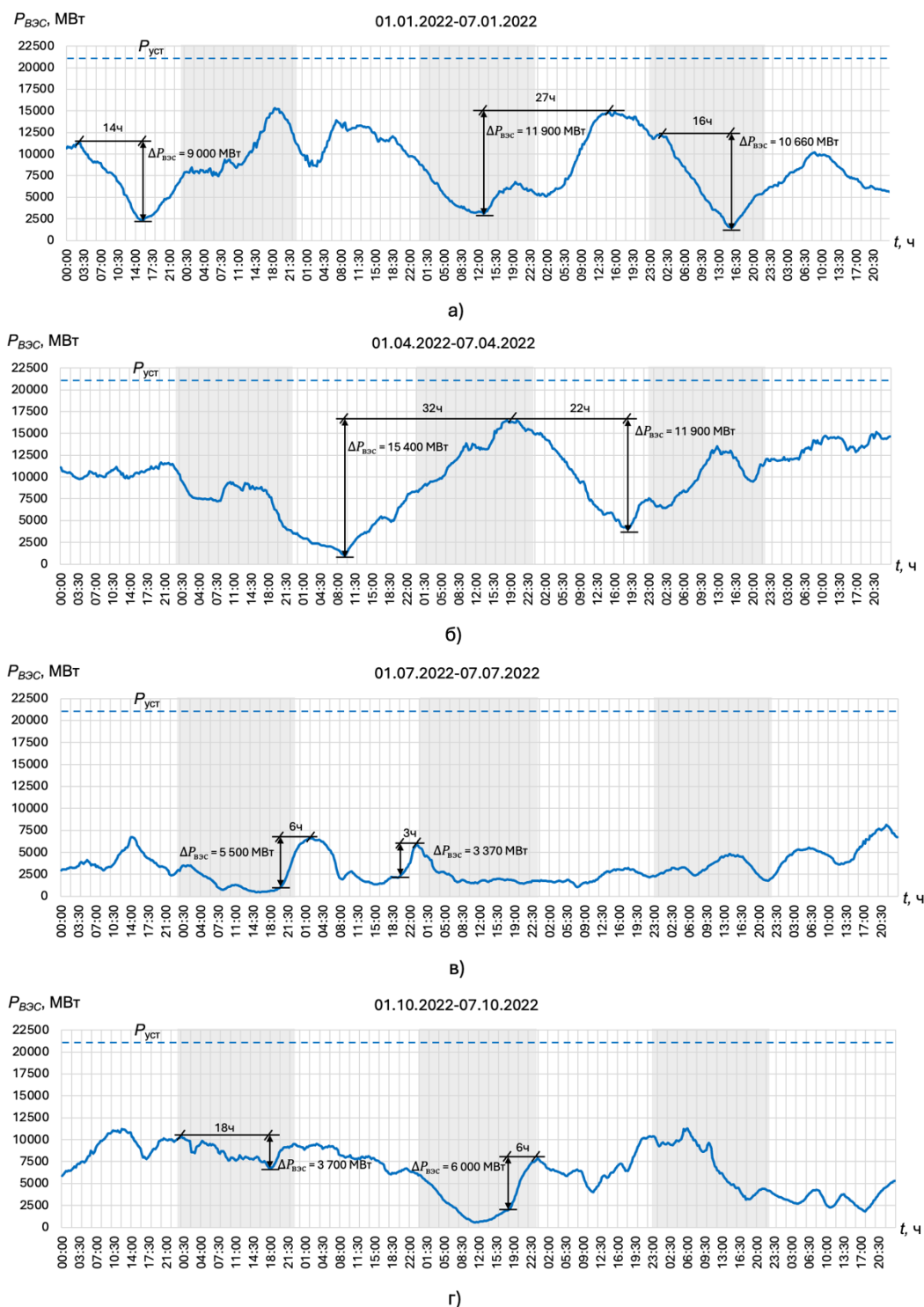


Рис. 1. Графики генерации всех ВЭС в энергосистеме Германии зимой (а), весной (б), летом (в) и осенью (г)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рассматриваемая электроэнергетическая система, включает в себя электростанции (ТЭС, ГЭС, гидроаккумулирующие, ветровые и солнечные), подстанции и линии электропередачи. Наземные объекты связаны между собой в единую энергосистему линиями электропередачи 220, 380 кВ. Оффшорные ВЭС подключаются к энергосистеме через линии переменного тока напряжением 150 и 220 кВ. Однако некоторые проектируемые оффшорные ВЭС используют схему выдачи мощности на постоянном токе. Связано это с ростом установленной мощности ВЭС и их удаленным расположением от материка. Оба варианта (на переменном и постоянном токе) имеют свои преимущества и недостатки и являются при определенных условиях конкурентоспособными [13-14]. Равновесная цена для двух схем определяется протяженностью ЛЭП и составляет порядка 40-80 км [15]. Так как некоторые площадки строительства ВЭС с высокими показателями ветроэнергетических ресурсов находятся в труднодоступных местах на значительном расстоянии от существующих ЛЭП и подстанций, то распределительная сеть ВЭС становится длиннее до места подключения к энергосистеме. В таком случае эффект от увеличения КИУМ может превосходить затраты на схему выдачи мощности ВЭС.

Стоит отметить и фактор распределенности ВЭС в рассматриваемой электроэнергетической системе северной и восточной Германии. ВЭС расположены на достаточном удалении друг от друга, в результате чего графики скорости ветра друг с другом не коррелируются. Эффект от распределенности ВЭС показан во многих исследованиях в различных энергосистемах [16-18]. У отдельных энергообъединений, результирующий график нагрузки можно носить резкопеременный характер, особенно если рассматривать график генерации отдельных ВЭС. В тоже время, колебания ВЭС компенсируют друг друга и результирующий график по всей энергосистеме выравнивается. Таким образом, снижается неравномерность, что положительно сказывается на управлении электроэнергетическим режимом.

Чтобы провести анализ колебаний мощности ВЭС и получить их количественную оценку предлагается использовать следующие показатели: обобщенные показатели режимов работы ВЭС, амплитуду изменения мощности ВЭС и повторяемость амплитуды колебаний мощности ВЭС.

Обобщенные показатели режимов работы ВЭС.

К обобщенным показателям режимов работы ВЭС можно отнести: максимальные и минимальные значения мощности, а также коэффициент использования установленной мощности.

КИУМ ВЭС определяется как отношение фактической выработки к выработке при использовании всей установленной мощности в течение рассматриваемого периода времени (теоретической выработке):

$$КИУМ_{ВЭС} = \frac{N_{факт}}{N_{теор}} \cdot 100\%$$

где: $N_{факт}$ – фактическая выработка электрической энергии ВЭС в течение рассматриваемого периода времени, кВт·ч; $N_{теор}$ – теоретическая выработка электрической энергии ВЭС при использовании всей установленной мощности в течение рассматриваемого периода времени, кВт·ч.

КИУМ характеризует энергетическую эффективность работы энергетического оборудования. Чем выше его значение, тем больше производится электрической энергии и тем выше экономическая эффективность электростанции. КИУМ ВЭС в большей степени зависит от природных факторов, влияющих на формирование воздушного потока, его направление и мощность. Значение КИУМ традиционных электростанций (ТЭС, ГЭС) в основном зависит от графика нагрузки, графика проведения ремонтных работ, аварий, местных особенностей топлива, сезонных изменений погоды, а также технических возможностей энергетического оборудования работать длительное время.

Определение максимальной величины амплитуды колебания мощности ВЭС.

Исследования по направлению оценки колебаний мощности ветровых электростанций, определению их закономерностей и частоты изменения во времени, проводятся различными авторами. Их результаты находят свою актуальность в задачах моделирования и прогнозирования электроэнергетических режимов [19-21]. Для исследования ВЭС в энергосистеме Германии использовалась кусочно-линейная аппроксимации временного ряда графика генерации ВЭС [22]:

$$\Delta P_{ВЭС}(t) = P_{i+k}(t) - P_i(t)$$

где: $\Delta P_{ВЭС}(t)$ – амплитуда изменения мощности ВЭС, МВт; $P_i(t)$ – мощность ВЭС, соответствующая измерению i , МВт; $P_{i+k}(t)$ – мощность ВЭС, соответствующая

следующему измерению $i+k$, МВт, k – шаг измерения мощности ВЭС, ч; $\Delta P_{\text{вэс}}(t) > 0$ соответствует увеличению мощности ВЭС, $\Delta P_{\text{вэс}}(t) < 0$ соответствует снижению мощности ВЭС. При $\Delta P_{\text{вэс}}(t) = 0$ мощность ВЭС не изменяется.

Увеличение шага измерения мощности позволяет выявить максимальную амплитуду колебаний. Как правило, наибольшая амплитуда колебаний выявляется при $k=23$.

Анализ повторяемости амплитуды колебания мощности ВЭС.

Повторяемость амплитуды колебаний мощности ВЭС $t(\Delta P_{\text{вэс}}^k)$ устанавливает отношение числа случаев N со значениями амплитуды, входящими в интервал $\Delta P_{\text{вэс}}^k$, к общему числу случаев M :

$$t(\Delta P_{\text{вэс}}^k) = \frac{N}{M} 100\%$$

Интервалы $\Delta P_{\text{вэс}}^k$ можно задавать в процентах от установленной мощности ВЭС с шагом 5%: [0;5], (5;10], (10;15] ... (95;100]. Повторяемость рассчитывается по каждому году. В результате их обработки получается матрица средних за ретроспективный период значений повторяемости амплитуды колебаний мощности ВЭС в зависимости от величины амплитуды и интервала времени.

Результаты (Results)

В соответствии с описанными методами и последовательностью проведения анализа режимов работы ВЭС на первом этапе проводился укрупненный анализ обобщенных показателей (табл. 1). В соответствии с ними установлено:

- рост установленной мощности наземных и оффшорных ВЭС за 10 лет составил 37% с 13,6 ГВт до 21,5 ГВт;
- максимальное значение мощности ВЭС за указанный период времени не превышает $0,812P_{\text{уст}}$, и в среднем находится на уровне $0,8P_{\text{уст}}$;
- несмотря на значительную пространственную распределенность ВЭС, мощность всех ВЭС может снижаться практически до нуля;
- коэффициент использования установленной мощности изменяется в диапазоне 15-23%.

Таблица 1
Table 1

Данные о режимах работы ВЭС в энергосистеме Германии за период 2013-2022 гг.
Wind farms operating modes data of German energy system for the period 2013-2022

Год	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
$P_{\text{уст}}, \text{ МВт}$	13623	14797	16171	17236	18556	19414	19779	20206	20841	21507
$P_{\text{макс}}, \text{ МВт}$	11064	11972	12832	13398	14266	15672	16050	16258	16727	16885
$P_{\text{макс}}, \%$	81,2	80,9	79,4	77,7	76,9	80,7	81,1	80,5	80,3	78,5
$P_{\text{мин}}, \text{ МВт}$	0,0	0,0	9,0	25,2	4,9	11,0	22,0	3,5	5,5	3,2
$P_{\text{мин}}, \%$	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
КИУМ, %	15,5	15,3	19,9	17,0	20,1	19,7	22,6	22,1	19,0	19,9

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На следующем этапе проводился расчет максимальной величины амплитуды колебания мощности ВЭС и повторяемости амплитуды колебания мощности ВЭС.

На рисунке 2 показано изменение амплитуды колебания мощности ВЭС ($\Delta P_{\text{вэс}}$) в зависимости от шага измерения мощности ВЭС ($k=6,12,18 \dots 72$ ч). Результаты показывают, что на краткосрочных периодах времени до 24 часов среднее значение амплитуды колебания мощности составляет $\Delta P_{\text{вэс}} = \pm 0,56P_{\text{уст}}$ ($\Delta P_{\text{вэс}} > 0$ при увеличении мощности ВЭС, $\Delta P_{\text{вэс}} < 0$ при снижении мощности ВЭС) при коэффициенте вариации 16%. Для долгосрочных периодов времени от 24 до 72 часов среднее значение амплитуды колебания мощности составляет $\Delta P_{\text{вэс}} = \pm 0,7P_{\text{уст}}$ при коэффициенте вариации 3%.

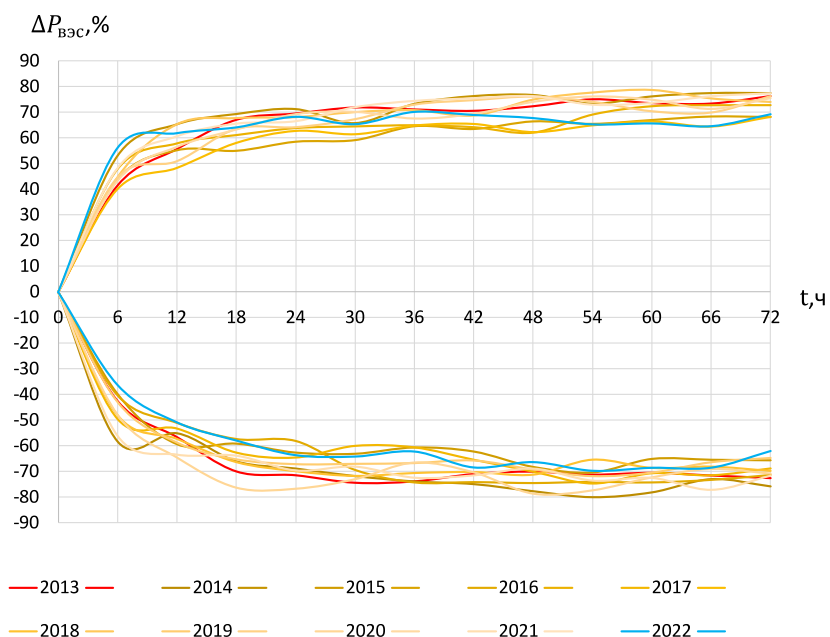


Рис. 2. Амплитуда колебаний мощности ВЭС (в процентах от установленной мощности ВЭС) в зависимости от интервала времени
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для надежной работы энергосистемы необходимо учитывать наиболее тяжелые режимы, связанные с высокоамплитудными колебаниями мощности ВЭС. В связи с этим на основании рисунка 2 построен график с максимальными значениями $\Delta P_{\text{вэс}}$ – рисунок 3. Как видно из рисунка, максимальное значение амплитуды не превышает $\pm 0,8P_{\text{уст}}$.

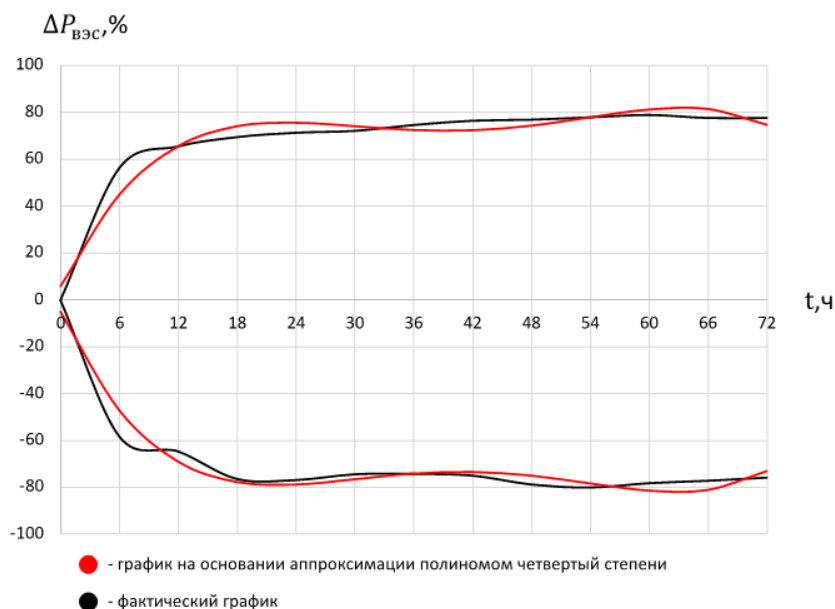


Рис. 3. Максимальная амплитуда колебаний мощности ВЭС (в процентах от установленной мощности ВЭС) в зависимости от интервала времени
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные эмпирические зависимости можно использовать при определении амплитуды колебания мощности ВЭС на прогнозируемый интервал времени от 1 часа и на 3 суток вперед. Для удобства прогнозирования разработано два способа.

1. Графический способ на основании рисунка 3. Ось абсцисс показывает прогнозируемый интервал времени в часах. Ось ординат показывает амплитуду колебаний

мощности ВЭС в течение выбранного интервала времени (в процентах от установленной мощности ВЭС).

2. Второй способ на основании аппроксимации функции полиномом четвертой степени, который в общем виде представляется как:

$$\Delta P_{\text{ВЭС}}(t) = a_1 t^4 + a_2 t^3 + a_3 t^2 + a_4 t + a_5$$

где: a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – коэффициенты полинома четвертой степени, значения которых представлены в таблице 2, t – прогнозируемое значение времени, ч, $t \in (0; 72]$.

Таблица 2

Table 2

Коэффициенты полиномов четвертой степени¹
Polynomials coefficients of the fourth degree¹

Коэффициент полинома	Значения при определении увеличения мощности ВЭС	Значения при определении снижения мощности ВЭС
a_1	$-3,6775 \cdot 10^{-5}$	$4,0223 \cdot 10^{-5}$
a_2	$6,1715 \cdot 10^{-3}$	$-6,7463 \cdot 10^{-3}$
a_3	$-3,5774 \cdot 10^{-1}$	$3,9072 \cdot 10^{-1}$
a_4	8,4472	-9,1156
a_5	5,7473	-4,9711

¹ – коэффициент достоверности аппроксимации с полученными коэффициентами $R^2=0,95$.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Расчет повторяемости проводится для интервала времени $[0; 72]$ с шагом в 6 часов. Результаты расчетов для среднего значения повторяемости за ретроспективный период представлены в виде графиков на рисунке 4(а). Анализ повторяемости показывает одинаковый характер изменения за период 2013-2022 гг. Наибольшая повторяемость (около 80% времени в течение года) амплитуды колебаний мощности ВЭС наблюдается в интервалах от $(5; 10]$ или $(0,05-0,1) P_{\text{уст}}$ до $(15; 20]$ или $(0,15-0,2) P_{\text{уст}}$. При этом коэффициент вариации для указанных интервалов находится в пределах 20%. (рис. 4(б)).

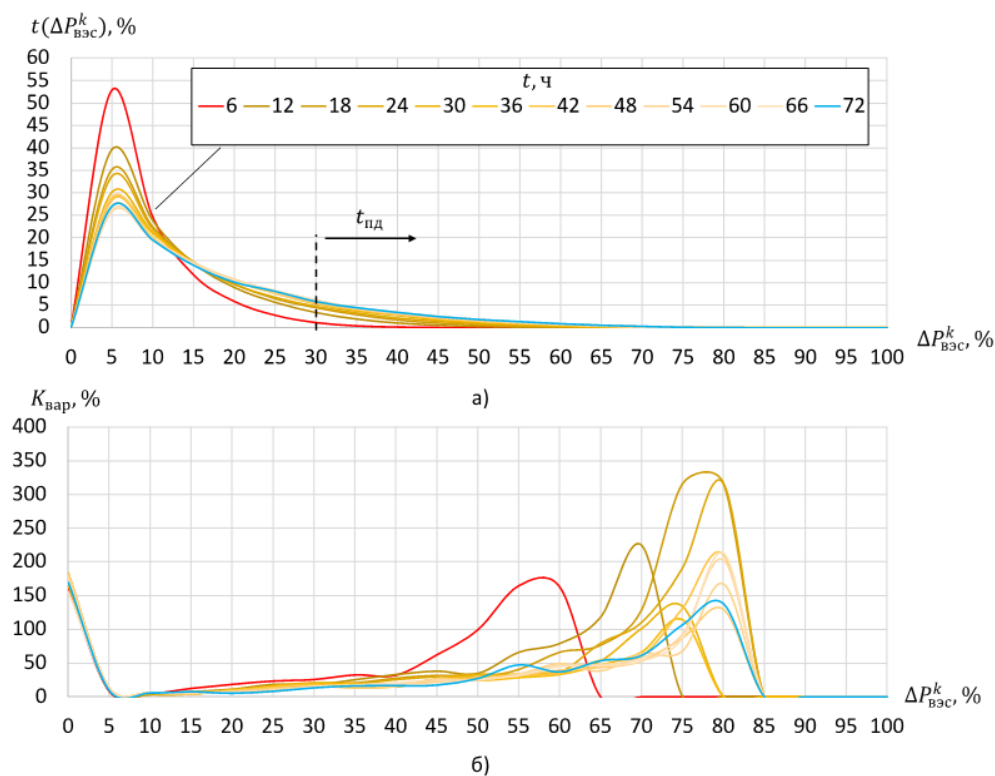


Рис. 4. Среднее значение повторяемости амплитуды колебаний мощности ВЭС (а) и коэффициент вариации повторяемости амплитуды колебаний мощности ВЭС (б) за ретроспективный период

Fig. 4. The average value of repeatability of amplitude of wind farms power fluctuations (a) and the coefficient of variation of the repeatability over a retrospective period

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обсуждение (Discussions)

Полученные результаты можно использовать при планировании режимов работы энергосистемы (например, при планировании состава включенного генерирующего оборудования и объемов резервов) и формировании перспективных балансов мощности. Значения амплитуды колебаний мощности ВЭС и их повторяемости сопоставляются с регулировочным диапазоном традиционных электростанций. В случае недостаточности регулировочного диапазона традиционных электростанций, необходимо предусмотреть мероприятия по обеспечению требуемого регулировочного диапазона.

К первой группе мероприятий можно отнести ввод генерирующих мощностей с более высокими характеристиками маневренности, увеличение пропускной способности электрической сети или выравнивание графика нагрузки за счет внедрения систем накопления электрической энергии, гидроаккумулирующих электростанций или механизмов управления спросом.

Вторая группа мероприятий основана на выявлении общего характера изменения повторяемости амплитуды колебаний мощности ВЭС. Чем больше амплитуда колебаний мощности ВЭС, тем реже такие случаи наблюдаются за ретроспективный период. При этом для таких случаев характерны высокие значения коэффициента вариации (рис. 3(б)). Поэтому в условиях неопределенности, кратковременно возможно обеспечить расширение регулировочного диапазона традиционных электростанций на величину длительно допустимого превышения над номинальной мощностью ($t_{пл}$) без строительства дополнительных маневренных мощностей – рисунок 3 (а). Например, для паросиловых энергоблоков с прямоточными и барабанными котлами, а также ПГУ с котлами-утилизаторами, верхний предел регулировочного диапазона нагрузок составляет 100-110% [22].

Важно отметить, что аналогичные результаты были получены при анализе энергосистемы Чехии [23]. При суммарной установленной мощности ВЭС 337 МВт среднее значение амплитуды колебания мощности ВЭС составило $\Delta P_{вэс} = \pm 0,8 P_{уст}$. Таким образом, полученные результаты можно использовать при разработке структуры генерации в энергосистемах с установленной мощностью ВЭС от сотен мегаватт до десятков гигаватт.

Заключение (Conclusions)

В условиях продолжающегося роста установленной мощности ветровых электростанций в энергосистеме России анализ их режимов работы является важной задачей. Выявление закономерностей в колебаниях мощности ВЭС позволяет точнее планировать режимы работы энергосистемы. Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. При строительстве ВЭС в энергосистеме России необходимо проводить анализ зарубежных энергосистем с высокой долей установленной мощности ВЭС. Полученные результаты могут быть использованы в задачах планирования и управления режимами работы традиционных электростанций с учетом их характеристик маневренности.

2. В результате анализа энергосистемы Германии и Чехии было установлено, что для больших энергосистем с установленной мощностью ВЭС в сотни мегаватт и десятки гигаватт максимальное значение амплитуды колебания мощности всех ВЭС составляет 80% от установленной мощности ВЭС.

3. Расчет повторяемости амплитуды колебаний мощности ВЭС показывает одинаковый характер изменения за период 2013-2022 гг. Результаты можно использовать при планировании режимов работы энергосистемы и формирования перспективных балансов мощности. Амплитуда колебаний до 20% от установленной мощности ВЭС является наиболее продолжительной – около 80% времени в течение года.

4. Значения амплитуды колебаний мощности ВЭС и их повторяемости необходимо сопоставлять с регулировочным диапазоном традиционных электростанций. В случае недостаточности регулировочного диапазона традиционных электростанций необходимо предусмотреть мероприятия по его расширению.

Дальнейшее развитие исследований планируется в направлении анализа графиков генерации ВЭС в других энергосистемах с разной величиной усреднения измерений активной мощности ВЭС, а также установления погрешностей исследуемых графиков генерации ВЭС и их влияния на полученные результаты.

Литература

1. Теплов, Б. Д., Радин Ю. А. Повышение маневренности и экономической эффективности эксплуатации ПГУ в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности // Теплоэнергетика. 2019. № 5. С. 39-47. doi:10.1134/S0040363619050096.

2. Ассоциация развития возобновляемой энергетики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://treda.ru/industry/statistics/>
3. Kojima H., Nagasawa K., Todoroki N., et al. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023, Vol.48, Iss. 12. Pp. 4572-4593 doi:10.1016/j.ijhydene.2022.11.018.
4. Zhang L., Zhang T., Zhang K., Hu W. Research on power fluctuation strategy of hybrid energy storage to suppress wind-photovoltaic hybrid power system // *Energy Reports*. 2023. Vol.10. pp. 3166-3173. doi:10.1016/j.egyr.2023.09.176.
5. Frate G.F., Cherubini P., Tacconelli C., et al. Ramp rate abatement for wind energy integration in microgrids // *Energy Procedia*. 2019, Vol. 159. pp. 292-297, doi:10.1016/j.egypro.2019.01.013.
6. Zhu N., Wang Y., Yuan K., et al. Peak interval-focused wind power forecast with dynamic ramp considerations // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024. Vol.163. 110340, doi:10.1016/j.ijepes.2024.110340.
7. Monie S.W., Åberg M. Potential to balance load variability, induced by renewable power, using rock cavern thermal energy storage, heat pumps, and combined heat and power in Sweden // *Applied Energy*. 2023. Vol. 343. 121210, doi:10.1016/j.apenergy.2023.121210.
8. Mishra S., Leinakse M., Palu I. Wind power variation identification using ramping behavior analysis // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 141. pp. 565-571, doi:10.1016/j.egypro.2017.11.075.
9. Sambeet Mishra, Esin Ören, Chiara Bordin, Fushuan Wen, Ivo Palu, Features extraction of wind ramp events from a virtual wind park, *Energy Reports*, Volume 6, Supplement 6, 2020, Pages 237-249, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.08.047>.
10. Pichault, M., Vincent, C., Skidmore, G., and Monty, J.: Characterisation of intra-hourly wind power ramps at the wind farm scale and associated processes, *Wind Energ. Sci.*, 6, 131–147, <https://doi.org/10.5194/wes-6-131-2021>, 2021.
11. Sambeet Mishra, Madis Leinakse, Ivo Palu, Wind power variation identification using ramping behavior analysis, *Energy Procedia*, Volume 141, 2017, Pages 565-571, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.075>.
12. 50Hertz Transmission GmbH [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.50hertz.com/en/Transparency/GridData/Production/Windpower>
13. Rahman S., Khan I., Alkhamash H.I., Nadeem M.F. A Comparison Review on Transmission Mode for Onshore Integration of Offshore Wind Farms: HVDC or HVAC // *Electronics*. 2021. Vol.10. 1489. doi:10.3390/electronics10121489
14. Xu Z., Jin Y., Zhang Z., Huang Y. Eight Typical Schemes of Offshore Wind Power Transmission and Their Key Technical Problems // *Energies*. 2023. Vol.16, 658. doi:/10.3390/en16020658
15. Torres Olguin, R.E., Garces, A., Bergna, G. (2014). HVDC Transmission for Offshore Wind Farms. In: Hossain, J., Mahmud, A. (eds) *Large Scale Renewable Power Generation. Green Energy and Technology*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-4585-30-9_11
16. Сигитов О.Ю. Разработка метода рациональной расстановки ветровых электростанций в электроэнергетической системе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 20 с.
17. Сигитов, О. Ю. Купреев С. А., Мнацаканян В. У. Положительный эффект распределения ветровых электростанций в электроэнергетической системе // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2023. Т. 24, № 2. С. 157-165.
18. Сигитов О.Ю., Вивчар А.Н., Проблемы управления ветровыми и тепловыми электростанциями в электроэнергетической системе // *Электрические станции*. 2022. № 12 (1097). С. 2-9.
19. Dotzauer M., Pfeiffer D., Lauer M., et al. How to measure flexibility – performance indicators for demand driven power generation from biogas plants // *Renewable Energy*. 2019. Vol. 134. pp. 135-146, doi:10.1016/j.renene.2018.10.021.
20. Kamath C. Understanding wind ramp events through analysis of historical data, *Proceedings of the IEEE PES T&D 2010*, New Orleans, LA, USA, 2010, pp. 1-6, doi:10.1109/TDC.2010.5484508.
21. Florita, A. R. et al. Identifying Wind and Solar Ramping Events. *Proceedings of the 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*; 2013. pp. 147-152.
22. Радин, Ю.А. Сигитов О.Ю., Зорченко Н.В. Требования к маневренности тепловых электростанций в энергосистемах с ветровыми электростанциями // *Электрические станции*. – 2025. № 1(1122). С. 17-25. doi:10.71841/EP.ELST.2025.1122.1.02.
23. Сигитов О.Ю. Разработка алгоритма оценки колебаний мощности ветровых электростанций. *Электроенергетика глазами молодежи: материалы XIV Международной научно-технической конференции (1–4 октября 2024 г.): В 2 т. Т. 2.* – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2024.

Авторы публикации

Сигитов Олег Юрьевич – канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры энергетического машиностроения инженерной академии Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия. olegsigitov@gmail.com

Суслов Константин Витальевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Россия; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Россия. dr.souslov@yandex.ru

References

1. Teplov BD, Radin YuA Increasing the maneuverability and economic efficiency of CCGT operation in the context of the wholesale electricity and capacity market. *Thermal Power Engineering*. 2019; 5: 39-47. (In Russ). doi: 10.1134/S0040363619050096.
2. Renewable Energy Development Association [Electronic resource] - Access mode: <https://reda.ru/industry/statistics/>
3. Kojima H, Nagasawa K, Todoroki N, et al. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48(12):4572-4593 doi:10.1016/j.ijhydene.2022.11.018.
4. Zhang L, Zhang T, Zhang K, Hu W Research on power fluctuation strategy of hybrid energy storage to suppress wind-photovoltaic hybrid power system. *Energy Reports*. 2023; 10: 3166-3173. doi:10.1016/j.egyr.2023.09.176.
5. Frate GF, Cherubini P, Tacconelli C, et al. Ramp rate abatement for wind energy integration in microgrids. *Energy Procedia*. 2019; 159: 292-297, doi:10.1016/j.egypro.2019.01.013.
6. Zhu N, Wang Y, Yuan K, et al. Peak interval-focused wind power forecast with dynamic ramp considerations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024; 163: 110340, doi:10.1016/j.ijepes.2024.110340.
7. Monie SW, Åberg M Potential to balance load variability, induced by renewable power, using rock cavern thermal energy storage, heat pumps, and combined heat and power in Sweden. *Applied Energy*. 2023; 343: 121210, doi:10.1016/j.apenergy.2023.121210.
8. Mishra S, Leinakse M, Palu I Wind power variation identification using ramping behavior analysis. *Energy Procedia*. 2017; 141: 565-571, doi:10.1016/j.egypro.2017.11.075.
9. Sambeet Mishra, Esin Ören, Chiara Bordin, Fushuan Wen, Ivo Palu, Features extraction of wind ramp events from a virtual wind park, *Energy Reports*, Volume 6, Supplement 6, 2020, Pages 237-249, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.08.047>.
10. Pichault, M., Vincent, C., Skidmore, G., and Monty, J.: Characterisation of intra-hourly wind power ramps at the wind farm scale and associated processes, *Wind Energ. Sci.*, 6, 131–147, <https://doi.org/10.5194/wes-6-131-2021>, 2021.
11. Sambeet Mishra, Madis Leinakse, Ivo Palu, Wind power variation identification using ramping behavior analysis, *Energy Procedia*, Volume 141, 2017, Pages 565-571, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.075>.
12. 50Hertz Transmission GmbH [Electronic resource] - Access mode: <https://www.50hertz.com/en/Transparency/GridData/Production/Windpower>
13. Rahman S, Khan I, Alkhamash HI, Nadeem MF A Comparison Review on Transmission Mode for Onshore Integration of Offshore Wind Farms: HVDC or HVAC. *Electronics*. 2021;10:1489. doi:10.3390/electronics10121489
14. Xu Z, Jin Y, Zhang Z, Huang Y Eight Typical Schemes of Offshore Wind Power Transmission and Their Key Technical Problems. *Energies*. 2023;16: 658. doi:10.3390/en16020658
15. Torres Olguin R. E., Garces, A., Bergna, G. HVDC Transmission for Offshore Wind Farms. In: Hossain, J., Mahmud, A. (eds) *Large Scale Renewable Power Generation. Green Energy and Technology*. Springer, Singapore, 2014. doi:10.1007/978-981-4585-30-9_11
16. Sigitov O. Yu. Development of a method for rational placement of wind power plants in the electric power system: author's abstr. dis. ... candidate of technical sciences. M., 2022. 20 p.
17. Sigitov OYu, Kupreev SA, Mnatsakanyan VU Positive effect of distribution of wind power plants in the electric power system// *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*. 2023; 24 (2): 157-165.
18. Sigitov OYu, Vivchar AN Problems of control of wind and thermal power plants in the electric power system. *Electric Stations*. 2022; 12 (1097):2-9.
19. Dotzauer M, Pfeiffer D, Lauer M, et al. How to measure flexibility – performance indicators

for demand driven power generation from biogas plants. *Renewable Energy*. 2019; 134: 135-146, doi:10.1016/j.renene.2018.10.021.

20. Kamath C. Understanding wind ramp events through analysis of historical data, *Proceedings of the IEEE PES T&D 2010*, New Orleans, LA, USA, 2010, pp. 1-6, doi:10.1109/TDC.2010.5484508.

21. Florita A. R. et al. Identifying Wind and Solar Ramping Events. *Proceedings of the 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*; 2013. pp. 147-152.

22. Radin YuA, Sigitov OY, Zorchenko NV Requirements for the maneuverability of thermal power plants in power systems with wind power plants. *Electric stations*. 2025; 1(1122):17-25. doi:10.71841/EP.ELST.2025.1122.1.02.

23. Sigitov, O. Yu. Development of an algorithm for estimating wind power plant power fluctuations. *Electric Power Industry through the Eyes of Young People: Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference* (October 1–4, 2024); In 2 vols. Vol. 2. Stavropol: North Caucasian Federal University, 2024.

Authors of the publication

Oleg Yu. Sigitov – Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia. *olegsigitov@gmail.com*

Konstantin V. Suslov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia; National Research University "MEI", Moscow, Russia. *dr.souslov@yandex.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **11.03.2025 г.**

Отредактировано **28.04.2025 г.**

Принято **06.05.2025 г.**



НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НА ОСНОВЕ ЦИКЛА АЛЛАМА С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ УГЛЯ

Таценко М.Е., Садкин И.С., Щинников П.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
tatsenko2010@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Разработка новой технологии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля. ЦЕЛЬ. Определить термическую эффективность цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля. Рассчитать процесс горения синтез-газа. Рассмотреть положения термодинамического анализа энергетических циклов. Провести сравнение рассматриваемой технологии с другими технологиями генерации электроэнергии на органическом топливе. МЕТОДЫ. Методика расчета процесса горения синтез-газа заключается в определении массо-расходных характеристик топлива, окислителя, рабочих тел и термического КПД, что позволяет вести сравнение рассматриваемой технологии с другими. В предложенном методе принято, что сжигают чистый синтез-газ, при стехиометричности соотношения подводимого кислорода. Ограничениями на представленный метод являются термодинамические параметры входа, которыми будут определяться энтальпии рабочего тела и водяных паров в расчетных точках, а также температура окружающей среды, от которой будет зависеть давление на выходе из CO_2 -турбины. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье предлагается методика определения термической эффективности цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля. В основе методики лежат расчет горения синтез-газа и положения термодинамического анализа энергетических циклов. С использованием разработанного метода проведен анализ термической эффективности технологии производства электроэнергии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией кузнецкого угля в процессе Техасо. Проведено сравнение рассматриваемой технологии с другими технологиями генерации электроэнергии на органическом топливе. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Расчетным путем получено, что расход синтез-газа для рассматриваемой технологии примерно в 4,3 раза выше, чем для цикла Аллама при кислородном сжигании метана. Показано, что доля обновления рабочего тела для технологии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля в 1,6 раза выше, чем у аналогичного CO_2 -цикла на метане. Показано, что термический КПД технологии составляет 65,5%, что сопоставимо с аналогичными технологиями разной архитектуры.

Ключевые слова: цикл Аллама; внутрицикловая газификация угля; углекислый газ; термодинамическая эффективность; процесс Тексако; синтез-газ; метан.

Для цитирования: Таценко М.Е., Садкин И.С., Щинников П.А. Новая технология на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 124-134. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-124-134.

NEW TECHNOLOGY BASED ON THE ALLAM CYCLE WITH INTRA-CYCLE COAL GASIFICATION

Tatsenko M.E., Sadkin I.S., Shchinnikov P.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
tatsenko2010@yandex.ru

Abstract: RELEVANCE. Development of a new technology based on the Allam cycle with in-cycle coal gasification. THE PURPOSE. Determine the thermal efficiency of the Allam cycle with in-cycle coal gasification. Calculate the synthesis gas combustion process. Consider the provisions of thermodynamic analysis of energy cycles. Compare the considered technology with other technologies of electric power generation on organic fuel. METHODS. The method for calculating the synthesis gas combustion process consists in determining the mass-flow

characteristics of the fuel, oxidizer, working fluids and thermal efficiency, which allows comparing the considered technology with others. In the proposed method, it is assumed that pure synthesis gas is burned at a stoichiometric ratio of the supplied oxygen. Limitations of the presented method are the thermodynamic parameters of the input, which will determine the enthalpies of the working fluid and water vapor at the calculated points, as well as the ambient temperature, on which the pressure at the outlet of the CO₂ turbine will depend. **RESULTS.** The article proposes a method for determining the thermal efficiency of the Allam cycle with in-cycle coal gasification. The method is based on the calculation of synthesis gas combustion and the provisions of thermodynamic analysis of energy cycles. Using the developed method, the thermal efficiency of the electricity generation technology based on the Allam cycle with in-cycle gasification of Kuznetsk coal in the Texas process is analyzed. The considered technology is compared with other technologies for generating electricity on organic fuel. **CONCLUSION.** It was calculated that the synthesis gas consumption for the considered technology is approximately 4.3 times higher than for the Allam cycle with oxygen combustion of methane. It is shown that the proportion of working fluid renewal for the technology based on the Allam cycle with in-cycle coal gasification is 1.6 times higher than that of a similar CO₂ cycle on methane. It is shown that the thermal efficiency of the technology is 65.5%, which is comparable with similar technologies of different architectures.

Keywords: Allam cycle; in-cycle coal gasification; carbon dioxide; thermodynamic efficiency; Texaco process; synthesis gas; methane.

For citation: Tatsenko M.E., Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. New technology based on the Allam cycle with intra-cycle coal gasification. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (6): 124-134. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-124-134.

Введение (Introduction)

В связи с необходимостью сокращения углеродного следа [1, 11, 15], как в мировой энергетике, так и в энергетике нашей страны [2] возникает необходимость перехода на новые технологии генерации электроэнергии [3, 6]. Такой переход справедлив, в том числе, и для энергетики на органическом топливе [4, 5, 29]. В этом случае требуется создание технологий, которые позволят снизить выбросы CO₂ в атмосферу. В России ситуация осложняется наличием в энергобалансе страны высокой доли генерации электроэнергии на органическом топливе.

Одним из вариантов решения проблемы является разработка технологий на основе CO₂-циклов при внутрицикловой газификации угля [6]. Наиболее известным из CO₂-циклов и наиболее проработанным является цикл Аллама [7]. В основе его работы лежит применение углекислоты в качестве рабочего тела, которую получают при сжигании метана в кислороде. Рабочее тело непрерывно обновляют за счет сжигания свежего топлива, необходимого для подвода энергии к циклу. Избыток углекислоты непрерывно выводят из цикла. В этом случае не требуется процесс секвестирования углекислоты, что делает технологию экологически привлекательной. Также непрерывно выводят из цикла и водяные пары в процессе конденсации, которые образуются при сжигании метана.

Сочетание технологии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля позволит вовлечь в энергобаланс твердое топливо без увеличения экологической нагрузки на атмосферу. Подобные технические решения рассматриваются компаниями 8 Rivers (США) [8]. Такие установки представляют несомненный интерес и требуют изучения.

В статье предлагается методика определения термической эффективности цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля. В основе методики лежат расчет горения синтез-газа и положения термодинамического анализа энергетических циклов. С использованием разработанного метода проведен анализ термической эффективности технологии производства электроэнергии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией кузнецкого угля в процессе Техасо. Проведено сравнение рассматриваемой технологии с другими технологиями генерации электроэнергии на органическом топливе.

В установке реализуют принцип интеграции внутрицикловой газификации угля с углекислым циклом Аллама [7]. Это позволяет существенно повысить экологичность производства электроэнергии при использовании угля в качестве топлива, так как выбросы загрязняющих веществ связаны только с работой газификатора [9]. Они характеризуются золой и продуктами очистки синтез-газа [10]. Выбросов в атмосферу продуктов сгорания синтез-газа нет, так как углекислый цикл Аллама реализуют при кислородном сжигании, в результате которого образуются водяные пары, выводимые из цикла в процессе конденсации и углекислота, являющаяся рабочим телом, избыток

которой выводят на захоронение.

Принцип работы установки заключается в следующем. Уголь в системе топливоприготовления (ТП) преобразуют в водоугольную суспензию ВУС (рис. 1). ВУС направляют в газификатор типа Техасо (ГФ) [9], где получают синтез-газ. Для этого в газификатор подводят кислород и охлаждающую воду, которая циркулирует в замкнутом контуре. Кроме синтез-газа в газификаторе получают золу, которую выводят на захоронение. Синтез-газ после системы очистки (ОС) при помощи компрессора (КСГ) направляют в камеру сгорания (КС) для сжигания. Продукты, полученные в результате очистки синтез-газа так же выводят на захоронение. В КС обеспечивают сжигание синтез-газа за счет кислорода, подведенного с рабочим телом. В результате образуют смесь, состоящую из углекислоты и водяных паров, доля которых невысока. Полученная смесь, по сути, является обновленным рабочим телом, которое совершает работу в CO_2 -турбине ($\text{CO}_2 - \text{T}$) [12, 30]. После CO_2 -турбины рабочее тело направляют в двухступенчатый рекуперативный теплообменник (ТО1, ТО2), где обеспечивают нагрев подводимого к КС потока. В этом процессе обеспечивается конденсация водяных паров и вывод их за пределы цикла, а также вывод избытка углекислоты на захоронение. Конденсат водяных паров используют также для производства ВУС. После рекуператора рабочее тело поступает в двухступенчатую систему повышения давления, где в качестве первой ступени выступает компрессор (К), а в качестве второй – питательный насос высокого давления (ПНВД). Здесь же обеспечивают отвод теплоты в окружающую среду через теплообменники (ТО) воздушного охлаждения. Подачу воздуха обеспечивают дутьевыми вентиляторами (ДВ). Кислород для обеспечения горения синтез-газа получают в воздухоразделительной установке (ВРУ) [13] и при помощи компрессора (КК) подают в контур рабочего тела, где он смешивается с углекислотой, после чего в виде смеси поступает в КС. Кроме того кислород подают на ГФ для обеспечения газификации угля. Электроэнергию получают в генераторе (Г).

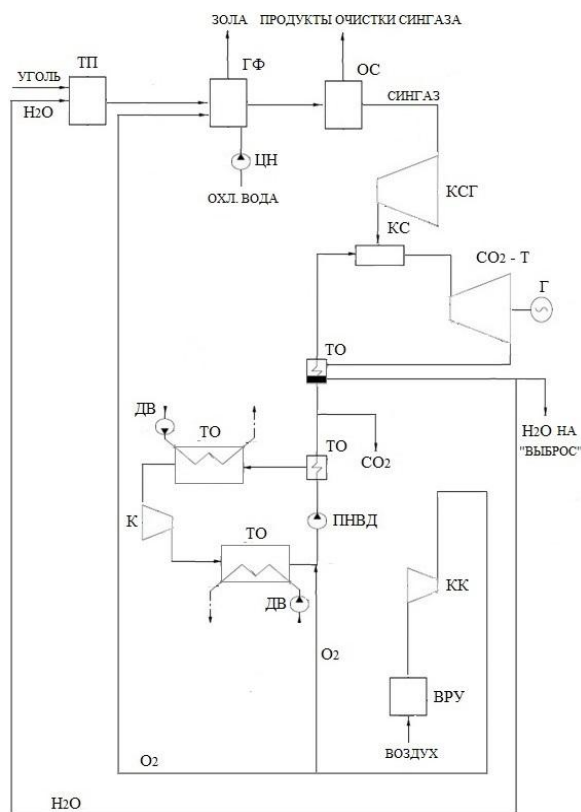


Рис. 1. Принципиальная схема установки на основе цикла Аллама и внутрицикловой газификации угля по методу Тексако [9]: ТП – топливоподача; ГФ – газификатор; ОС – система очистки сингаза; КС – камера сгорания; $\text{CO}_2\text{-T}$ – CO_2 -турбина; Г – генератор; ТО – теплообменник; К – компрессор; ПНВД – питательный насос; КСГ – компрессор синтез-газа; КК – компрессор кислорода; ВРУ – воздухоразделительная установка; ДВ – дутьевой вентилятор; ЦН – циркуляционный насос

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

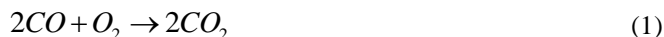
Установка обладает следующими преимуществами [14]:

- использует уголь в качестве топлива при высокой термодинамической эффективности процессов, недостижимой в других угольных технологиях генерации электроэнергии;
- отсутствуют выбросы загрязняющих веществ в виде CO_2 в атмосферу;
- обеспечивается интеграция термодинамического цикла Аллама, воздухоразделительной установки приготовления кислорода, системы приготовления водоугольного топлива и газификатора за счет организации перетоков вещества;
- установка имеет потенциал усовершенствования за счет энергетической интеграции потоков ее разных систем.

Анализ работоспособности представленной установки представляет интерес. Задачей исследования является оценка ее энергетических и массо-расходных показателей. Эти данные могут быть использованы при проектировании ее систем, узлов и агрегатов.

Материалы и методы (Materials and methods)

В предложенном методе принято, что сжигают чистый синтез-газ, при стехеометричности соотношения подводимого кислорода. В этом случае процесс горения отпоределают две реакции:



Количество углекислоты и водорода, необходимого для генерации 1 кг CO_2 можно определить по выражениям, кг/кг:

$$G_{\text{CO}} = \frac{\mu_{\text{CO}}}{\mu_{\text{CO}_2}} \quad (3)$$

$$G_{\text{H}_2} = \frac{\frac{\omega_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2}}{\omega_{\text{CO}} \cdot \rho_{\text{CO}} + \omega_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2}} \cdot \frac{\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{H}_2}}}{\frac{\mu_{\text{CO}_2}}{\mu_{\text{CO}}}} \cdot \frac{\mu_{\text{H}_2}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (4)$$

В этих выражениях μ – мольная масса вещества; ω – объемные доли вещества; ρ – плотность вещества, кг/м³ ($\rho_{\text{CO}} = 1,25$; $\rho_{\text{H}_2} = 0,0899$).

Расход синтез-газа на генерацию 1 кг CO_2 определяют по формуле:

$$G_{\text{син-газ}} = G_{\text{CO}} + G_{\text{H}_2} \quad (5)$$

Расход кислорода при сжигании синтез-газа на генерацию 1 кг CO_2 можно определить по выражению, кг/кг:

$$G_{\text{O}_2} = \frac{\mu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{CO}_2}} + G_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{\mu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (6)$$

где $G_{\text{H}_2\text{O}}$ – количество водяных паров, получаемых при генерации 1 кг CO_2 , кг/кг.

Количество теплоты [16], выделяемой при сжигании синтез-газа при генерации 1 кг CO_2 определяется формулой, МДж:

$$Q = Q_n^p \cdot \zeta_{\text{син-газ}} \quad (7)$$

В этом выражении Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания синтез-газа, МДж/кг.

В расчете термодинамической эффективности рассматривается углекислый цикл Аллама, особенность которого заключается в двухступенчатом повышении давления рабочего тела (рис. 2) [17]. В процессе 5-0 обеспечивают подвод энергии (Q) за счет сжигания топлива в камере сгорания [18]. В процессе 0-1 совершается работа в CO_2 -турбине [12]. В процессе 1-2' обеспечивают передачу теплоты в рекуператоре через сопряженный процесс 4-5. Отвод теплоты в окружающую среду ведут через процессы 2'-2 и 3'-3. Повышение давления обеспечивают сначала компрессором (процесс 2-3'), а затем насосом (процесс 3-4) [19]. В обоих случаях затрачивают работу сжатия I_k и I_n . Вывод водяных паров осуществляют после их конденсации в процессе 1-2', а вывод избытка CO_2 при его рабочем давлении.

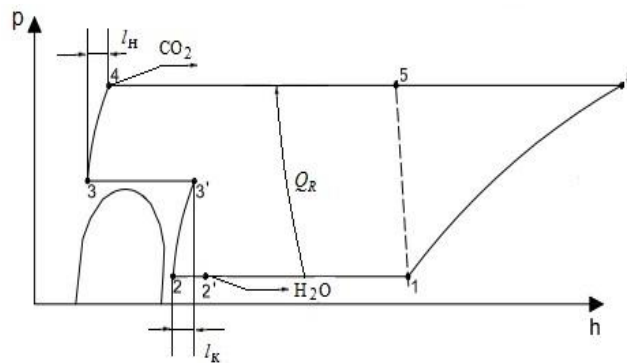


Рис. 2. Цикл Аллама в ph-диаграмме: *Fig. 2. Allam cycle in the ph-diagram: Q – supplied Q – подведенная энергия; Q_R – теплота передаваемая в рекуператоре; l_n, l_k – работа в насосе и компрессор; 0-5 – характерные точки цикла*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для представленной схемы установки термический КПД цикла с учетом работы сжатия может быть найден по выражению:

$$\eta_t = \frac{(h_0^{CO_2} - h_1^{CO_2}) + (h_0^{H_2O} - h_1^{H_2O}) \cdot \zeta_{H_2O} \cdot \delta - l_k - l_n}{\delta \cdot Q \cdot 10^3} \quad (8)$$

В этом выражении: Q – подведенная энергия [16], МДж; h – энтальпия углекислоты и водяных паров в характерных точках цикл, кДж/кг; l_k, l_n – работа сжатия в компрессоре и насосе; кДж/кг; δ – доля обновления рабочего тела в цикле.

Доля обновления углекислоты в цикле определяется выражением (9):

$$\delta = \frac{h_0^{CO_2} - h_5}{Q - h_5 - \zeta_{H_2O} \cdot h_0^{H_2O}} \quad (9)$$

Ограничениями на представленный метод являются термодинамические параметры входа [20], которыми будут определяться энтальпии рабочего тела и водяных паров в расчетных точках, а также температура окружающей среды, от которой будет зависеть давление (P₁) на выходе из CO₂-турбины [12].

Для определения термического КПД цикла (η_t) без учета работы сжатия, в выражении (8) требуется приравнять к нулю значения l_k и l_n.

Представленный метод позволяет определить массо-расходные показатели установки, которые необходимы при последующем определении в проектных расчетах параметров и характеристик ее систем и агрегатов. Показатели термической эффективности позволят в последующем получить значения энергетической эффективности представленной технологии, в том числе и расходы топлива.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

В настоящей работе рассматривается газификация в процессе Тексако. В этом случае газифицируют водоугольное топливо. Процесс позволяет получить высококалорийный газ из-за наличия воды. При газификации в таком процессе каменного (например, Кузнецкого) угля [21], может быть получен синтез-газ с низшей теплотой сгорания более 15 МДж/кг, представленный в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Состав и свойства синтез-газа [22]

Composition and properties of synthesis-gas [22]

Объемные доли						Низшая теплота сгорания		Плотность
CO	H ₂	CO ₂	N ₂	A	SO ₂	кДж/м ³	кДж/кг	кг/м ³
0,397	0,531	0,013	0,058	0	0,001	10693	15426	0,693

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В работе полагают, что в камеру сгорания синтез-газ поступает очищенный от всех примесей, тогда объемные доли его компонентов составляют $\omega_{CO} = 0,44$ и $\omega_{H_2} = 0,56$.

Расчеты ведут при параметрах входа $P_0 = 300$ бар и $t_0 = 1200^\circ\text{C}$. Давление на выходе из CO_2 -турбины составляет $P_1 = 30$ бар. Термодинамические характеристики рабочего тела определены при помощи пакетов CoolPack и WaterSteamPro в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Энтальпии рабочего тела в расчетных точках термодинамического цикла, кДж/кг
Enthalpies of the working fluid at the calculated points of the thermodynamic cycle, kJ/kg

Наименование	Обозначение	Значение
Энтальпия CO_2 на входе в CO_2 -турбину	$h_0^{\text{CO}_2}$	1876
Энтальпия H_2O на входе в CO_2 -турбину	$h_0^{\text{H}_2\text{O}}$	5078
Энтальпия CO_2 на выходе из CO_2 -турбины	$h_1^{\text{CO}_2} \approx h_5^{\text{CO}_2}$	1317
Энтальпия H_2O на выходе из CO_2 -турбины	$h_1^{\text{H}_2\text{O}}$	4075
Энтальпия CO_2 на входе в камеру сгорания	h_5	1317
Затраты энергии на работу компрессора	l_k	40
Затраты энергии на работу насоса	l_n	30

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для сжигания синтез-газа применяют кислород с чистотой выше 99,5%, его количество определяется стехиометричностью реакций горения. Все расчеты проведены при условии выхода из камеры сгорания 1 кг CO_2 (рис. 3).

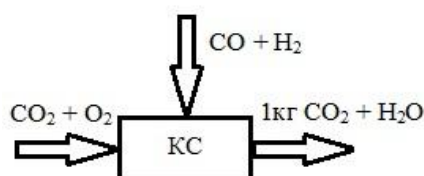


Рис. 3. К материальному балансу камеры сгорания Fig. 3. To the material balance of the combustion chamber

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты расчетов показывают, что количество топлива в виде синтез-газа, необходимого для получения на выходе из камеры сгорания 1 кг CO_2 , в ~ 4,3 раза выше, чем при реализации установки на метане, представленной в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Массо-расходные характеристики и показатели термической эффективности установки
Mass-consumption characteristics and thermal efficiency indicators of the installation

Наименование	Обозначение	Величина	
		Расчет	Цикл Аллама на метане [23, 24]
Количество, подведенного к камере сгорания CO , кг/кг CO_2	G_{CO}	0,636	-
Количество, подведенного к камере сгорания H_2 , кг/кг CO_2	G_{H_2}	0,058	-
Количество, подведенного к камере сгорания синтез-газа, кг/кг CO_2	$G_{\text{син-газ}}$	0,694	0,013
Количество, подведенного к камере сгорания O_2 , кг/кг CO_2	G_{O_2}	0,829	0,053
Теплота, подведенная при сжигании синтез-газа, МДж	Q	0,793	~0,775
Доля обновления углекислоты в цикле	δ	0,059	~0,037
КПД термический с учетом работы сжатия	η_t	0,655	~0,605
КПД термический без учета работы сжатия	η_t'	0,754	~0,69

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Это обусловлено, с одной стороны, химическим составом метана [25] и синтез-газа [10], реакциями их горения и низшей теплотой сгорания топлив. В частности, в рассматриваемом примере теплота сгорания синтез-газа более чем в 3 раза ниже, чем у метана. Этот фактор обуславливает увеличение в 1,6 раза доли обновления (δ) углекислоты в цикле, так как снижение теплоты сгорания топлива требует увеличения его расхода для обеспечения заданных параметров входа (на уровне 1200°C).

Термический КПД рассматриваемого цикла (η_t) практически сопоставим с аналогичным показателем ГТУ и с учетом работы сжатия составляет 65,5%.

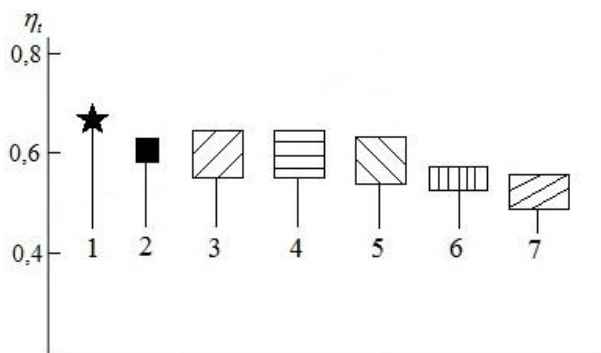


Рис. 4. КПД термический: 1 – расчетное значение для цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля; 2 – цикл Аллама при сжигании метанола [26]; 3 – CO₂-цикл с одноступенчатым повышением давления насосом [23, 24]; 4 – CO₂-цикл с конденсацией [23, 24, 27]; 5 – цикл Аллама при сжигании метана [23, 24, 28]; 6 – CO₂-цикл с одноступенчатым повышением давления компрессором [23, 24]; 7 – ПСУ на органическом топливе

Fig. 4. Thermal efficiency: 1 – calculated value for the Allam cycle with in-cycle coal gasification; 2 – Allam cycle with methane combustion [26]; 3 – CO₂ cycle with single-stage pressure increase by a pump [23, 24]; 4 – CO₂ cycle with condensation [23, 24, 27]; 5 – Allam cycle with methane combustion [23, 24, 28]; 6 – CO₂ cycle with single-stage pressure increase by a compressor [23, 24]; 7 – PSU on organic fuel

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Кроме того, по показателю η_t цикл Аллама с внутрицикловой газификацией угля сопоставим с технологиями CO₂-циклов различной конфигурации, среди которых рассмотрены варианты с одноступенчатым повышением давления насосом (3), с конденсацией (4) и с одноступенчатым повышением давления компрессором (6) (рис. 4). CO₂-циклы подобной архитектуры, наряду с циклом Аллама при двухступенчатом повышении давления сначала компрессором, а затем насосом, рассмотрены в работах [23, 24, 27, 28]. Во всех случаях в качестве топлива применяют метан. Также рассмотрен вариант цикла Аллама при сжигании метанола в кислороде (2) [26], и для этого случая показатель η_t является сопоставимым с рассматриваемой в статье технологией.

Одновременно показано, что технология на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля по показателю η_t превосходит технологии ПСУ на органическом топливе (7). Значения термических КПД ПСУ представлены на основе сведений широкого круга публикаций по ним в научной и учебной литературе.

Следует отметить, что для детального сравнения всех рассмотренных в разделе технологий производства электроэнергии требуется проведение широкого исследования, выходящего за рамки представленных в статье материалов.

Заключение (Conclusion)

Таким образом, в статье представлена методика определения термического КПД технологии генерации электроэнергии на основе углекислого цикла Аллама при внутрицикловой газификации угля. В основе метода лежат расчет горения синтез-газа и положения термодинамического анализа энергетических циклов. Методика позволяет получить массо-расходные характеристики топлива, окислителя, рабочих тел и термического КПД, что позволяет вести сравнение рассматриваемой технологии с другими.

Расчетным путем получено, что расход синтез-газа для рассматриваемой технологии в ~ 4,3 раза выше, чем для цикла Аллама при кислородном сжигании метана,

что обусловлено разницей в химическом составе метана и синтез-газа и невысокой низшей теплотой сгорания синтез-газа, которая более чем в 3 раза ниже, чем у метана. Показано, что доля обновления рабочего тела для технологии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля в 1,6 раза выше, чем у аналогичного CO₂-цикла на метане. Показано, что термический КПД технологии составляет 65,5%, что сопоставимо с аналогичными технологиями разной архитектуры.

Литература

1. Елистратов С.Л. Высокотемпературные тепловые насосы / Второй доклад «10 прорывных идей в энергетике на следующие десять лет» Ассоциации по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия». -2021 -Вып.2 - С. 87-101.
2. Технологии улавливания, полезного использования и хранения двуокси углерода (CCUS) / А.А. Осипцов, И.В. Гайда, Е.В. Грушевенко, С.А. Капитонов // Технологии по улавливанию, хранению и использованию углерода (CCUS) – технологическая основа декарбонизации тяжелой промышленности в РФ, 2022 г. – С. 1-79.
3. Садкин И.С., Щинников П.А. Способ производства электроэнергии на основе закритического CO₂-цикла. – Патент на изобретение RU2810854 C1, 28.12.2023. Заявка от 06.07.2023.
4. Пиролитическая декомпозиция углей месторождений Казахстана / Ж.М. Касенова // Томский политехнический университет, 2022 г. – С. 1-176.
5. Технологии улавливания диоксида углерода на ТЭС, его транспортировка, полезное использование и захоронение / С.А. Петелин, А.Н. Вивчар, П.В. Бублей, В.А. Сердюков, О.Ю. Сигитов // Экология, энергетика, энергосбережение. -2022 –Вып.3 – С. 1-32.
6. Обзор современных тенденций развития технологий / А.Н. Козлов // Известия РАН. Энергетика -2021 –Вып.1 – С. 130-148.
7. Rodney Allam, Scott Martin, Brock Forrest, Jeremy Fetvedt, Xijia Lu, David Freed, G. William Brown Jr.a, Takashi Sasaki, Masao Itohb, James Manninge Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture // Energy Procedia – 2017. –С. 5948-5966.
8. R. J. Allam, J. E. Fetvedt, B. A. Forrest and D. A. Freed, “The oxy-fuel, supercritical CO₂ Allam Cycle: New cycle developments to produce even lower-cost electricity from fossil fuels without atmospheric emissions,” in ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition (American Society of Mechanical Engineers, 2014).
9. Исследование газификатора Тексако в составе ПГУ / Н.В. Миронова // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 11 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014 – С. 33-37.
10. Обоснование режимов и условий организации процесса газификации твердого органического топлива на основе учета реакционной способности его взаимодействия с диоксидом углерода и водяным паром / Е.А. Бойко, А.В. Страшников // Известия РАН. Энергетика. -2021 – Вып.3 – С. 24-41.
11. IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
12. Hideo Nomoto, Masao Itoh, William Brown, Jeremy Fetvedt, “Cycle and Turbine Development for the Supercritical Carbon Dioxide Allam Cycle”, The Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE) (The Japan Society of Mechanical Engineers, 2015).
13. Интеграция воздухоразделительной установки в кислородно – топливные энергетические комплексы / С.К. Осипов, А.Н. Вегера, Д.Б. Куроптев, С.И. Шапалова // ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ". -2020 – 10 С.
14. Актуальность применения внутрицикловой газификации угля на основе CO₂ – цикла / М.Е. Таценко // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 8 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2025 – С. 382-384.
15. Глобальное изменение климата и его последствия / Л. В. Бондаренко, О. В. Маслова, А. В. Белкина, К. В. Сухарева // Вестник РЭУ им. Плеханова. – 2018. - №2. – С. 84-93.
16. Влияние состава синтез-газа на тепловой эффект и количество теплоты, выделяемой в результате его горения / М.Е. Таценко, П.А. Щинников // Енисейская теплофизика, 2025 - С. 69-70.
17. Pat. US 8596075 B2, F02C 1/00, F02C 7/08. System and method for high efficiency power generation using a carbon dioxide circulating working fluid / R. Allam et al; Assignees Palmer Labs, LLC; filed 31.08.2010; publish. 28.07.2011;– 46 p.
18. Progress Update on the Allam Cycle: Commercialization of NET Power and the NET Power Demonstration Facility / Scott Martin*, Brock Forrest, Navid Rafati, Xijia Lu, Jeremy Fetvedt, Mike

McGroddy, Bill Brown, Rodney Allam, Damian Beauchamp, David Freed // 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14. - October 2018. – 14 С.

19. Process and Carbon Footprint Analyses of the Allam Cycle Power Plant Integrated with an Air Separation Unit / D. Fernandes, S. Wang, Q. Xu, R. Buss and D. Chen // Clean Technologies. – October 2019. – №1. – pp.325-340

20. Thermodynamic optimization and equipment development for a high efficient fossil fuel power plant with zero emissions / A. Rogalev, E. Grigoriev, V. Kindra, N. Rogalev // Cleaner Production. – 2019. №236.

21. Заостровский А.Н. Петрографическая характеристика генетических типов углей Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 6 (160). С. 54-61. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-54-61, EDN: UUNSMR

22. Комплексное исследование энергоблоков электростанций и энергоустановок: монография/ под общ. ред. П.А. Щинникова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020 – 500 С.

23. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO₂ – циклов при кислородном сжигании метана / С.В. Алексеенко, П.А. Щинников, И.С. Садкин // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. –Т.30, №1. – С.89-98.

24. Analysis of energy consumption for auxiliaries of zero emissions sCO₂ power plants / I.S. Sadkin, O.V. Borush, P.A. Shchinnikov // Energy Convers Manag. 2025. Vol. 323. P. 119266.

25. Углекислотная конверсия метана в синтез – газ / О.В. Крылов // Российский Химический Журнал. Том XLIV (2000) № 1. – С. 19-33.

26. Энергетические особенности CO₂ – циклов при кислородном сжигании метанола / П.А. Щинников, И.С. Садкин, О.В. Боруш, Р.В. Романенко // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т.26, №4 – С. 150-159.

27. Концептуальная схема парагазовой утсановки с полным улавливанием диоксида углерода из продуктов сгорания / А.С. Косой и др. // Теплоэнергетика. – 2018, №9. – С. 23-32.

28. R. J. Allam, Milles R. Palmer, G. William Brown, Jeremy Fetvedt, David Freed, Hideo Nomoto, Masao Itoh, Nobuo Okita, Charles Jones, “High Efficiency and Low Cost of Electricity Generation from Fossil Fuels While Eliminating Atmospheric Emissions, Including Carbon Dioxide”, Energy Procedia, 2013. Vol. 37.P.1135 – 1149.

29. Филиппов С.П., Жданов О.В. Возможности использования технологий улавливания и захоронения диоксида углерода при декарбонизации мировой экономики (обзор). – Теплоэнергетика. – 2022.-№9. – С.5-21.

30. Разработка методики предварительного расчета проточной части газовых турбин цикла R.J.Allam на сверхкритическом диоксиде углерода / А.Н. Рогалев, Е.Ю. Григорьев, В.О. Киндра, С. К. Осипов, С.А. Павлычев //«Вестник ИГЭУ» Вып. 3 2018 г. - С. 5-14.

Авторы публикации

Таценко Михаил Евгеньевич – аспирант ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия. tatsenko2010@yandex.ru

Садкин Иван Сергеевич – аспирант ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.

Щинников Павел Александрович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой Тепловых электрических станций (ТЭС) ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия. *ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-4313-6907>

References

1. Elistratov S.L. High-temperature heat pumps / The second report is "10 Breakthrough Ideas in the energy sector for the next ten years" by the Global Energy Association for the Development of International Energy Research and Projects. -2021 -Issue.2 - pp. 87-101.

2. Technologies for carbon dioxide capture, useful use and storage (CCUS) / A.A. Osipov, I.V. Gaida, E.V. Grushevenko, S.A. Kapitonov // Technologies for carbon capture, storage and use (CCUS) – the technological basis for decarbonization of heavy industry in the Russian Federation, 2022. – P. 1-79.

3. Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. A method of generating electricity based on a supercritical CO₂ cycle. – Patent for invention RU2810854 C1, 12/28/2023. Application dated 07/06/2023.

4. Pyrolytic decomposition of coal deposits of Kaazakhstan / J.M. Kasanova // Tomsk Polytechnic University, 2022, pp. 1-176.

5. Technologies for carbon dioxide capture at thermal power plants, its transportation, useful use and burial / S.A. Petelin, A.N. Vivchar, P.V. Bubley, V.A. Serdyukov, O.Y. Sigitov // Ecology, energy, energy conservation. -2022 –Issue.3 – p. 1-32.
6. Review of modern trends in technology development / A.N. Kozlov // Izvestiya RAS. Energy - 2021 –Issue 1 – pp. 130-148.
7. Rodney Allam, Scott Martin, Brock Forrest, Jeremy Fetvedt, Xijia Lu, David Freed, G. William Brown Jr.a, Takashi Sasaki, Masao Itohb, James Manninge Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture // Energy Procedural – 2017. –pp. 5948-5966.
8. R. J. Allam, J. E. Fetvedt, B. A. Forrest and D. A. Freed, “The oxy-fuel, supercritical CO₂ Allam Cycle: New cycle developments to produce even lower-cost electricity from fossil fuels without atmospheric emissions,” in ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition (American Society of Mechanical Engineers, 2014).
9. Texaco gasifier research in the CCGT / N.V. Mironova // Science. Technologies. Innovation. Materials of the All-Russian Scientific Conference of young scientists at 11 a.m. - Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2014 – pp. 33-37.
10. Substantiation of the modes and conditions of the organization of the gasification process of solid organic fuels based on the reactivity of its interaction with carbon dioxide and water vapor / E.A. Boyko, A.V. Strashnikov // Izvestiya RAS. Energy. -2021 –Issue.3 – pp. 24-41.
11. IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
12. Hideo Nomoto, Masao Itoh, William Brown, Jeremy Fetvedt, “Cycle and Turbine Development for the Supercritical Carbon Dioxide Allam Cycle”, The Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE) (The Japan Society of Mechanical Engineers, 2015).
13. Integration of an air separation plant into oxygen–fuel systems energy complexes / C.K. Osipov, A.N. Vejera, D.B. Kuroptev, S.I. Shapalova // Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI". -20 -20 – 10 S .
14. The relevance of the use of intracycle coal gasification based on the CO₂ cycle / M.E. Tatsenko // Science. Technologies. Innovation. Materials of the All-Russian Scientific Conference of young Scientists at 8 a.m. - Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2025 – pp. 382-384.
15. Global climate change and its consequences / L. V. Bondarenko, O. V. Maslova, A.V. Belkina, K. V. Sukhareva // Bulletin of the Russian University of Economics. Plekhanov. – 2018. - №2. – C. 84-93.
16. The influence of the composition of synthesis gas on the thermal effect and the amount of heat released as a result of its gorenje / M.E. Tatsenko, P.A. Shchinnikov // Yeniseiskaya thermophysica, 2025 - pp. 69-70.
17. Pat. US 8596075 B2, F02C 1/00, F02C 7/08. System and method for high efficiency power generation using a carbon dioxide circulating working fluid / R. Allam et al; Assignees Palmer Labs, LLC; filed 31.08.2010; publish. 28.07.2011;– 46 p.
18. Progress Update on the Allam Cycle: Commercialization of NET Power and the NET Power Demonstration Facility / Scott Martin*, Brock Forrest, Navid Rafati, Xijia Lu, Jeremy Fetvedt, Mike McGroddy, Bill Brown, Rodney Allam, Damian Beauchamp, David Freed // 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14. - October 2018. – 14 P.
19. Process and Carbon Footprint Analyses of the Allam Cycle Power Plant Integrated with an Air Separation Unit / D. Fernandes, S. Wang, Q. Xu, R. Buss and D. Chen // Clean Techonologies. – October 2019. – №1. – pp.325-340
20. Thermodynamic optimization and equipment development for a high efficient fossil fuel power plant with zero emissions / A. Rogalev, E. Grigoriev, V. Kindra, N. Rogalev // Cleaner Production. – 2019. №236.
21. Zaoistrovsky A.N. Petrographic characteristics of genetic types of Kuzbass coals // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023. No. 6 (160). pp. 54-61. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-54-61, EDN: UUNSMR
22. Comprehensive study of power units of power plants and power plants: monograph/ under the general editorship of P.A. Shchinnikov. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2020 – 500 p.
23. Influence of thermodynamic parameters on the energy characteristics of CO₂ cycles during oxygen combustion of methane / S.V. Alekseenko, P.A. Shchinnikov, I.S. Sadkin // Thermophysics and aeromechanics. – 2023. –Vol.30, No. 1. – pp.89-98.
24. Analysis of energy consumption for auxiliaries of zero emissions sCO₂ power plants / I.S. Sadkin, O.V. Borush, P.A. Shchinnikov // Energy Conversmanag. 2025. Vol. 323. P. 119266.
25. Carbon dioxide conversion of methane into synthesis gas / O.V. Krylov // Russian Chemical Journal. Volume XLIV (2000) No. 1. pp. 19-33.

26. Energetic features of CO₂ cycles during oxygen combustion of methane / P.A. Shchinnikov, I.S. Sadkin, O.V. Borush, R.V. Romanenko // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2024. – Vol.26, No. 4 – pp. 150-159.

27. The final scheme of a paragasic assembly with complete capture of carbon dioxide from combustion products / A.S. Kosoy et al. // Teploenergetika. - 2018, No. 9, pp. 23-32.

28. R. J. Allam, Milles R. Palmer, G. William Brown, Jeremy Fetvedt, David Freed, Hideo Nomoto, Masao Itoh, Nobuo Okita, Charles Jones, "High Efficiency and Low Cost of Electricity Generation from Fossil Fuels While Eliminating Atmospheric Emissions, Including Carbon Dioxide", Energy Procedia, 2013. Vol 37.P.1135-1149.

29. Filippov S.P., Zhdanov O.V. Possibilities of using carbon dioxide capture and storage technologies in the decarbonization of the global economy (review). - Thermal Power Engineering. - 2022.- N9. - P.5-21.

30. Development of a methodology for the preliminary calculation of the flow path of gas turbines of the R.J.Allam cycle on supercritical carbon dioxide / A.N. Rogalev, E.Yu. Grigoriev, V.O. Kindra, S.K. Osipov, S.A. Pavlychev // "Bulletin of IGEU" Issue. 3 2018 - P. 5-14.

Authors of the publication

Mikhail E. Tatsenko – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. tatsenko2010@yandex.ru

Ivan S. Sadkin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Pavel A. Shchinnikov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0002-4313-6907>

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **14.09.2025 г.**

Отредактировано **02.10.2025 г.**

Принято **01.11.2025 г.**



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГИИ В СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ

Чичиров А.А., Разакова Р.И., Гайнутдинов Ф.Р., Гайнутдинова Д.Ф.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

khimiya_kgeu@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Водород обладает невероятной способностью накапливать энергию. Безопасное и эффективное хранение водорода определяет практическое применение газа в качестве топлива и является актуальной проблемой, требующей подробного изучения. *ЦЕЛЬ.* Провести обзор современных стационарных технологий хранения водородной энергии, проанализировать последние мировые тенденции и разработки в этой области. Определить факторы, способствующие повышению эффективности и безопасности систем хранения водорода на водородных заправочных станциях. Исследовать термодинамику и кинетику стационарного хранения водородной энергии. *МЕТОДЫ.* Основаны на анализе литературных данных, термодинамических расчетах оценки энергоемкости и безопасности систем хранения водорода, а также кинетического анализа процессов. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Систематизированы исследования в области хранения водородной энергии в стационарных системах, выявлены тенденции развития технологий. Описаны основные технические характеристики стационарного хранения водорода, проанализированы теплофизические свойства газа, осуществлены термодинамические расчеты с целью оценки эффективности технологий хранения. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Выявлен значительный прогресс в области безопасного хранения водорода, обусловленный развитием водородных технологий, а также разработкой новых материалов для его хранения. Исследование термодинамических и кинетических аспектов показало, что оптимизация этих параметров существенно повышает эффективность и надежность стационарных систем хранения водорода.

Ключевые слова: водородная энергия; технологии хранения водорода; материалы для хранения водорода; композитные сосуды под давлением; безопасность хранения водорода.

Благодарности: Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки и Минцифры России в рамках исполнения условий соглашений № 075-15-2021-1087 и № 075-15-2021-1178 от 30.09.2021 в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Для цитирования: Чичиров А.А., Разакова Р.И., Гайнутдинов Ф.Р., Гайнутдинова Д.Ф. Современные технологии хранения водородной энергии в стационарных системах: эффективность и безопасность // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 135-155. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-135-155.

MODERN HYDROGEN ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES IN STATIONARY SYSTEMS: EFFICIENCY AND SAFETY

Chichirov A.A., Razakova R.I., Gainutdinov F.R., Gainutdinova D.F.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

khimiya_kgeu@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Hydrogen possesses an exceptional ability to store energy. Safe and efficient hydrogen storage determines the practical use of this gas as fuel and represents an urgent problem requiring detailed investigation. *AIM.* To review modern stationary hydrogen energy storage technologies, analyze recent global trends and developments in this field, identify factors contributing to improved efficiency and safety of hydrogen storage systems at

hydrogen refueling stations, and investigate thermodynamics and kinetics of stationary hydrogen energy storage. **METHODS.** Based on literature data analysis, thermodynamic calculations of energy capacity and safety assessment of hydrogen storage systems, as well as kinetic analysis of relevant processes. **RESULTS.** Research in the field of stationary hydrogen energy storage has been systematized, technology development trends identified, and main technical characteristics of stationary hydrogen storage described. Thermodynamic calculations have been performed to evaluate storage technology efficiency. **CONCLUSION.** Significant progress in safe hydrogen storage has been identified, driven by advancements in hydrogen technologies and the development of new hydrogen storage materials. Investigation of thermodynamic and kinetic aspects has shown that optimizing these parameters significantly improves efficiency and reliability of stationary hydrogen storage systems.

Keywords: hydrogen energy; hydrogen storage technologies; hydrogen storage materials; composite pressure vessels; hydrogen storage safety.

Acknowledgments: The results were obtained with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation in accordance with the terms of agreements No. 075-15-2021-1087 and No. 075-15-2021-1178 of September 30, 2021, as part of the implementation of the Priority 2030 strategic academic leadership program.

For citation: Chichirov A.A., Razakova R.I., Gainutdinov F.R., Gainutdinova D.F. Modern hydrogen energy storage technologies in stationary systems: efficiency and safety. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 135-155. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-135-155.

Введение (Introduction)

Уникальные физико-химические свойства водорода выделяют его среди других видов топлива. Способность водорода накапливать энергию продемонстрирована расчетами – 1 кг газа содержит около 120 МДж (1 кВт·ч = 3,6 МДж; или 33,33 кВт·ч) энергии, и в два раза превышает энергоёмкость большинства традиционных видов топлива (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Содержание энергии в топливе*

Energy content in fuel*

Топливо	Энергетическое содержание, МДж/кг		Примечание (российские виды топлива)
	Q _н	Q _в	
Газообразный водород	120,0	141,9	проекты Росатома, НОВАТЭК
Природный газ (магистральный)	48,0-50,0	53,0-55,0	Основное топливо РФ (ГОСТ 5542-2017)
Сжиженный природный газ (СПГ)	50,0-52,0	55,0-58,0	Экспортный продукт («Ямал СПГ», «Арктик СПГ 2»)
Уголь (Кузбасс)	22,0-26,0	25,0-27,5	Основной энергетический уголь РФ
Дизельное топливо (ЕВРО-5)	42,78	45,76	ГОСТ 32511-2013, типичные марки
Бензин	42,5-44,0	45,0-46,5	Наиболее массовая марка, ГОСТ 32513-2013
Жидкий водород	120,04	141,77	Пилотные проекты (РЖД, «Ростех»)
Этанол	26,95	29,84	Ограниченное применение – биотопливо, химия

*Значения Q_н и Q_в для природного газа, угля, бензина и дизельного топлива приведены в виде диапазонов, отражающих различия в составе и свойствах различных типов и сортов этих топлив. Значения для водорода и этанола приведены для условно чистых веществ

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Несмотря на высокую удельную энергию водорода на единицу массы, его низкая плотность энергии на единицу объема (около 10 МДж/м³) затрудняет создание компактных, экономичных и безопасных решений для хранения с высокой плотностью энергии. Будущая жизнеспособность технологических решений хранения водородной энергии зависит от множества факторов, включая безопасность, экологию, нормативные требования и экономические соображения. Безопасное внедрение этих технологий требует дополнительных исследований и разработок. Они варьируются от более глубокого количественного анализа утечек водорода, ограничений, связанных с хрупкостью материалов, хранения и транспортировки водорода в очень больших объемах до соображений, связанных с оборудованием и его использованием, как в случае с газовыми турбинами и электролизерами.

Всестороннее понимание этапа хранения энергии, включая связанные с ним энергетические потребности и соображения плотности, имеет решающее значение для успешной интеграции водорода в энергетические системы. Актуальность представленной работы связана с внедрением водородных заправочных станций (ВЗС), для которых важна разработка эффективных и безопасных систем хранения.

Целью настоящего исследования является анализ проблем хранения водорода на стационарных объектах (с акцентом на ВЗС) и сравнительная оценка технологических решений. Для достижения цели поставлены задачи: систематизировать технические и эксплуатационные проблемы при хранении водорода; провести сравнительный анализ технологий хранения (ёмкость, безопасность, применимость для ВЗС); определить факторы, способствующие повышению эффективности и безопасности систем хранения водорода на водородных заправочных станциях; выявить взаимосвязь конструктивных решений и рисков утечек/деградации материалов, а также сформулировать критерии выбора решений для разных секторов (транспорт, промышленность, энергосистемы).

В связи с этим, полезно рассмотреть вызовы и проблемы хранения водорода, а также возможные технологические решения, продемонстрированные на рисунке 1.

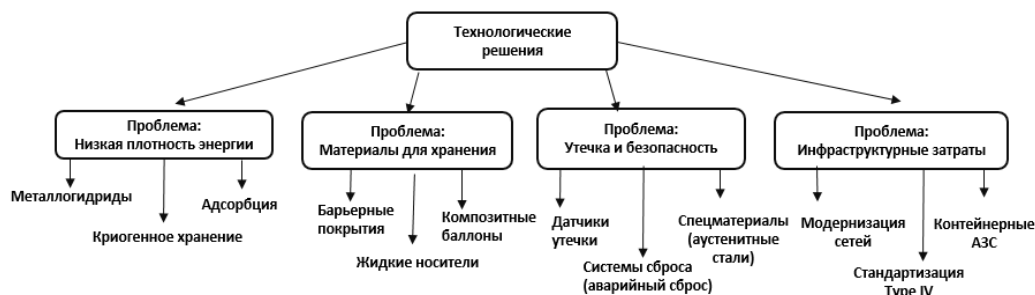


Рис. 1. Проблемы хранения водорода и возможные технологические решения

Fig. 1. Hydrogen storage challenges and possible technological solutions

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследователи работают над улучшением хранения водородной энергии, изучая условия хранения, конструкцию резервуара, изоляционный материал и потери газа, чтобы решить указанные проблемы [1, 2].

Следует отметить, что большинство исследовательских работ фокусируется на узких типах хранилищ, игнорируя сравнительный анализ их преимуществ, недостатков и применимости, кроме того отсутствует системный подход к оценке потенциала технологий для разных секторов (транспорт, промышленность, энергосети).

Литературный обзор (Literature Review)

На протяжении многих лет технологически развитые страны мира ставили хранение водорода во главу угла своих исследований [3]. Согласно литературным данным, исследователи обращают внимание на разнообразные подходы к хранению водорода, и классифицируют их на стационарные и нестационарные системы, каждая из которых имеет свои уникальные преимущества и области применения (рис. 2).

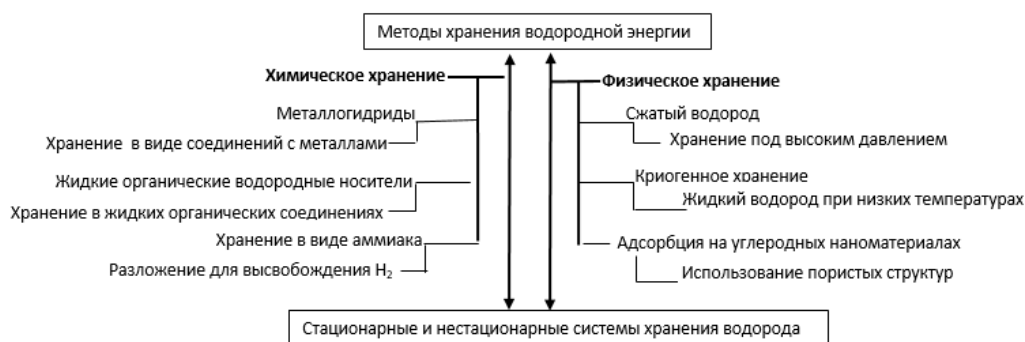


Рис. 2. Классификация методов хранения водорода Fig. 2. Classification of hydrogen storage methods

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Авторы [4-6] рассматривают состояние крупномасштабного хранения водорода в мире с использованием физических и химических методов хранения. Физическое хранение водорода заключается в его удержании в сосудах в различных физических состояниях, таких как сжатый газ, криогенная и криогенно-сжатая формы. Сравнение методов хранения водорода для стационарных и нестационарных систем, их применение в различных контекстах, отображено в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Сравнение систем хранения водорода для различных приложений

Comparison of hydrogen storage systems for various applications

Типы системы хранения	Стационарные системы хранения	Нестационарные системы хранения
Сжатый водород	Большие баллоны или резервуары под высоким давлением до 700 бар на промышленных объектах и ВЗС	Легкие композитные баллоны в транспортных средствах
Жидкие криогенные системы (около 253°C)	Изолированные резервуары для хранения жидкого водорода на объектах, где требуется хранение больших объемов газа	Криогенные танки в специализированных транспортных средствах
Металлогидридные системы	Хранение в виде соединений с металлами на промышленных объектах, выделяют водород при нагревании	Металлогидридные картриджи для переносных устройств и небольших транспортных средств
Углеродные наноматериалы	Используются в исследовательских и промышленных установках	Разрабатываются для мобильных приложений
Химические соединения	Аммиак или жидкие водородные органические носители (ЛОНС) для стационарного хранения и переработки	ЛОНС и аммиак для мобильного хранения и использования в транспорте

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Водород можно хранить в течение длительного времени благодаря его стабильным химическим свойствам. Десятилетие интенсивных и масштабных исследований привело к выявлению нескольких потенциальных систем хранения водорода, хронология развития которых представлена в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Хронология разработки технологий хранения водорода

Chronology of hydrogen storage technology development

Технология	Описание достижений
Сжатие водорода (газообразное состояние)	Первые газгольдеры для хранения водорода в газообразном состоянии 2000-е г. Усовершенствование до 700 бар (компримированный газ) [7]
Криогенное хранение (сжиженный водород, -253°C)	1980-1990-е гг. Активные исследования и пилотные проекты по криогенному хранению водорода 1997-2010 гг. Оптимизация технологий, снижение энергозатрат (криогенные резервуары для аэрокосмической отрасли) [8, 9]

Металлогидриды	1980-1990-е гг. Первые попытки хранения газообразного топлива на основе металлоорганической каркасной структуры (МОК), базовые исследования (сплавы на основе Mg, Fe, Ti) [10-13] 2013-2015 гг. Разработка гибридных систем и улучшенных сплавов (нанокристаллические структуры) [14, 15]
Адсорбционные наноматериалы	2017-2018 гг. Прорыв в углеродных материалах (графен, активированный уголь) [16, 17]
Жидкие органические водородные носители (ЛОНС) и аммиак	2010 г. Активные исследования ЛОНС (носители на основе толуола, пергидрола) [18, 19] 2015-2020 гг. исследование каталитического разложения аммиака ($\text{NH}_3 \rightarrow \text{H}_2 + \text{N}_2$) [20]
Подземные хранилища	1970 г. – соляные каверны 2020 г. эксперименты с жидким водородом в нанопорах и подземными резервуарами для промышленных масштабов [21, 22]
Гибридные системы хранения водорода	2017-2018 гг. Пилотные проекты гибридных систем (комбинация сжатия и охлаждения), повышение плотности хранения и снижение энергозатрат за счёт синергии двух методов [23]

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Хранение сжатого водорода.

Сжатый газообразный водород для хранения является наиболее популярным и широко используемым методом из-за его технической простоты и быстрой кинетики заполнения и высвобождения. Объёмная плотность водорода при использовании этого метода очень низкая, если давление при хранении водорода ниже 20 МПа. Повышение давления при хранении может увеличить плотность водорода, но, в свою очередь, значительно увеличит стоимость резервуара и потребление энергии для сжатия, что описано в статье исследователей [24].

В зависимости от применения, газообразный водород сжимают до 200-1000 бар. Для стационарных установок, где весовая и объёмная энергоёмкость не критичны, обычно используют 200-400 бар. При нормальных условиях водород имеет низкую массовую плотность (0.089 кг/м^3) и низкую объёмную плотность энергии ($10,68 \text{ МДж/м}^3$). При повышении давления до 700 бар объёмная плотность массы (концентрация) возрастает до $\sim 42 \text{ кг/м}^3$, объёмная плотность энергии достигает $\sim 5020 \text{ МДж/м}^3$. На рисунке 3 представлена массовая плотность водорода при хранении в газообразном при разном давлении, а также жидком и твердом состояниях.

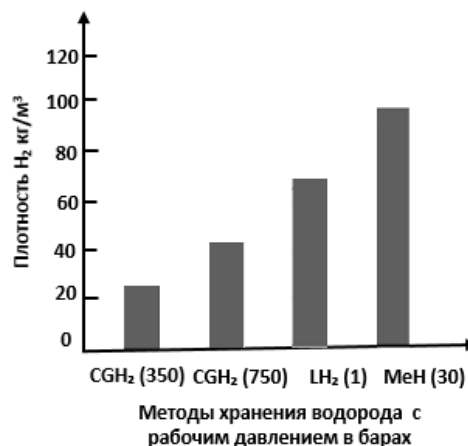


Рис. 3. Плотность водородной энергии: Fig. 3. Hydrogen energy density: CGH₂ – compressed CGH₂ – сжатый газ; LH₂ – криогенная жидкость; MeH – металлогидриды

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Энергозатраты на сжатие водорода составляют примерно 3% от его низшей теплоты сгорания при сжатии до 350 бар и 10% при сжатии до 700 бар [25]. Кроме того, при повышении уровня давления при хранении, исследователи отмечают возникающие проблемы с безопасностью [26, 27].

В литературе обсуждаются преимущества и ограничения технологий сжатия водорода: механических, электрохимических, гидравлических и сжатие на основе сорбции [28] (рис. 4).

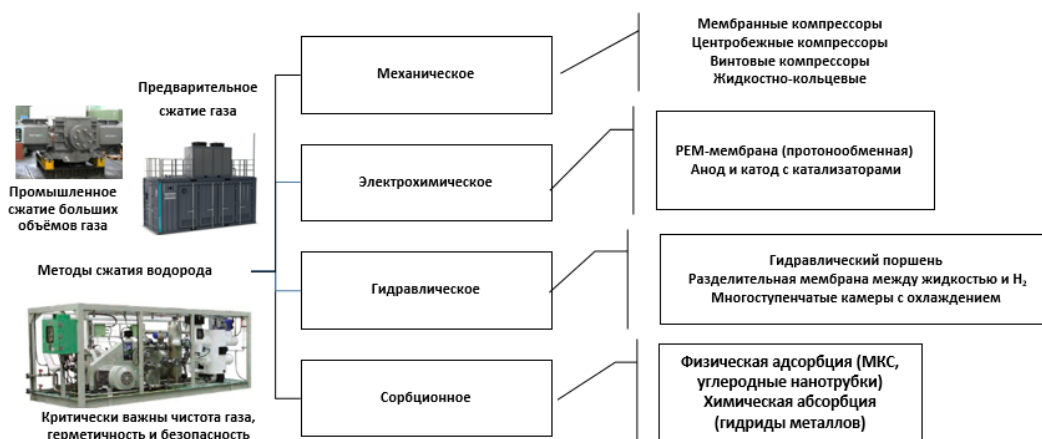


Рис. 4. Технологии сжатия водорода

Fig. 4. Hydrogen Compression Technologies

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Резервуар газообразного хранения водорода – прочный металлический контейнер из стали или композитных материалов, оборудованный системами контроля давления и температуры, а также предохранительными клапанами обеспечения безопасности. Внутри резервуара находятся изоляционные материалы минимизации теплопередачи (рис. 5). Для промышленного применения, где используется или регулируется большое количество водорода, применяется резервуар типа I. Этот тип может выдерживать давление от 150 до 300 бар и является самым дешёвым на рынке. Резервуары типа II в основном используются для стационарного применения благодаря их высокой прочности, которая позволяет хранить газ при очень высоком давлении. Резервуары типов III и IV предназначены для переносного применения, где важна экономия веса [29].

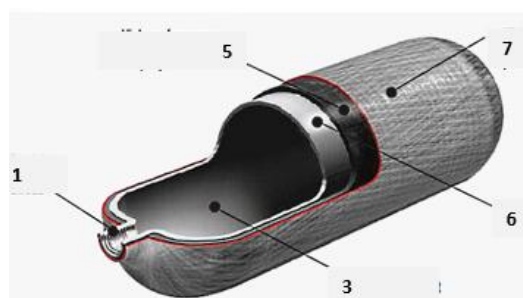
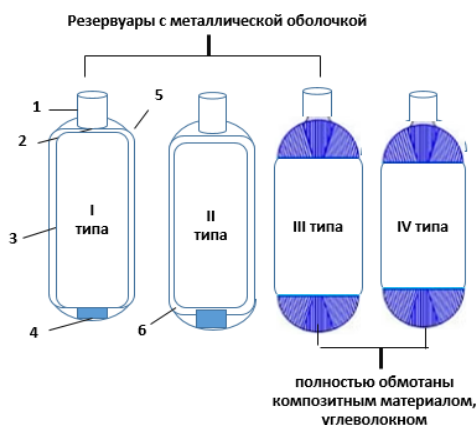


Рис. 5. Резервуары газообразного хранения водорода: 1 – клапан; 2 – горловина; 3 – область для размещения водорода; 4 – заглушка; 5 – внешняя оболочка; 6 – внутренняя оболочка

Fig. 5. Gaseous hydrogen storage tanks: 1 – valve; 2 – neck; 3 – area for placing hydrogen; 4 – plug; 5 – outer shell; 6 – inner shell

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полимеры являются важнейшими материалами для систем хранения водорода под высоким давлением, особенно в резервуарах для хранения водорода типа IV и V. Авторы [29] указывают на серьёзные проблемы для полимерных материалов в экстремальных условиях эксплуатации при давлении до 875 бар и температурах от -40°C до 85°C .

Хранение жидкого водорода.

Водород сжижают, а затем хранят в криогенных резервуарах при температуре 20 К ($-253,15^{\circ}\text{C}$). Метод обеспечивает более высокий уровень безопасности, чем хранение в сжатом виде, благодаря более низкому давлению при хранении (атмосферному) и более высокой плотности хранения и энергии, $70,9 \text{ кг/м}^3$ и 8508 МДж/м^3 соответственно. Авторы [30] отмечают, что требуемая энергия для процесса сжижения является существенным недостатком технологии, так как на него приходится 35% энергозатрат H_2 .

Эффективность криогенного хранения имеет некоторые трудности. Поддерживать температуру водорода на уровне 20 К сложно, и потери при испарении являются одним из

существенных недостатков технологии. В статье [31] показано, что для небольших резервуаров потери водорода могут составлять около 4% в день. Использование резервуаров для хранения жидкого гелия уменьшит потери до 0,04% в день, что сделает технологию жизнеспособной [32]. Резервуары для хранения жидкого гелия обладают невероятно низкими тепловыми потерями, благодаря многослойной изоляции и азотному охлаждению, которое в них используется.

Из-за высокой сложности системы стоимость технологии является ещё одним препятствием для внедрения. Жидкий водород является хорошим вариантом, но в основном для крупномасштабных применений, например, в космической отрасли [33].

Так как основные риски, связанные с безопасностью этой технологии, обусловлены высоким уровнем испарения, ведутся исследования направленные на улучшение теплоизоляции резервуаров для снижения потерь от испарения. Наиболее интересным методом изоляции является пассивная тепловая защита, включающая использование различных типов композитных материалов, многослойных изоляционных материалов, экранов с паровым охлаждением и вакуума [34]. Изоляционная конструкция резервуара для хранения жидкого водорода параллельного типа представлена на рисунке 6.

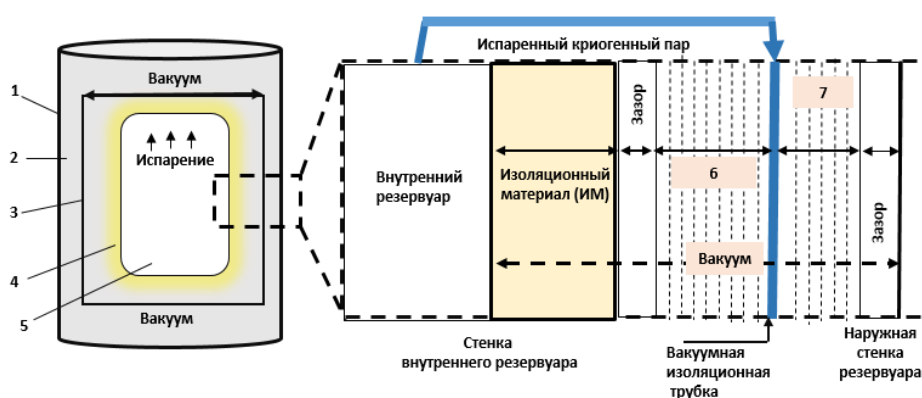


Рис. 6. Многослойная конструкция резервуара для водорода Fig. 6. Multilayer hydrogen tank structure

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Описание слоев: 1 – внешний слой из алюминиевой оболочки (защита от механических повреждений); 2 – многослойная изоляция с использованием аэрогеля; 3 – барьерный слой из углеродного волокна; 4 – изоляционный материал; 5 – внутренний слой из полимерной подложки; 6 – внутренний многослойный изоляционный материал; 7 – внешний многослойный изоляционный материал.

Размер, форма и теплоизоляция резервуара влияют на скорость испарения водорода из резервуара для хранения жидкого водорода из-за утечки тепла. Сферическая форма теоретически является идеальной, поскольку у неё наименьшее соотношение площади поверхности к объёму, а напряжение и деформация могут равномерно распределяться по стенкам резервуара. Однако из-за сложностей в производстве таких резервуаров они стоят дорого [35]. При такой конструкции, обладающей высокой вместимостью, скорость испарения значительно снижается. Потери при кипении из-за утечек тепла зависят от соотношения площади поверхности к объёму.

Хранение водорода в твердом состоянии.

Хранение водорода в твёрдом состоянии – это метод, при котором атомы или молекулы водорода прочно связываются с материалами. Хранение водорода на основе материалов – перспективный метод, так как объёмная плотность водорода в материалах обычно превышает $100 \text{ kg H}_2 \text{ m}^{-3}$ [36]. Таким образом, можно использовать относительно небольшой резервуар для хранения большого количества водорода.

В литературе широко обсуждаются многие виды материалов для хранения водорода, включая обычные гидриды металлов (МН) или сплавы, комплексные гидриды, материалы на основе углерода, металлоорганические каркасы (МОК) и др. Разрабатываются передовые методы образования газовых гидратов в статистических условиях хранения водорода [37]. Авторы [38]. вносят свой вклад в дискуссию исследуя кинетику образования гидратов водорода в статических системах без использования дополнительных механических методов.

В настоящее время практическое применение нашли лишь некоторые категории

материалов для хранения водорода, такие как сплавы АВ5-типа на основе редкоземельных металлов, сплавы АВ-типа или АВ2-типа на основе титана [39]. Исследования по-прежнему направлены на изучение кинетики сорбции водорода в твердотельных системах хранения, так как этот процесс сильно зависит от скорости реакции гидрирования/дегидрирования материалов для хранения. По мнению авторов, [40] подача водорода с достаточной скоростью является технической проблемой для твердотельного метода хранения.

Ни один способ хранения в идеальных условиях не может считаться оптимальным для всех сфер применения, и каждый способ требует интенсивной работы, чтобы стать приемлемым для использования в энергетике. При оценке эффективных вариантов хранения водорода в стационарных условиях необходимо рассматривать целостную систему, объединяющую экономические, экологические, социальные и технические аспекты (рис. 7). Каждый критерий разбит на несколько подкритериев, чтобы отразить многогранность устойчивых показателей, оценивающих различные технологии хранения водорода.

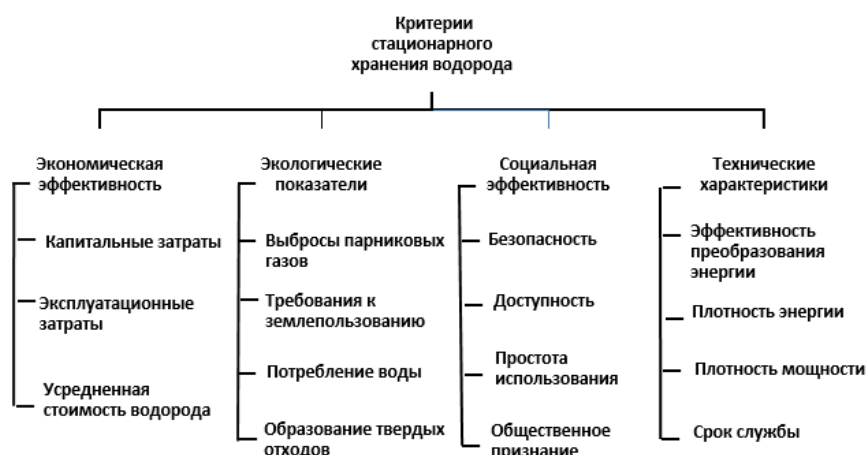


Рис. 7. Критерии эффективности стационарного хранения водородной энергии

Fig. 7. Efficiency criteria for stationary hydrogen energy storage

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Процесс принятия решений в отношении устойчивых стационарных систем хранения водорода требует баланса между этими многогранными критериями эффективности. Если разложить каждый критерий на конкретные, измеримые компоненты, процесс выбора технологии хранения водорода станет более прозрачным, всеобъемлющим и надёжным, что облегчит разработку и внедрение действительно устойчивых решений [41]. Методы хранения водорода с высокой плотностью (сжижение или сжатие под высоким давлением), требуют значительных энергетических затрат как на хранение, так и на транспортировку. Эти затраты следует учитывать при оценке общей эффективности и экологической устойчивости водорода в качестве энергоносителя. С учетом последних достижений и ожидаемого широкого применения водорода можно предположить, что сжатие газообразного водорода остается наиболее перспективным методом, особенно для средних и малых масштабов использования.

Исследования также направлены на решение проблем безопасности хранения водорода (табл. 4). Большинство авторов [42] указывают, что наиболее безопасным методом является хранение водорода в твердом виде.

Таблица 4

Table 4

Сравнительный анализ безопасности хранения водорода

Comparative Analysis of Hydrogen Storage Safety

Тип хранения	Риски, аспекты безопасности
Сжатый водород	H ₂ находится под высоким давлением в резервуарах, случайное высвобождение газообразного водорода может привести к пожару или взрыву. Резервуары спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы выдерживать высокое давление, и их необходимо регулярно проверять на наличие утечек

Жидкий водород	Жидкий H_2 быстро испаряется, если сосуд для хранения повреждён; вызывает сильные холодовые ожоги и легко воспламеняется при взаимодействии с источником возгорания. Резервуары для жидкого водорода состоят из двух металлических резервуаров, разделённых вакуумной рубашкой, заполненной изоляционным материалом
Металлогидридные системы	Твердые вещества поглощают и выделяют H_2 . Металлогидриды вступают в бурную реакцию с влажным воздухом. Резервуары для хранения металлогидридов имеют вес от 250 до 300 кг, что в четыре раза больше, чем резервуары для бензина.
Химическое хранение гидридов	Химические гидриды легко воспламеняются или взрываются и могут выделять токсичные побочные продукты при разложении или взаимодействии с водой. Процесс высвобождения водорода из гидридов требует контроля температуры и давления, что добавляет потенциальные риски в эксплуатации таких систем
Хранения на основе углерода	Водород накапливается в порах углеродного материала, создавая потенциальную опасность взрыва при быстром высвобождении водорода. Опасности включают возможность утечек водорода из-за его высокой подвижности, риск воспламенения и взрывов при утечках, потенциальную деградацию адсорбционных свойств материалов, вред здоровью из-за возможного выделения частиц углерода

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Развитию и коммерциализации водородной энергетики в настоящее время препятствует проблема структурной целостности, связанная с резервуарами для хранения водорода. Вследствие этого значительный объём исследований посвящен материалам и конструкциям, минимизирующим риски, связанные с хранением водорода. Существенное технологическое препятствие разработки стационарных систем хранения водорода – отсутствие подходящих материалов для резервуаров хранения. В статьях авторов [43, 44] представлен всесторонний анализ текущих тенденций исследований и обсуждаются будущие направления в этой области. Продолжается изучение передовых материалов для хранения водорода, включая гидриды металлов, материалы на основе углерода, металлоорганические каркасы (МОК) и наноматериалы. В таблице 5 приведены характеристики материалов, используемых в различных стационарных методах хранения водородной энергии.

Таблица 5

Table 5

Сравнение материалов для хранения водорода

Comparison of materials for hydrogen storage

Материал конструкции	Характеристики
Композитные резервуары (углеволокно)	Хранение газообразного H_2 (высокое давление). Высокая прочность, малый вес, устойчивость к коррозии; высокая стоимость, сложность ремонта; применяются в транспорте, на водородных заправках
Аустенитная нержавеющая сталь	Хранение жидкого H_2 (криогенный). Устойчивость к низким температурам, прочность, риск водородного охрупчивания; промышленные хранилища
Металл-органические каркасы (МОК)	Адсорбционное хранение H_2 . Высокая плотность хранения, низкое давление, требуют охлаждения, дорогие материалы; лабораторные системы, малые объёмы
Слоистые конструкции (Al/полимеры)	Газообразный/жидкий H_2 Устойчивость к утечкам, гибкость; ограниченный срок службы при высоких температурах
Нанотрубочные структуры	Твердотельное (гидриды). Высокая безопасность, стабильность, низкая скорость загрузки/выгрузки; энергетические системы

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Более 60% рассмотренных исследований посвящены гидридам металлов и сплавам для хранения водорода [45]. Проблемы, с которыми сталкиваются в настоящее время при

хранении водорода, подчёркивают существующие ограничения в материалах для хранения водорода, а также необходимость повышения ёмкости и кинетики хранения.

В литературе мало данных об эффективности системы хранения водорода, утечек газа для сжатого водорода и металлического гидрида. Исследователи [46] используют для моделирования испарения, точного определения массового расхода и температуры отходящего газа в резервуарах – коммерческое программное обеспечение CFD ANSYS FLUENT (2020 R2). Исследователями разработаны комплексные модели резервуара для хранения жидкого водорода с различными параметрами изоляции и условиями эксплуатации. Модели имитирует поведение водорода в резервуаре в зависимости от времени, спрогнозировано время бездействия и скорость испарения. Важные результаты параметрического анализа заключаются в следующем. Во-первых, существует оптимальное количество слоев многослойной изоляции, во-вторых, распорки из шёлковой сетки обладают хорошими изоляционными свойствами, достигающими $1,01 \text{ Вт/м}^2$ и наконец, многократное открытие и закрытие вентиляционного клапана в определённом диапазоне давления значительно сокращает потери водорода во время вентиляции, уменьшая массу испарения за 6 ч на 92,9%.

Существуют системы мониторинга технического состояния резервуаров для хранения водорода на основе гибкой сенсорной технологии для управления состоянием конструкций для хранения водорода [47]. Сначала обобщаются наиболее распространенные способы повреждения, вызванные различными факторами в течение срока службы для резервуаров для хранения водорода четырех типов. Ожидается, что гибкая сенсорная технология сыграет решающую роль в будущем при создании систем мониторинга технического состояния резервуаров для хранения водорода.

В России исследования в области утечек водорода при стационарном хранении актуальны, но крайне недостаточно освещены в литературе. Несмотря на то, что этот прогресс обнадеживает, существуют сложные проблемы, такие как неконтролируемые термодинамические изменения и низкая кинетика процессов сорбции/десорбции водорода при его хранении, которые необходимо тщательно изучить.

Для дальнейшего успешного развития этой области науки и техники необходимо, чтобы насущные потребности в прикладных исследованиях и глубокое понимание основных принципов находились в сбалансированном соотношении друг с другом. Обзор текущих исследований в области хранения водорода предоставил ценную информацию и способствует глубокому пониманию технологических вызовов и перспективных решений, необходимых для разработки эффективных и безопасных систем хранения, которые могут поддерживать переход к устойчивой энергетике и быть использованы на водородных заправочных станциях (ВЗС).

Материалы и методы (Materials and methods)

В настоящем исследовании рассматриваются хранение сжатого водорода с точки зрения эффективности применения на ВЗС. Данный вариант выбран после анализа литературы и многоаспектного сравнения альтернатив хранения водорода по следующим категориям: эффективность хранения, энергоёмкость, стоимость, безопасность, кинетика и долговечность. Анализ показывает, что сжатый водород является лучшей альтернативой для ВЗС.

Эффективность водородной системы зависит от термодинамических процессов, связанных с хранением и передачей топлива. Состояние работы установок для хранения газообразного водорода моделируется уровнем водорода в накопительном оборудовании

(HST (Hydrogen Storage Tank) – ёмкость для хранения водорода) S_t^{HST} (м^3) и количеством водорода, закачиваемого $H_t^{\text{HST-CH}}$ или отбираемого $H_t^{\text{HST-DIS}}$ за период, а также предельным диапазоном уровней хранения водорода, как показано в уравнениях 1 и 2:

$$S_{t-1}^{\text{HST}} = S_t^{\text{HST}} + H_t^{\text{HST-CH}} \eta^{\text{HST-CH}} \Delta t - \frac{H_t^{\text{HST-DIS}}}{\eta^{\text{HST-DIS}}} \Delta t \quad (1)$$

$$\underline{S_t^{\text{HST}}} \leq S_t^{\text{HST}} \leq \overline{S_t^{\text{HST}}} \quad (2)$$

где $H_t^{\text{HST-CH}}$ и $H_t^{\text{HST-DIS}}$ – это скорости закачки и отбора водорода в установках хранения, м³/ч, $\eta^{\text{HST-CH}}$ и $\eta_t^{\text{HST-DIS}}$ – коэффициенты эффективности закачки и отбора, S_t^{HST} и $\overline{S_t^{\text{HST}}}$ – минимальный и максимальный диапазон уровня хранения (м³), а Δt – временной интервал (ч). Для резервуаров хранения водорода или других относительно небольших установок режимы закачки и отбора могут переключаться мгновенно, что обычно моделируется бинарными переменными и ограничениями-неравенствами с временным разрешением 30 мин или 1 час, как показано в уравнениях 3-5, где $\delta_t^{\text{HST-CH}}$ и $\delta_t^{\text{HST-DIS}}$ – бинарные переменные, обозначающие действия закачки/отбора, а $H_t^{\text{HST-CH}}$ и $H_t^{\text{HST-DIS}}$ – максимальные значения скоростей закачки/отбора (м³/ч).

$$0 \leq H_t^{\text{HST-CH}} \leq \delta_t^{\text{HST-CH}} \overline{H_t^{\text{HST-CH}}} \quad (3)$$

$$0 \leq H_t^{\text{HST-DIS}} \leq \delta_t^{\text{HST-DIS}} \overline{H_t^{\text{HST-DIS}}} \quad (4)$$

$$\delta_t^{\text{HST-CH}} + \delta_t^{\text{HST-DIS}} \leq 1 \quad (5)$$

Модель (1)-(5) основана на стандартном подходе к управлению хранилищами энергии, где бинарные переменные исключают одновременную зарядку и разрядку, а ограничения по ёмкости и мощности соответствуют международной практике моделирования водородных систем (в том числе на ВЗС) [52]. Данная модель используется для управления энергосистемами, где водородные хранилища взаимодействуют с источниками (электролизерами) и потребителями (топливными элементами). Ограничения S_{\min}/S_{\max} предотвращают переполнение или опустошение резервуаров. Бинарные переменные отражают физическую невозможность одновременной зарядки и разрядки.

Термодинамические параметры хранения сжатого водорода.

Для повышения энергоэффективности хранения водорода применяется многоступенчатое сжатие. В большинстве работ [48] предлагается трёхступенчатая система, моделирующая хранение газообразного водорода в три этапа:

1. Адиабатическое дросселирование при заполнении резервуара. При поступлении водорода из магистрали высокого давления в резервуар происходит падение давления (дросселирование). Так как, для водорода при комнатной температуре коэффициент Джоуля-Томсона отрицателен, температура газа снижается.

2. Теплопередача – выравнивание температуры газа с температурой стенок резервуара.

3. Изотермическое сжатие – повышение давления за счет подачи дополнительных порций газа. Процесс дросселирования считается мгновенным и адиабатическим (без теплообмена с внешней средой), а работа расширения/сжатия не передается внешним устройствам. Параметр, определяющий изменение температуры при расширении, – это коэффициент Джоуля-Томсона, зависящий от температуры и давления. С помощью коэффициента Джоуля-Томсона определяется температура сжатого водорода после поступления в резервуары.

На рисунке 8 представлена Т-S диаграмма трехступенчатого сжатия газообразного водорода от 1 бар до 360 бар с промежуточным охлаждением. Обозначены термодинамические точки процесса: 1 – исходное состояние (1 бар); 2 – состояние после первой ступени изэнтропического сжатия (температура определяется по таблицам [49]); 3 – состояние после промежуточного охлаждения (процесс 2-3 при $p=\text{const}$). Точки 4, 5, 6, 7 – аналогично для последующих ступеней сжатия и охлаждения (процессы 4-5, 6-7 при $p=\text{const}$). Конечная точка – состояние после последней ступени сжатия (360 бар).

Линии изэнтропического сжатия (1-2, 3-4, 5-6) позволяют сравнить реальный процесс с идеальным.

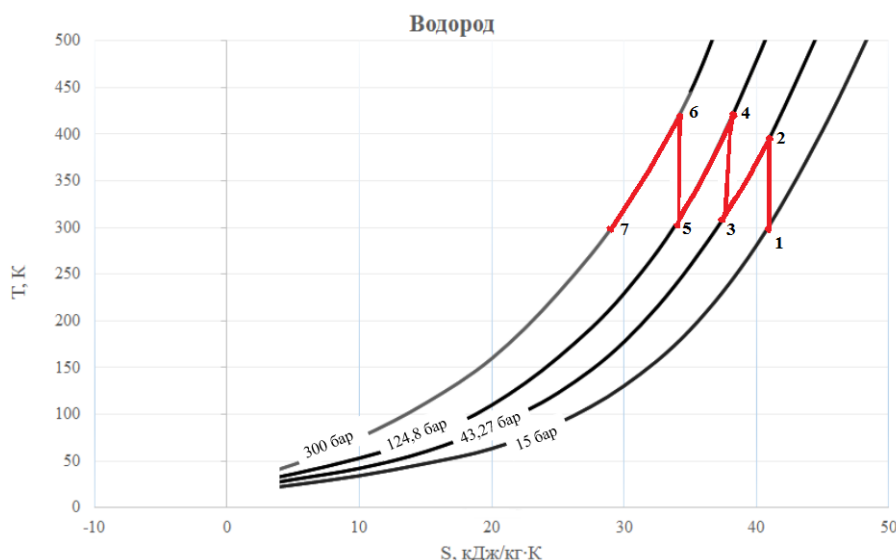


Рис. 8. T-S диаграмма сжатия газообразного водорода от 1 бар до 360 бар. Термодинамические точки на диаграмме T-S

Fig. 8. T-S diagram of gaseous hydrogen compression from 1 bar to 360 bar. Thermodynamic points on the T-S diagram

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

T-S диаграмма используется для оценки термодинамической эффективности и потерь при сжатии [49].

Эффективность хранения водорода при разных давлениях – это показатель, отражающий соотношение полезной энергии, получаемой из накопленного водорода, к энергии, затраченной на его сжатие и хранение при различных уровнях давления. Чем выше эффективность, тем меньше потеря энергии при хранении и последующем использовании водорода. Энергия, затрачиваемая на повышение давления, зависит от начального уровня. Сжать от 350 до 700 бар проще, чем от 1 до 350 бар, если водород сразу производить под давлением, можно снизить энергозатраты на последующее сжатие до 700 бар. Для снижения энергозатрат важно: использовать компрессоры с высоким КПД, оптимизировать диапазоны давлений, применять материалы, устойчивые к водородной хрупкости, так как эффективность хранения водорода под давлением ограничена его физико-химическими свойствами.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Для водородной заправочной станции контейнерного типа, производительностью 8,5 кг H_2 /сутки [50] предложен стационарный комплекс для хранения, сжатия и распределения водорода.

Комплекс выполняет полный цикл работы: заправка баллонов → сжатие газа → хранение → подача потребителю. Газ из внешнего источника (электролизера для водорода) (рис. 9), под давлением на выходе 0,5 бар (что соответствует первой ступени сжатия), поступает в мембранный двухступенчатый компрессор для сжатия водорода Ковинт КСВД-М 1-5/5-400- H_2 (рис. 10).



Рис. 9. Генератор водорода HyClever Pro-2.0

Fig. 9. Hydrogen generator HyClever Pro-2.0

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Хотя теоретическая модель предполагает трехступенчатое сжатие, для ВЗС малой производительности 8,5 Н₂ кг/сутки, выбран двухступенчатый мембранный компрессор Ковинт КСВД-М. Его конструкция предотвращает утечки водорода и исключает контакт газа с маслом, что критично для безопасности. При сжатии от 0,5 до 400 бар учтен эффект Джоуля-Томсона: расчетное падение температуры на входе составляет ~12 К (расчет по [48]).



Рис. 10. Мембранный компрессор Ковинт КСВД-М 1-5/5-400-Н₂ Fig. 10. Kovint KSVD-M 1-5/5-400-H₂ diaphragm compressor

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Компрессор сжимает газ до нужного давления 400 бар. Сжатие газа осуществляется за счет колебаний гибкой мембраны (изготавливается из материалов, устойчивых к водороду, композитов). Газ находится в изолированной камере, что исключает загрязнение маслом и утечки. Водород – самый легкий и летучий газ, способный проникать через микротрещины и вызывать охрупчивание металлов. Поэтому в таких компрессорах используются: двойные мембраны с датчиками разрыва, вакуумная продувка для удаления остаточного Н₂ из камеры, системы охлаждения для предотвращения перегрева [51].

Сжатый газ через рампу распределяется по баллонам. Водород хранится в баллонах до момента использования. Используется система газовых баллонов БМКБ 4-80-40 80 л – 4 шт, комплект оборудования, предназначенный для хранения и подачи сжатого альтернативного топлива для транспортных средств (автомобилей, автобусов, спецтехники) (табл. 6). На основании расчетов по уравнениям (1)-(5) определено, что выбранный комплект баллонов (4×80 л при давлении до 400 бар) обеспечивает необходимый запас водорода для бесперебойной работы станции в течение суток, а также соответствует требованиям по безопасности и эксплуатационной гибкости. Управление скоростью отбора по уравнениям (3)-(4) гарантирует, что массовый расход не превысит 3,6 кг/мин. Применение данной модели позволило корректно подобрать объем и количество баллонов, и оптимально управлять процессами заправки и отбора водорода в реальном режиме времени, что важно для эффективной работы водородной заправочной станции.

Таблица 6

Table 6

Комплект газового оборудования для хранения водорода на ВЗС
Hydrogen storage gas equipment set for hydrogen refueling station (HRS)

Компоненты системы	Характеристики
Баллоны по 80 л (4 шт)	Емкости из прочного материала, рассчитанные на хранение БМКБ под высоким давлением (обычно 400 бар). Компактные и легкие, что важно для монтажа на транспортных средствах
Трубка стальная в оплетке	Гибкий, но прочный элемент для подключения баллонов к системе. Оплетка обеспечивает защиту от механических повреждений и перепадов давления
Заправочный вентиль	Устройство для подключения системы к заправочной станции. Через него баллоны заполняются сжатым газом

Комплект метизов	Крепежные элементы (болты, гайки, шайбы) для монтажа баллонов и других компонентов системы на раму или кузов транспортного средства
Баллонный вентиль	Управляет подачей газа из баллонов. Обычно оснащен предохранительным клапаном для сброса избыточного давления
Редуктор понижения давления	Снижает давление газа с 400 бар до рабочего уровня (например, 8-10 бар), необходимого для двигателя или оборудования
Шланг высокого давления с наконечником	Соединяет редуктор с двигателем или потребителем газа, обеспечивая герметичную подачу топлива

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Все компоненты системы рассчитаны на работу под высоким давлением и проходят строгие испытания. Стальные трубки в оплетке и предохранительные клапаны минимизируют риски утечек или разрывов.

При необходимости газ из баллонов через рампу подается к конечному оборудованию. Газовая рампа (наполнительно-разрядная) служит «узлом коммутации»: через нее происходит наполнение баллонов газом и его раздача потребителям. Основные компоненты газовой (наполнительной и разрядной) рампы отображены в таблице 7 и на рисунке 11.

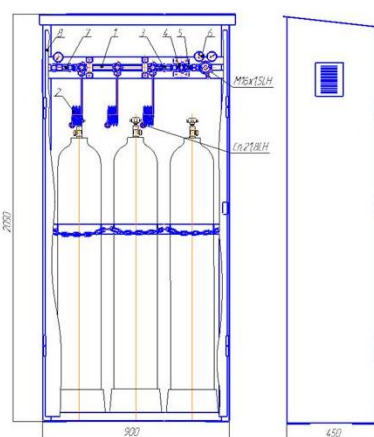


Рис. 11. Газовая рампа для водорода для ВЗС контейнерного типа (полигон КГЭУ)

Fig. 11. Hydrogen gas manifold for container-type hydrogen refueling station (KSPEU test site)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 7

Table 7

Назначение компонентов газовой (наполнительной и разрядной) рампы

Purpose of components of the gas manifold (filling and discharge)

Компоненты	Назначение
Стойка (рама)	Конструкция из металла, на которой закреплены баллоны, трубопроводы и арматура. Обеспечивает устойчивость и безопасное размещение оборудования
Баллоны для водорода	Высокопрочные емкости, рассчитанные на хранение водорода под высоким давлением (400 бар). Изготавливаются из композитных материалов с защитным
Трубопроводы (трубы)	Система труб из материалов, устойчивых к водороду (нержавеющая сталь марки 316L). Предназначены для транспортировки водорода между баллонами, заправочной станцией и потребителем
Наполнительная и разрядная арматура	Наполнительная часть: клапаны, соединители и редукторы для подключения к источнику водорода (электролизеру или заправочной станции). Разрядная часть: вентили, регуляторы давления и предохранительные клапаны для контролируемой подачи водорода к потребителю
Система безопасности	Датчики утечки водорода, аварийные клапаны, огнезащитные элементы. Водород крайне летуч и взрывоопасен, поэтому безопасность – важный аспект конструкции

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При эксплуатации системы строго соблюдаются нормативы (ISO 16111, ГОСТ Р 56352-2015) и проводится регулярная проверка герметичности, так как водород способен диффундировать через многие материалы и вызывать охрупчивание металлов. Все компоненты должны быть сертифицированы для H_2 из-за его летучести и взрывоопасности. Такая система требует профессионального проектирования и монтажа, особенно для взрывоопасных газов. Важные моменты при интеграции системы: совместимость компонентов. Материалы должны быть устойчивы к газу, давление на выходе компрессора должно соответствовать максимальному давлению баллонов.

Заключение (Conclusion)

Водород является носителем энергии и должен быть интегрирован в энергетическую цепочку с высоким уровнем эффективности. Проведенный анализ актуальных исследований и инженерных разработок в области стационарных систем хранения, подчеркивает значимость исследований в области безопасности ВЗС для развития водородной экономики в транспортной индустрии.

Предложенная система хранения сжатого водорода превосходит криогенные и твердотельные методы по совокупности критериев для ВЗС малой мощности (8,5 кг/сутки): затраты на сжатие 8,9 кВт·ч/кг) ниже, чем на сжижение (35% от энергии H_2); отсутствие рисков испарения (в отличие от LH_2) и медленной кинетики десорбции (в отличие от металлгидридов); простота интеграции с электролизером, минимальные требования к обслуживанию.

Система спроектирована в соответствии с требованиями к ВЗС контейнерного типа (полигон КГЭУ), включая: регулярный мониторинг герметичности; использование материалов, устойчивых к водородному охрупчиванию (нержавеющая сталь 316L, композиты); автоматическую блокировку при утечках. Безопасность обеспечена применением сертифицированных компонентов: баллонов БМКБ 4-80-40 (давление 400 бар), стальных трубок в оплетке, предохранительных клапанов и датчиков утечки, соответствующих ГОСТ Р 56352-2015 и ISO 16111.

Водород – перспективная замена ископаемому топливу, но его внедрение зависит от прорывов в технологиях хранения. Оптимальное решение должно быть экономичным и адаптивным под разные секторы экономики, а вопросы безопасности остаются важными при разработке и внедрении технологий хранения водорода. Надежные системы мониторинга и предотвращения утечек, а также создание стандартов безопасности, являются необходимыми шагами для обеспечения безопасной эксплуатации стационарных систем хранения водорода.

Литература

1. Bhandari R., Adhikari N. A comprehensive review on the role of hydrogen in renewable energy systems // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 82. P. 923–951. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.004.
2. Фатеев В.Н., Алексеева О.К., Коробцев С.В. и др. Проблемы аккумулирования и хранения водорода // Kimya Problemleri. 2018. №4(16). С. 453–483.
3. Rampai M.M., Mtshali C.B., Seroka N.S., Khotseng L. Hydrogen production, storage, and transportation: recent advances // RSC Advances. 2024. Vol. 14, №10. P. 6699–6718.
4. Хохонов А.А., Шайхатдинов Ф.А., Бобровский В.А., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Чичиров А.А., Рыбина Е.О. Технологии хранения водорода. Водородные накопители энергии // Успехи в химии и химической технологии. 2020. №12. С. 47–52.
5. Тарасов Б.П., Потоцкий М.В., Яртысь В.А. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулирования водорода // Российский химический журнал. Проблемы водородной энергетики. 2006. Т. 50, №6. С. 34–48.
6. Алексеева О.К., Козлов С.И., Самсонов Р.О., Фатеев В.Н. Системы хранения водорода // Транспорт на альтернативном топливе. 2009. №4(10). С. 68–74.
7. Hassan I.A., Ramadan H.S., Saleh M.A., Hissel D. Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 149. 111311. doi: 10.1016/j.rser.2021.111311.
8. Афанасьев Н.А., Оконский И.С., Трофимов В.В., Матвеев А.П. Создание и эксплуатация систем получения, хранения, транспортировки и использования жидкого водорода в промышленных масштабах // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 3(59). С. 127–132.
9. Agyekum E.B., Nutakor C., Khan T., Adegboye O.R., Odoi-Yorke F., Okonkwo P.C. Analyzing the research trends in the direction of hydrogen storage – A look into the past, present and future for the various technologies // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 74. P. 259–275. doi:

10.1016/j.ijhydene.2024.05.399.

10. AlZohbi G., Almoaikel A., AlShuhail L. An overview on the technologies used to store hydrogen // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9, Suppl. 11. P. 28–34. doi: 10.1016/j.egyr.2023.08.072.

11. Тарасов Б.П., Бурнашева В.В., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2005. № 12(32). С. 14–37.

12. Дружинин П.В., Коричев А.А. К вопросу хранения водорода // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2009. № 3(9). С. 51–53.

13. Лотоцкий М.В., Дэвидс М.В., Фокин В.Н. и др. Водородаккумулирующие материалы на основе сплавов титана с железом (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2024. № 3. С. 85–101. doi: 10.56304/S0040363624030032.

14. Mulky L., Srivastava S., Lakshmi T., Sandadi E.R., Gour S., Thomas N.A., Priya S.S., Sudhakar K. An overview of hydrogen storage technologies – Key challenges and opportunities // *Materials Chemistry and Physics*. 2024. Vol. 325. 129710. doi: 10.1016/j.matchemphys.2024.129710.

15. Kytömaa H., Wechsung A., Dimitrakopoulos G., Cook N., Jaimes D., Hur I.Y., Faraji S. Industry R&D needs in hydrogen safety // *Applications in Energy and Combustion Science*. 2024. Vol. 18. 100271. doi: 10.1016/j.jaecs.2024.100271.

16. Nagar R., Srivastava S., Hudson S.L., Amaya S.L., Tanna A., Sharma M., Achayalingam R., Sonkaria S., Khare V., Srinivasan S.S. Recent developments in state-of-the-art hydrogen energy technologies – Review of hydrogen storage materials // *Solar Compass*. 2023. Vol. 5. 100033. doi: 10.1016/j.solcom.2023.100033.

17. Ковалев В.Л., Якунчиков А.Н. Анализ адсорбции водорода массивами углеродных нанотрубок // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2009. № 6. С. 157–160.

18. Sun H., Wang Z., Meng Q., White S. Advancements in hydrogen storage technologies: Enhancing efficiency, safety, and economic viability for sustainable energy transition // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 105. P. 10–22. doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.176.

19. Preuster P., Papp C., Wasserscheid P. Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): toward a hydrogen-free hydrogen economy // *Accounts of Chemical Research*. 2017. Vol. 50. P. 74–85. doi: 10.1021/acs.accounts.6b00474.

20. Farazmand M., Saadat Z., Sameti M. Above-ground hydrogen storage: A state-of-the-art review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 90. P. 1173–1205. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.319.

21. Saadat Z., Farazmand M., Sameti M. Integration of underground green hydrogen storage in hybrid energy generation // *Fuel*. 2024. Vol. 371, Pt. A. 131899. doi: 10.1016/j.fuel.2024.131899.

22. Amirthan T., Perera M.S.A. The role of storage systems in hydrogen economy: A review // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022. Vol. 108. 104843. doi: 10.1016/j.jngse.2022.104843.

23. Sikiru S., Oladosu T.L., Amosa T.I., Olutoki J.O., Ansari M.N.M., Abioye K.J., Rehman Z.U., Soleimani H. Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 56. P. 1152–1182. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.186.

24. Алексин Е.Н. Хранение газообразного водорода в баллонах под давлением. Определение потерь водорода вследствие диффузии через стенки баллона // *Перспективы науки*. 2010. № 6(8). С. 63–70.

25. Федотов А.В., Ковалев Д.А. Способы хранения и аккумуляции водорода // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68, № 3(44). С. 78–85. doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-3-78-85.

26. Шарифов А., Мирсаидов У.М., Гайбуллаева З.Х., Гадоев Т.Х. Энергоёмкие способы хранения водорода // *Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук*. 2024. № 1(194). С. 64–72.

27. Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность водородных автозаправочных станций // *Пожаровзрывобезопасность*. 2020. Т. 29, № 4. С. 42–50. doi: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50.

28. Дресвянников А.Ф., Ситников С.Ю. Современные аспекты аккумуляции водорода. Обзор // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2006. № 3–4. С. 72–84.

29. Zhu X.Y., Lee J.H., Kim K.-H., Lim C.-H., Lee S.H. Coupled CFD modeling and thermal analysis of multi-layered insulation structures in liquid hydrogen storage tanks for various vapor-cooled shields // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 63. 105317.

30. Liu H., Xu L., Han Y., Chen X., Sheng P., Wang S., Huang X., Wang X., Lu C., Luo H., He S., Lan Z., Guo J. Development of a gaseous and solid-state hybrid system for stationary hydrogen energy storage // *Green Energy & Environment*. 2021. Vol. 6, № 4. P. 528–537.

31. Shoushtari S., Jafari A., Namdar H., Khoozan D. Modeling, qualification, and quantification of hydrogen leakage in multilayered reservoirs // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 91. P. 636–648. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.328.
32. Reddi K., Elgowainy A., Rustagi N. и др. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, № 34. P. 21855–21865.
33. Chi G., Xu S., Yu D., Wang Z., He Z., Wang K., Zhou Q. A brief review of structural health monitoring based on flexible sensing technology for hydrogen storage tank // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 80. P. 980–998.
34. Li D., Liu H., Zhang C., Chen Y. Insulation optimization of liquid hydrogen storage tank using dynamic analysis // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 110. P. 588–597. doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.263.
35. Hafner T., Macher J., Brandstätter S., Trattner A. Advancing hydrogen storage: Development and verification of a high-pressure permeation test setup for polymeric barrier materials // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 96. P. 882–891. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.215.
36. Osman A.I., Ayati A., Farrokhi M., Khadempir S., Rajabzadeh A.R., Farghali M., Krivoschapkin P., Tanhaei B., Rooney D.W., Yap P.-S. Innovations in hydrogen storage materials: Synthesis, applications, and prospects // *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 95. 112376. doi: 10.1016/j.est.2024.112376.
37. Гошовский С.В., Зурьян А.В. Обзор технологий искусственного получения газогидратов // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2019. №1(55). С. 97–113.
38. Lee W., Kim K., Lee J., Yun-Ho A. et al. Perspectives on facilitating natural gas and hydrogen storage in clathrate hydrates under a static system // *Green Chemistry*. 2024. Vol. 26. P. 7552–7578.
39. Kamran M., Turzyński M. Exploring hydrogen energy systems: A comprehensive review of technologies, applications, prevailing trends, and associated challenges // *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 96. 112601. doi: 10.1016/j.est.2024.112601.
40. Кустов Л.М., Каленчук А.Н., Богдан В.И. Системы аккумуляции, хранения и выделения водорода // *Успехи химии*. 2020. Т. 89, № 9. С. 897–916. doi: 10.1070/RCR4940.
41. Acar C., Haktanir E., Temur G.T., Beskese A. Sustainable stationary hydrogen storage application selection with interval-valued intuitionistic fuzzy AHP // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 49, Pt. D. P. 619–634. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.081.
42. Chizubem B., Subbiah A., Izuchukwu O.C., Musa K.S. Real-time monitoring using digital platforms for enhanced safety in hydrogen facilities – Current perspectives and future directions // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 98. P. 487–499. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.128.
43. Джепаров Д.В., Денисламова Е.С. Металлорганические каркасы на основе гетероциклических лиганд – новые материалы для хранения водорода // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2022. № 4. С. 76–92. doi: 10.15593/2224-9400/2022.4.06.
44. Яковлев А.И., Федоренко Г.М., Щекин А.Р. Некоторые аспекты на пути изучения металлического водорода как основного энергоносителя возобновляемого топлива XXI века // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2012. № 7(111). С. 24–29.
45. Al-Shetwi M., Mansur M., Muttaqi K.M., Dong Z.Y., Blaabjerg F. Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47, №39. P. 17285–17312. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.208.
46. Zhang T., Qadrdan M., Wu J., Couraud B., Stringer M., Walker S., Hawkes A., Allahham A., Flynn D., Pudjianto D., Dodds P., Strbac G. A systematic review of modelling methods for studying the integration of hydrogen into energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 208. 114964. doi: 10.1016/j.rser.2024.114964.
47. Quintanilla P., Elhalwagy A., Duan L., Soltani S.M., Lai C.S., Foroudi P., Huda M.N., Nandy M. Artificial intelligence and robotics in the hydrogen lifecycle: A systematic review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 113. P. 801–817.
48. Beck H.-P., Klaas A.-K., Klaas C. Conception of a new 4-quadrant hydrogen compressed air energy storage power plant with an integrated electrolyzer // *Energy Reviews*. 2024. Vol. 3, № 3. 100074. doi: 10.1016/j.enrev.2024.100074.
49. Esposito L., van der Wiel M., Acar C. Hydrogen storage solutions for residential heating: A thermodynamic and economic analysis with scale-up potential // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 79. P. 579–593.
50. Чичиров А.А., Разакова Р.И., Гайнутдинов Ф.Р., Гайнутдинова Д.Ф. Водородная заправочная станция: обзор технологического состояния использования водородного топлива //

Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 2. С. 149–165. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-2-149-165.

51. Singh U.R., Bhogilla S.S., Sou H., Itoko S., Tolj I. Performance evaluation of hybrid compressors for hydrogen storage and refuelling stations // Journal of Energy Storage. 2025. Vol. 114, Pt. B. 115778.

52. Carrion, M., & Arroyo, J. M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem // IEEE Transactions on Power Systems. 2006. Vol. 21, №. 3. 1371-1378

Авторы публикации

Чичилов Андрей Александрович – д-р хим. наук, профессор кафедры «Автономная распределенная энергетика и химия» (АРЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: 0000-0002-9116-0370. khimiya_kgeu@mail.ru

Разакова Регина Иршатовна – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: 0009-0002-1732-3335. reginarazakova@yandex.ru

Гайнутдинов Фарит Ринатович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: 0009-0006-0381-1345. EBKKK@yandex.ru

Гайнутдинова Дилара Фаритовна – канд. хим. наук, доцент кафедры «Автономная распределенная энергетика и химия» (АРЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: 0009-0000-7477-9860. gaynutdinova2018@bk.ru

References

1. Bhandari R, Adhikari N. A comprehensive review on the role of hydrogen in renewable energy systems. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;82:923–951. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.004.
2. Fateev VN, Alekseeva OK, Korobtsev SV, et al. Problemy akkumulirovaniya i khraneniya vodoroda. Kimya Problemleri. 2018;16(4):453–483. (In Russ).
3. Rampai MM, Mtshali CB, Seroka NS, Khotseng L. Hydrogen production, storage, and transportation: recent advances. RSC Advances. 2024;14(10):6699–6718.
4. Khokhonov AA, Shaikhatdinov FA, Bobrovskii VA, Agarkov DA, Bredikhin SI, Chichirov AA, Rybina EO. Tekhnologii khraneniya vodoroda. Vodorodnye nakopiteli energii. Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii. 2020;12:47–52. (In Russ).
5. Tarasov BP, Pototskii MV, Yartys VA. Problema khraneniya vodoroda i perspektivy ispol'zovaniya gidridov dlya akkumulirovaniya vodoroda. Rossiiskii khimicheskii zhurnal. Problemy vodorodnoi energetiki. 2006;50(6):34–48. (In Russ).
6. Alekseeva OK, Kozlov SI, Samsonov RO, Fateev VN. Sistemy khraneniya vodoroda. Transport na al'ternativnom toplive. 2009;10(4):68–74. (In Russ).
7. Hassan IA, Ramadan HS, Saleh MA, Hissel D. Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021;149:111311. doi: 10.1016/j.rser.2021.111311.
8. Afanas'ev NA, Okonskii IS, Trofimov VV, Matveev AP. Sozdanie i ekspluatatsiya sistem polucheniya, khraneniya, transportirovki i ispol'zovaniya zhidkogo vodoroda v promyshlennykh masshtabakh. Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2008;59(3):127–132. (In Russ).
9. Agyekum EB, Nutakor C, Khan T, Adegboye OR, Odoi-Yorke F, Okonkwo PC. Analyzing the research trends in the direction of hydrogen storage – A look into the past, present and future for the various technologies. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;74:259–275. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.399..
10. AlZohbi G, Almoaikel A, AlShuhail L. An overview on the technologies used to store hydrogen. Energy Reports. 2023;9(Suppl. 11):28–34. doi: 10.1016/j.egyr.2023.08.072.
11. Tarasov BP, Burnasheva VV, Lototskii MV, Yartys VA. Metody khraneniya vodoroda i vozmozhnosti ispol'zovaniya metallogidridov. Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2005;32(12):14–37. (In Russ).

12. Druzhinin PV, Korichev AA. K voprosu khraneniya vodoroda. Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa. 2009;9(3):51–53. (In Russ).
13. Lototskii MV, Devids MV, Fokin VN, et al. Vodorodakkumuliruyushchie materialy na osnove splavov titana s zhelezom (obzor). Thermal Engineering. 2024;(3):85–101. (In Russ). doi: 10.56304/S0040363624030032.
14. Mulky L, Srivastava S, Lakshmi T, Sandadi ER, Gour S, Thomas NA, Priya SS, Sudhakar K. An overview of hydrogen storage technologies – Key challenges and opportunities. Materials Chemistry and Physics. 2024;325:129710. doi: 10.1016/j.matchemphys.2024.129710.
15. Kytömaa H, Wechsung A, Dimitrakopoulos G, Cook N, Jaimes D, Hur IY, Faraji S. Industry R&D needs in hydrogen safety. Applications in Energy and Combustion Science. 2024;18:100271. doi: 10.1016/j.jaecs.2024.100271.
16. Nagar R, Srivastava S, Hudson SL, Amaya SL, Tanna A, Sharma M, Achayalingam R, Sonkaria S, Khare V, Srinivasan SS. Recent developments in state-of-the-art hydrogen energy technologies – Review of hydrogen storage materials. Solar Compass. 2023;5:100033. doi: 10.1016/j.solcom.2023.100033.
17. Kovalev VL, Yakunchikov AN. Analiz adsorbtsii vodoroda massivami uglerodnykh nanotrubok. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza. 2009;(6):157–160. (In Russ).
18. Sun H, Wang Z, Meng Q, White S. Advancements in hydrogen storage technologies: Enhancing efficiency, safety, and economic viability for sustainable energy transition. International Journal of Hydrogen Energy. 2025;105:10–22. doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.176.
19. Preuster P, Papp C, Wasserscheid P. Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): toward a hydrogen-free hydrogen economy. Acc Chem Res. 2017;50:74–85. doi: 10.1021/acs.accounts.6b00474.
20. Farazmand M, Saadat Z, Sameti M. Above-ground hydrogen storage: A state-of-the-art review. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;90:1173–1205. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.319.
21. Saadat Z, Farazmand M, Sameti M. Integration of underground green hydrogen storage in hybrid energy generation. Fuel. 2024;371(Pt A):131899. doi: 10.1016/j.fuel.2024.131899.
22. Amirthan T, Perera MSA. The role of storage systems in hydrogen economy: A review. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2022;108:104843. doi: 10.1016/j.jngse.2022.104843.
23. Sikiru S, Oladosu TL, Amosa TI, Olutoki JO, Ansari MNM, Abioye KJ, Rehman ZU, Soleimani H. Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;56:1152–1182. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.186.
24. Aleksin EN. Khranenie gazoobraznogo vodoroda v ballonakh pod davleniem. Opreделение poter' vodoroda vsledstvie diffuzii cherez stenki ballona. Perspektivy nauki. 2010;8(6):63–70. (In Russ).
25. Fedotov AV, Kovalev DA. Sposoby khraneniya i akumulirovaniya vodoroda. Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2021;68(3):78–85. (In Russ). doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-3-78-85.
26. Sharifov A, Mirsaidov UM, Gaibullaeva ZKh, Gadoev TKh. Energoemkie sposoby khraneniya vodoroda. Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Tadzhikistana. Otdelenie fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh i tekhnicheskikh nauk. 2024;194(1):64–72. (In Russ).
27. Shebeko YuN. Pozharnaya bezopasnost' vodorodnykh avtozapravochoykh stantsii. Pozharovzryvobezopasnost'. 2020;29(4):42–50. (In Russ). doi: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50.
28. Dresvyannikov AF, Sitnikov SYu. Sovremennye aspekty akumulirovaniya vodoroda. Obzor. Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems. 2006;(3–4):72–84. (In Russ).
29. Zhu XY, Lee JH, Kim KH, Lim CH, Lee SH. Coupled CFD modeling and thermal analysis of multi-layered insulation structures in liquid hydrogen storage tanks for various vapor-cooled shields. Case Studies Therm Eng. 2024;63:105317.
30. Liu H, Xu L, Han Y, Chen X, Sheng P, Wang S, Huang X, Wang X, Lu C, Luo H, He S, Lan Z, Guo J. Development of a gaseous and solid-state hybrid system for stationary hydrogen energy storage. Green Energy Environ. 2021;6(4):528–537.
31. Shoushtari S, Jafari A, Namdar H, Khoozan D. Modeling, qualification, and quantification of hydrogen leakage in multilayered reservoirs. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;91:636–648. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.328.
32. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, et al. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. 2017;42(34):21855–21865.
33. Chi G, Xu S, Yu D, Wang Z, He Z, Wang K, Zhou Q. A brief review of structural health monitoring based on flexible sensing technology for hydrogen storage tank. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;80:980–998.
34. Li D, Liu H, Zhang C, Chen Y. Insulation optimization of liquid hydrogen storage tank using dynamic analysis. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;110:588–597. doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.263.

35. Hafner T, Macher J, Brandstätter S, Trattner A. Advancing hydrogen storage: Development and verification of a high-pressure permeation test setup for polymeric barrier materials. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;96:882–891. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.215.
36. Osman AI, Ayati A, Farrokhi M, Khadempir S, Rajabzadeh AR, Farghali M, Krivoschapkin P, Tanhaei B, Rooney DW, Yap PS. Innovations in hydrogen storage materials: Synthesis, applications, and prospects. *Journal of Energy Storage*. 2024;95:112376. doi: 10.1016/j.est.2024.112376.
37. Goshovskii SV, Zuryan AV. Obzor tekhnologii iskusstvennogo polucheniya gazogidratov. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*. 2019;55(1):97–113. (In Russ).
38. Lee W, Kim K, Lee J, Yun-Ho A, et al. Perspectives on facilitating natural gas and hydrogen storage in clathrate hydrates under a static system. *Green Chemistry*. 2024;26:7552–7578.
39. Kamran M, Turzyński M. Exploring hydrogen energy systems: A comprehensive review of technologies, applications, prevailing trends, and associated challenges. *Journal of Energy Storage*. 2024;96:112601. doi: 10.1016/j.est.2024.112601.
40. Kustov LM, Kalenchuk AN, Bogdan VI. Sistemy akkumulyatsii, khraneniya i vydeleniya vodoroda. *Russian Chemical Reviews*. 2020;89(9):897–916. (In Russ). doi: 10.1070/RCR4940.
41. Acar C, Haktanir E, Temur GT, Beskese A. Sustainable stationary hydrogen storage application selection with interval-valued intuitionistic fuzzy AHP. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;49(Pt D):619–634. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.081.
42. Chizubem B, Subbiah A, Izuchukwu OC, Musa KS. Real-time monitoring using digital platforms for enhanced safety in hydrogen facilities – Current perspectives and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025;98:487–499. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.128.
43. Dzheparov DV, Denislamova ES. Metallorganicheskie karkasy na osnove geterociklicheskich ligand – novye materialy dlya hraneniya vodoroda. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 2022;(4):76–92. (In Russ). doi: 10.15593/2224-9400/2022.4.06.
44. Yakovlev AI, Fedorenko GM, Shchekin AR. Nekotorye aspekty na puti izucheniya metallichesкого vodoroda kak osnovnogo energonositelya vozobnovlyаемого topliva XXI veka. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2012;111(7):24–29. (In Russ).
45. Al-Shetwi M, Mansur M, Muttaqi KM, Dong ZY, Blaabjerg F. Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(39):17285–17312. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.208.
46. Zhang T, Qadrdan M, Wu J, Couraud B, Stringer M, Walker S, Hawkes A, Allahham A, Flynn D, Pudjianto D, Dodds P, Strbac G. A systematic review of modelling methods for studying the integration of hydrogen into energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025;208:114964. doi: 10.1016/j.rser.2024.114964.
47. Quintanilla P, Elhalwagy A, Duan L, Soltani SM, Lai CS, Foroudi P, Huda MN, Nandy M. Artificial intelligence and robotics in the hydrogen lifecycle: A systematic review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025;113:801–817.
48. Beck HP, Klaas AK, Klaas C. Conception of a new 4-quadrant hydrogen compressed air energy storage power plant with an integrated electrolyzer. *Energy Reviews*. 2024;3(3):100074. doi: 10.1016/j.enrev.2024.100074.
49. Esposito L, van der Wiel M, Acar C. Hydrogen storage solutions for residential heating: A thermodynamic and economic analysis with scale-up potential. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;79:579–593.
50. Chichirov AA, Razakova RI, Gainutdinov FR, Gainutdinova DF. Vodorodnaya zapravoch'naya stantsiya: obzor tekhnologicheskogo sostoyaniya ispol'zovaniya vodorodnogo topliva. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2024;26(2):149–165. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-2-149-165.
51. Singh UR, Bhogilla SS, Sou H, Itoko S, Tolj I. Performance evaluation of hybrid compressors for hydrogen storage and refuelling stations. *Journal of Energy Storage*. 2025;114(Pt B):115778.
52. Carrion M, Arroyo JM. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006;21(3):1371–1378.

Authors of the publication

Andrey A. Chichirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID*: 0000-0002-9116-0370. *khimiya_kgeu@mail.ru*

Regina I. Razakova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID*: 0009-0002-1732-3335. *reginarazakova@yandex.ru*

© Чичиров А.А., Разакова Р.И., Гайнутдинов Ф.Р., Гайнутдинова Д.Ф.

Farit R. Gainutdinov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* 0009-0006-0381-1345. *EBKKK@yandex.ru*

Dilyara F. Gainutdinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* 0009-0000-7477-9860. *gaynutdinova2018@bk.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **27.03.2025 г.**

Отредактировано **03.07.2025 г.**

Принято **24.07.2025 г.**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 699.86

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-6-156-170

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ В УЛАН-БАТОРЕ (МОНГОЛИЯ)

Цэрэндорж Ц.¹, Ахметова И.Г.², Султангузин И.А.¹, Калякин И.Д.¹, Лувсандорж Б.³

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Монгольский государственный университет науки и технологий, г. Улан-Батор,
Монголия

TserendorzhT@mpei.ru

Резюме: ЦЕЛЬ исследования – предложить более эффективный вариант сохранения тепла путем утепления ограждающих конструкций зданий. Проведен анализ расчетов с помощью программного обеспечения PHPP (Passive House Planning Package). В результате проведенных исследований и расчетов было выяснено, что утепление ограждающих конструкций может существенно снизить потребление энергии на отопление. Проанализировано влияние этих мер на топливно-энергетический баланс Монголии. ЗНАЧИМОСТЬ. Научная значимость исследования заключается в комплексной оценке влияния утепления ограждающих конструкций зданий на снижение теплопотерь, энергопотребления и выбросов CO₂ в условиях Монголии. МЕТОДЫ. В исследовании использованы методы аналитического и расчетного характера. Для оценки тепловых потерь и потенциальной экономии энергии применялось программное обеспечение PHPP, позволяющее моделировать энергетические характеристики зданий с различными вариантами толщины утепления ограждающих конструкций. РЕЗУЛЬТАТЫ. Все существующие старые здания относятся к классу энергоэффективности D. Для достижения энергоэффективности эти здания должны быть классифицированы как энергоэффективные или класса A, а все ограждения должны иметь изоляцию толщиной не менее 250 мм и коэффициентом теплопроводности 0,04 Вт/(м·К). Для панельных многоквартирных домов, при условии утепления окон энергосберегающими стеклопакетами, годовое потребление составит 133,8 ГВт·ч. Реализация этой меры могла бы сэкономить 368,6 ГВт·ч тепловую энергию и снизить 263,3 тыс. тонн CO₂, что соответствует целям Парижского соглашения на 2030 год. Для кирпичных многоквартирных домов годовое потребление составит 99,1 ГВт·ч. Реализация этой меры позволит сэкономить 305,3 ГВт·ч тепловую энергию и снизить 218,2 тыс. тонн CO₂. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В настоящее время годовое потребление тепла панельными зданиями в Улан-Баторе составляет 502,1 ГВт·ч (431,7 тыс. Гкал), а кирпичными – 404,4 ГВт·ч (347,7 тыс. Гкал). Этот показатель охватывает 53 процента тепловой энергии в топливно-энергетическом балансе Монголии.

Ключевые слова: энергоэффективность здания; удельный годовой расход; класс энергоэффективности; теплопотери; теплоизоляционный материал.

Для цитирования: Цэрэндорж Ц., Ахметова И.Г., Султангузин И.А., Калякин И.Д., Лувсандорж Б. Повышение энергоэффективности многоквартирных домов в Улан-Баторе (Монголия) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 156-170. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-156-170.

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF APARTMENT BUILDINGS IN ULAANBAATAR, MONGOLIA

Tserendorj Ts.¹, Akhmetova I.G.², Sultanguzin I.A.¹, Kalyakin I.D.¹, Luvsandorj B.³

¹National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Mongolian University Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

TserendorzhT@mpei.ru

Abstract: *THE PURPOSE* of the study was to propose a more effective option for heat conservation through the insulation of building envelopes. Calculations were analyzed using PHPP (Passive House Planning Package) software. Research and calculations revealed that insulating building envelopes can significantly reduce energy consumption for heating. The impact of these measures was analyzed on the fuel and energy balance of Mongolia. **SIGNIFICANCE.** The scientific significance of the study lies in its comprehensive assessment of the impact of insulating building envelopes on reducing heat loss, energy consumption, and CO₂ emissions in Mongolia. **METHODS.** The study utilized analytical and computational methods. PHPP software, which allows for the modeling of energy performance of buildings with different insulation options and envelope thicknesses, was used to assess heat loss and potential energy savings. **RESULTS.** All existing older buildings belong to energy efficiency class D. To achieve energy efficiency, these buildings must be classified as energy efficient or class A, and all building envelopes must have insulation at least 250 mm thick and a thermal conductivity of 0.04 W/(m·K). For panel apartment buildings, assuming windows insulated with energy-saving double-glazed windows, the annual consumption is calculated to be 133.8 GWh. The implementation of this measure could save 368.6 GWh of thermal energy and reduce 263.3 thousand tons of CO₂, which is in line with the Paris Agreement targets for 2030. For brick apartment buildings, the annual consumption is calculated to be 99.1 GWh. Implementing this measure would save 305.3 GWh of thermal energy and reduce 218.2 thousand tons of CO₂. **CONCLUSION.** Currently, the annual heat consumption of panel buildings is 502.1 GWh (431,700 Gcal), and that of brick buildings is 404.4 GWh (347,700 Gcal) in Ulaanbaatar. This figure accounts for 53 percent of the thermal energy in fuel and energy balance of Mongolia.

Keywords: *energy efficiency of a building; specific annual consumption; energy efficiency class; heat loss; thermal insulation material.*

For citation: Tserendorj Ts., Akhmetova I.G., Sultanguzin I.A., Kalyakin I.D., Luvsandorj B. Improving the energy efficiency of apartment buildings in Ulaanbaatar, Mongolia. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 156-170. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-156-170.

Введение (Introduction)

В развивающихся странах, таких как Монголия, где в качестве источника энергии в основном используется уголь, выбросы парниковых газов становятся основной проблемой. Объемы строительства увеличиваются с каждым годом, что, в свою очередь, увеличивает потребление тепловой энергии. По мере увеличения потребления тепловой энергии увеличивается и расход топлива. Это ведет не только к изменению климата, но также увеличивает загрязнение воздуха, которое, в свою очередь, влияет на здоровье населения.

В 2016 году Монголия ратифицировала Парижское соглашение Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Данное соглашение устанавливает цель по сокращению выбросов CO₂ на 231 тыс. тонн к 2030 году за счет утепления панельных многоквартирных домов.

Это позволит значительно сократить выбросы углерода, вызванные сжиганием угля для получения тепловой энергии, а утепление здания – минимизировать потери тепла через ограждающие конструкции, что, в свою очередь, приведет к снижению потребности в отоплении. Результаты исследования показывают, что существует реальная возможность снизить энергетические потери и выбросы CO₂ в столице Монголии за счет усовершенствования строительства и отопления зданий. Улучшение качества воздуха в

городе, в свою очередь, даст возможность сделать жизнь в столице более комфортной и экологичной.

Улан-Батор – самая холодная столица в мире. Зимой наружная расчётная температура воздуха составляет -39°C на отопление. Отопительный сезон здесь значительно продолжительнее, чем в других странах, и длится осенью, зимой и весной. Большинство зданий были построены в период с 1965 по 2000 год. Эти многоэтажные дома обладают высокими теплопотерями, что влечет за собой высокое потребление тепловой энергии [1].

В Улан-Баторе 1077 (блоков) панельных жилых домов, построенны во второй половине XX века по старым правилам (табл. 1) и расположены преимущественно в центральных частях города. Качество строительных материалов и технологий того времени было невысоким, поэтому теплоизоляционные свойства этих зданий часто оставляют желать лучшего: холодные помещения зимой и высокие счета за отопление.

В последние годы был проведен ряд исследований по оценке категорий энергоэффективности, капитального ремонта и инвестиций [2]. Также упоминается исследование [3] факторов, влияющих на энергоэффективность жилых зданий, с учетом региональных и климатических различий.

В работе рассматривается применение теплоизоляционных материалов для утепления ограждающих конструкций зданий и увеличения их толщины. Теплопроводность изоляционного материала принимается равной $0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Для снижения тепловых потерь через ограждающие конструкции используются теплоизоляционные материалы, обладающие низкой теплопроводностью. В работе [4] рассмотрены разработки технологий легких бетонов на основе диатомитовых пород.

Эти жилые дома разную этажность. Из 1077 панельных жилых домов, 34 – 12-этажные, 780 – 9-этажные и 263 – 5-этажные [5].

Таблица 1

Table 1

Количество панельных зданий по району в Улан-Баторе
Number of panel buildings by district in Ulaanbaatar

Район	Количество зданий	Количество блоков	Квартиры
Баянзурх	136	285	11282
Хан-Уул	30	73	2239
Баянгол	180	293	15990
Сухбаатар	61	135	5527
Чингэлтэй	27	42	1786
Сонгинохайрхан	82	249	11092
Всего	516	1077	47916

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Также в Улан-Баторе построены не только панельные дома, но и кирпичные многоквартирные дома, которые составляют 60% всех типов зданий. Проведение теплоизоляционных работ приведет к существенной экономии тепловой энергии и улучшению комфорта проживания. Это также положительно повлияет на экологию, поскольку уменьшит выбросы в атмосферу продуктов сгорания топлива, используемого для отопления.

Ограждающая конструкция многоэтажных домов в Улан-Баторе

– Пятиэтажный дом. В Улан-Баторе старых панельных пятиэтажных многоквартирных домов насчитывается 263 блока. Один вход в здание считается одним блоком. Типовые серии¹ некоторых многоквартирных домов в Монголии похож на конструкцию старых зданий в России подобной серии. Материалы, использованные при строительстве, могут отличаться.

• Рисунок 1 – Серия: К7. Стены: трехслойные железобетонные панели с утеплителем – толщиной 320 мм; высота потолков: 2,5.

• Рисунок 2 – Серия: 1-511. Стены: кирпичные – толщиной 640 мм; высота потолков: 2,5. Для кирпичных домов построено 489 зданий до 2000 года.

¹Источник: ЦЭНЭФ-XXI по данным сайта <http://www.kvmeter.ru>



Рис. 1. Пятиэтажный панельный дом

Fig. 1. Five-story panel building

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис. 2. Пятиэтажный кирпичный дом

Fig. 2. Five-story brick building

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

– Девятиэтажный дом. В Улан-Баторе насчитывается 780 блоков старых панельных девятиэтажных многоквартирных домов.

- Рисунок 3 – Серия: П-49. Стены и облицовка: материал внешних стен – однослойные керамзитобетонные плиты толщиной 350 мм. Внутренние стены и перекрытия – сборные железобетонные панели толщиной 160 мм. Высота потолков: 2,7.



Рис. 3. Девятиэтажный панельный дом

Fig. 3. Nine-story panel building

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

– Двенадцатизэтажный дом. В Улан-Баторе насчитывается 263 блока старых панельных двенадцатизэтажных многоквартирных домов. Один вход в здание считается одним блоком.

- Рисунок 4 – Серия: КМС-101. Трехслойные железобетонные панели с утеплителем – толщина 300 мм; высота потолков: 2,7.

- Рисунок 5 – Серия: П-67. Наружные стены – кирпичные, толщиной 640 мм; высота потолков: 2,7.



Рис. 4. Двенадцатизэтажный панельный дом

Fig. 4. Twelve-story panel building

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис. 5. Двенадцатизэтажный кирпичный дом

Fig. 5. Twelve-story brick building

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Годовое тепловое потребление для многоквартирных домов с помощью PHPP

PHPP (Passive House Planning Package) – это основное программное обеспечение, используемое для проектирования и перепроектирования зданий в соответствии с концепцией пассивного дома [6, 7]. Оно оценивает потребление энергии, обеспечивает детализированный расчет потерь тепла через ограждающие конструкции, а также оценивает эффективность их изоляции. На рисунке 6 показана модель панельного здания. Преимущество программы PHPP состоит в том, что она позволяет учитывать различные типы ограждающих конструкций здания, внутренние тепловыделения и теплопоступления от солнечной радиации, рассчитывать большое количество тепловых схем с применением тепловых насосов, газовых котлов, приточно-вытяжных установок с рекуперацией тепла, солнечных коллекторов, солнечных панелей и т. д. [8, 9].

Выражение, используемое для расчета годового потребления на отопление:

$$Q_H = Q_T + Q_V - \eta_{Gw} \cdot (Q_S + Q_I) \quad (1)$$

где: Q_H – годовое потребление на отопление, кВт·ч/(м²·год);

- Q_T – трансмиссионные тепловые потери, кВт·ч/(м²·год);
- Q_V – теплопотери вентиляции, кВт·ч/(м²·год);
- Q_S – теплоприток за счет солнечного излучения, кВт·ч/(м²·год);
- Q_I – теплопритока за счёт внутренних тепловыделений, кВт·ч/(м²·год);
- η_{GW} – коэффициент использования свободного тепла.

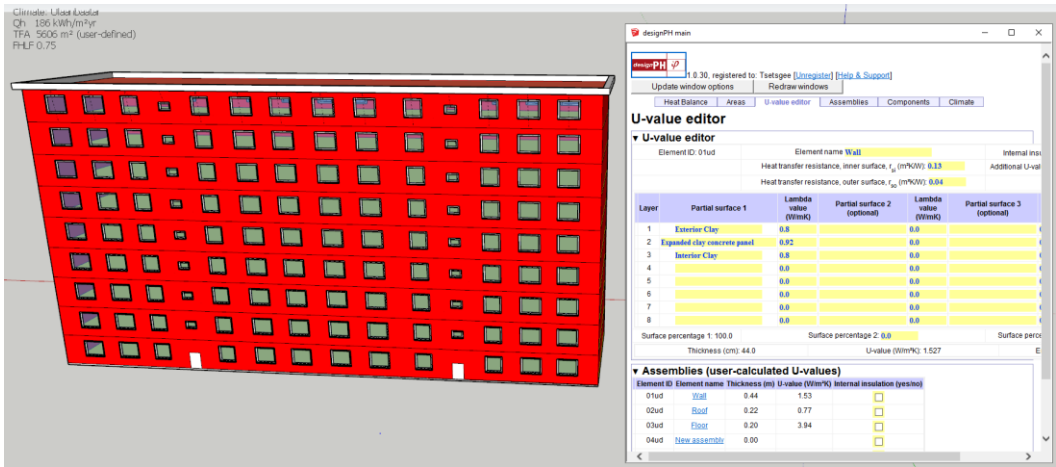


Рис. 6. Моделирование панельного здания Fig. 6. Modeling of a panel building (9th floor)
(9 этаж)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 2
Table 2

Фактические показатели на отопление и вентиляцию здания
Actual indicators for heating and ventilation of the building

№	Этаж	Тип здания	Площадь, м ²	Удельный годовой расход	Тепловая нагрузка, кВт	Годовое потребление, кВт·ч/год	Количество блоков
1	5	Панель	3900	191	286	770316	4
2		Кирпич	4030	174	306	830069	4
3	9	Панель	5606	196	380	1040588	2
4	12	Панель	3780	243	327	919715	1
5		Кирпич	4704	144	239	676524	1

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 6 представлено моделирование панельных и кирпичных зданий с помощью программного обеспечения designPH, в котором можно моделировать любое здание. Для проведения теплотехнического расчета здания оно сначала моделируется с помощью программы designPH, а результаты преобразуются и рассчитываются в программе PHPP.

На рисунке 7 представлены удельный годовой расход, его соотношение между тепловым сопротивлением стены и окон. Теплопроводность изоляционного материала составит 0,04 Вт/(м·К). Теплоизоляционным материалом (ТИМ) может быть пенополистирол или базальт. Чем толще изоляция здания, тем ниже удельный годовой расход, замена окон также снижает удельный годовой расход. В таблице 3 показано сравнение толщины изоляционного материала и годового удельного расхода. Предполагается, что все ограждения, за исключением окон, изолированы.

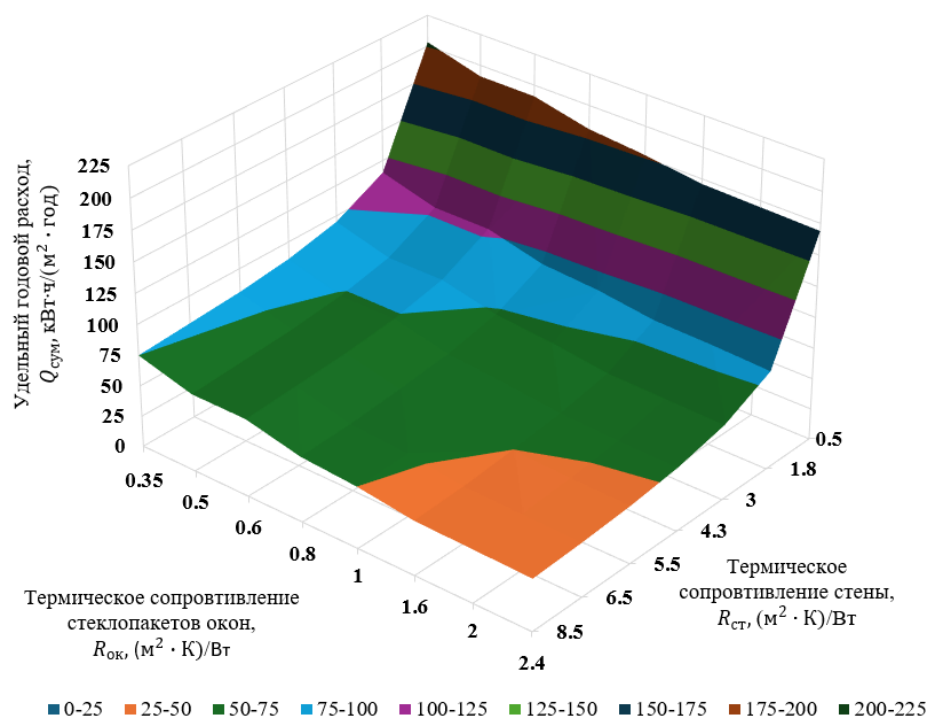


Рис. 7. Соотношение между толщиной изоляционного материала, тепловым сопротивлением окна и годовым удельным потреблением тепла

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В настоящее время в Улан-Батаре при поддержке Немецкой общины проводится утеплительная кампания, в основном с использованием пенополистирола толщиной 150 мм. В таблице 3 показаны результаты для случая, когда ограждающие конструкции зданий утеплены, а в таблице 4 – для случая, когда энергоэффективные окна заменены на энергоэффективные. Для энергосбережения стеклопакетов термическое сопротивление составит $R = 1,56 \text{ м}^2\text{°C}/\text{Вт}$, а пропускание солнечной энергии составит $g = 42\%$.

Таблица 3

Table 3

Сравнение толщины ТИМ и годового удельного расхода

Comparison of the thickness of thermal insulation materials and annual specific consumption

Толщина слоя теплоизоляции, мм	Удельный годовой расход на отопление и вентиляцию, кВт·ч/(м²·год)				
	5-этажный дом (панель)	5-этажный дом (кирпич)	9-этажный дом (панель)	12-этажный дом (панель)	12-этажный дом (кирпич)
факт	191	174	196	243	144
50	103	101	103	117	111
100	83	82	83	93	98
150	74	74	74	83	91
200	69	69	69	77	87
250	67	66	66	73	84
300	64	63	64	70	82

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В сводных правилах [10] для Улан-Батора показатель градусо-суток отопительного периода (ГСОП) составит 7000. Термическое сопротивление стены составит $3,85 \text{ м}^2\text{°C}/\text{Вт}$. На рисунке 8 представлена, толщина изоляции существующей ограждающей конструкции, которая должна составлять не менее 150 мм для соблюдения строительных норм. Красная линия на рисунке показывает норму.

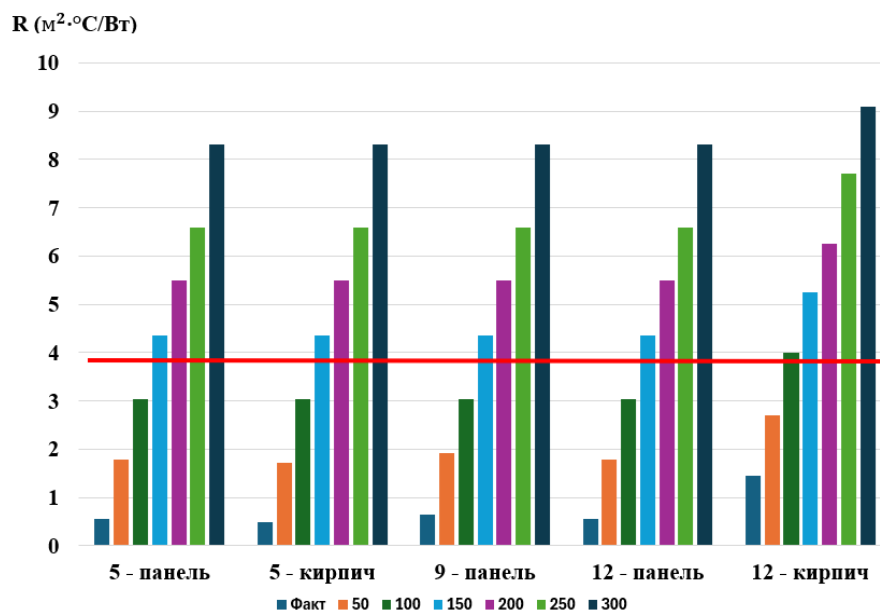


Рис. 8. Термическое сопротивление стены

Fig. 8. Thermal resistance of the wall

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 4

Table 4

В случае утепления здания и замены окон на энергосберегающие
In case of building insulation and replacement of windows with energy-saving

Толщина слоя теплоизоляции, мм	Удельный годовой расход на отопление и вентиляцию, кВт·ч/(м²·год)				
	5-этажный дом (панель)	5-этажный дом (кирпич)	9-этажный дом (панель)	12-этажный дом (панель)	12-этажный дом (кирпич)
факт	191	174	196	243	144
50	87	85	89	101	93
100	67	66	69	77	80
150	58	58	60	66	73
200	53	53	55	61	69
250	50	50	52	57	66
300	47	47	50	54	64

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Согласно концепции пассивного дома, удельный годовой расход тепла составляет 15-30 кВт·ч/м²·год в зависимости от региона. В международной классификации энергоэффективности зданий значение 50 кВт·ч/м²·год и ниже считается энергоэффективным или классом А. В нашей стране стремятся достичь этого значения. Для достижения этого показателя недостаточно просто утеплить ограждающие конструкции. Поэтому в качестве меры энергосбережения рекомендуется заменить все стеклопакеты на энергосберегающие. Для энергоэффективности класса А, здание должно быть построено с использованием изоляционных материалов с коэффициентом теплопроводности 0,04 Вт/(м·К) или менее, толщиной не менее 250 мм, а все окна должны быть заменены на энергосберегающие. Такое здание можно считать классом А или энергоэффективным.

В таблице 5 показано годовое потребление на отопление и вентиляцию и соответствующие выбросы эквивалента CO₂.

Таблица 5

Table 5

Годовое потребление на отопление и вентиляцию и эквивалент CO₂ (с энергосбережением окон)Annual heating and ventilation consumption and CO₂ equivalent (with energy saving windows)

Толщина слоя теплоизоляции, мм	5-этажный дом (панель)	Эквивалент CO ₂	5-этажный дом (кирпич)	Эквивалент CO ₂	9-этажный дом (панель)	Эквивалент CO ₂
	кВт·ч/год	тн/год	кВт·ч/год	тн/год	кВт·ч/год	тн/год
факт	770316	551	830069	593,4	1100145	786,6
50	348960	249,7	354004	252,2	494213	353,6
100	269957	193,4	271616	194,7	385717	275,5
150	234160	167,4	235013	168,5	336779	240
200	213543	152,5	214050	153	308794	221,4
250	200163	143,6	200498	143,3	290859	208
300	190887	136,6	191125	136,3	156102	111,8
Толщина слоя теплоизоляции, мм	12-этажный дом (панель)	Эквивалент CO ₂	12-этажный дом (кирпич)	Эквивалент CO ₂		
	кВт·ч/год	тн/год	кВт·ч/год	тн/год		
факт	919715	658,7	676524	483		
50	382164	273,8	437711	313,9		
100	290376	207,8	376353	269,9		
150	250937	179,2	344134	246,3		
200	229152	163,3	324380	231		
250	215291	154,7	311053	222,8		
300	205701	147,9	301415	215,8		

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Топливо-энергетический баланс Монголии

Топливо-энергетический баланс (ТЭБ) отражает соотношение объемов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), поступающих от производства или импорта и уменьшающихся за счет потребления или экспорта для некоторой территории или экономического объекта [11, 12].

Энергетический баланс топлива состоит из трех основных компонентов:

- Раздел «ПОСТАВКА – первичный ресурс» включает данные о топливе, произведенном в стране и ее городах, а также о топливе, импортированном из других стран и городов или экспортированном в них, и об изменениях в ресурсах.

- Раздел преобразования источников энергии «ПРИМЕНЕНИЕ – Распространение» включает данные о количестве энергии, преобразованной из одного вида источника энергии в другой, количестве источников, использованных в процессе преобразования, внутренних потребностях процесса преобразования, а также потерях, понесенных при производстве и транспортировке.

- Раздел энергетического баланса «КОНЕЧНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ», посвященный конечному использованию, включает данные о потреблении энергии потребителями [13].

Математическая модель топливно-энергетического баланса [14] Монголии выражается как:

$$\sum E_{\text{пер. и}} = E_{\text{про}} + E_{\text{и}} - E_{\text{э}} \pm E_{\text{и. п}} \quad (2)$$

Здесь: $\sum E_{\text{п. и}}$ – сумма первичных источников, $E_{\text{про}}$ – производство энергии, $E_{\text{и}}$ – импорт энергии, $E_{\text{э}}$ – экспорт энергии, $E_{\text{и. з}}$ – изменение запасов.

$$\sum E_{\text{пот. з}} = Q_{\text{про. т}} + N_{\text{про. з}} + F_{\text{уголь}} + F_{\text{нп}} \quad (3)$$

$$\sum E_{\text{ист}} = E_{\text{кот}} + E_{\text{ТЭЦ}} + E_{\text{ВИЭ}} \quad (4)$$

$$\sum E_{\text{пре}} = Q_{\text{ТЭЦ}} + Q_{\text{котель}} + N_{\text{про. з}} + F_{\text{нп}} \quad (5)$$

$$\sum E_{\text{кон. п}} = E_{\text{и. з}} + E_{\text{пре}} + E_{\text{пот}} + E_{\text{сн}} \quad (6)$$

$$\Delta E_{\text{ст. и}} = \sum E_{\text{кон. п}} - \sum E_{\text{жэр}} \quad (7)$$

Здесь: $\sum E_{\text{пот. э}}$ – потребляемая энергия, $Q_{\text{про.т}}$ – производство теплоэнергии, $N_{\text{про.э}}$ – производство электроэнергии, $F_{\text{уголь}}$ – добыча угля, $F_{\text{нп}}$ – нефтепродукты, $E_{\text{ист}}$ – источник энергии, $E_{\text{кот}}$ – котел, $E_{\text{ТЭЦ}}$ – теплоэлектроцентраль, $E_{\text{ВИЭ}}$ – возобновляемая энергия, $\sum E_{\text{пре}}$ – преобразование энергии, $Q_{\text{ТЭЦ}}$ – производство теплоэнергии ТЭЦ, $Q_{\text{кот}}$ – производство тепловой энергии из котлов, $E_{\text{кон. п}}$ – конечное потребление, $E_{\text{пот}}^{\text{пере}}$ – потери при передаче, $E_{\text{сн}}$ – собственные нужды, $\Delta E_{\text{ст. и}}$ – статистическое изменение, $\sum E_{\text{пот}}$ – потребление отрасли (население, сельское хозяйство, промышленность, транспорт, прочие).

В таблице 6 представлен топливно-энергетический баланс Монголии, рассчитанный на основе статистических показателей 2023 года. Данные по углю взяты из Национальной статистической комиссии [15], а данные по экспорту и импорту угля – из документа «Введение в сектор внешней торговли на 2023 год» [16], подготовленного Комиссией.

Таблица 6

Table 6

Комбинированный топливно-энергетический баланс в натуральных единицах, 2023 год

Combined fuel and energy balance in natural units, 2023

ИСТОЧНИК	Уголь, тыс. Тн	У.про, тыс. Тн	Нефть, тыс. баррель	Н. про, тыс. Баррель	ВИЭ, тыс. МВт·ч	Электро- энергия, тыс. МВт·ч	Тепло- энергия, тыс. Гкал
ПОСТАВКА /первичный ресурс/							
Производство	71323		4889		773		
Импорт	23		0	2436		2448	
Экспорт	-61715	-13940	-4732			-25	
Изменение запасов	1844		-157				
Резервная сумма	11475			2436	773	2423	
ПРИМЕНЕНИЕ /Распространение/							
Преобразование энергии	-9398	-13940	0	-19.00	-773	8528	16802
Производство электрической энергии				-0.50	-773	773	0
Производство тепловой энергии	-1185						1254
ТЭЦ	-8213			-18.50		7755	15548
Обогащение угля		-13940					
Собственные нужды						-1318	-1483
Потери при передаче	-532					-1378	-3064
КОНЕЧНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ	1545	0	0	2417	0	8255	12255
Промышленность	145					4950	3602
Транспорт	19			2417		248	437
Население	552					2231	5174
Сельское хозяйство	2					83	65
Прочие виды экономической деятельности	827					743	2978
СТАТИСТИЧЕСКАЯ РАЗНИЦА	0	0	0	0	0	0	0

Примечание: угольная продукция (У.про), нефте-продукты (Н.про), возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Данные по нефти и нефтепродуктам взяты из статистики минеральных ресурсов, ежемесячно составляемой Департаментом минеральных ресурсов и нефти, исполнительным агентством Министерства минеральных ресурсов и нефти [16, 17]. Данные по ВИЭ, электричеству и теплу собраны Комиссией по регулированию энергетики в «Энергетической статистике 2023». ТЭБ рассчитывается путем перевода

единиц измерения топливно-энергетических товаров в стандартные международные единицы измерения, а именно: тонны угольного эквивалента (ТУЭ) и тонны нефтяного эквивалента (ТНЭ) [18].

Детальный расчет и моделирование ТЭБ (рис. 9) позволяют оценить потенциальную экономию энергии в секторах [19], распределяющих энергию, а также соответствующее сокращение выбросов парниковых газов за счет снижения зависимости от угля как основного источника энергии [20].

Таблица 7

Table 7

Комбинированный топливно-энергетический баланс в тоннах угольного эквивалента (т у.т), 2023 год

Combined fuel and energy balance in tons of coal equivalent (tce), 2023

ИСТОЧНИК	Уголь	У.про	Нефть	Н. Про	ВИЭ	Электро-энергия	Тепло-энергия	Всего
ПОСТАВКА /первичный ресурс/								
Производство	54776		937		95			55808
Импорт	18			486		301		805
Экспорт	-47397	-10706	-907			-3		-59013
Изменение запасов	1416		-30					1386
Резервная сумма	8813			486	95	298		9692
ПРИМЕНЕНИЕ /Распространение/								
Преобразование энергии	-7218	-10706		-28.3	-95	1049	2497	-14501
Производство электрической энергии				-0.7	-95	95		-1
Производство тепловой энергии	-910						186	-724
ТЭЦ	-6308			-13		954	2310	-3056
Обогащение угля		-10706						-10706
Собственные нужды						-162	-220	-383
Потери при передаче	-409					-169	-455	-1033
КОНЕЧНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ	1187			483		1015	1821	4506
Промышленность	112					609	535	1256
Транспорт	15			483		31	65	594
Население	424					274	769	1467
Сельское хозяйство	1					10	10	21
Прочие виды экономической деятельности	635					91	443	1169
СТАТИСТИЧЕСКАЯ РАЗНИЦА	0	0	0	0	0	0	0	0

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Закключение (Conclusion)

В настоящее время годовое потребление тепла панельными зданиями составляет 502,1 ГВт·ч или 431,7 тыс. Гкал, и кирпичными зданиями составляет 404,4 ГВт·ч или 347,7 тыс. Гкал в Улан-Батаре. Этот показатель охватывает 53 процента тепловой энергии в топливно-энергетическом балансе Монголии.

На Парижском соглашении установлена цель по сокращению выбросов CO₂ на 231 тыс. тонн к 2030 году за счет утепления многоквартирных домов. В настоящее время совместно с немецкими компаниями реализуется проект по утеплению стен зданий полистиролом толщиной 150 мм. Утепление только наружных стен без замены существующих окон позволило бы сократить выбросы CO₂ на 160,4 тыс. тонн, что не достигло бы целевого показателя, установленного в соглашении.

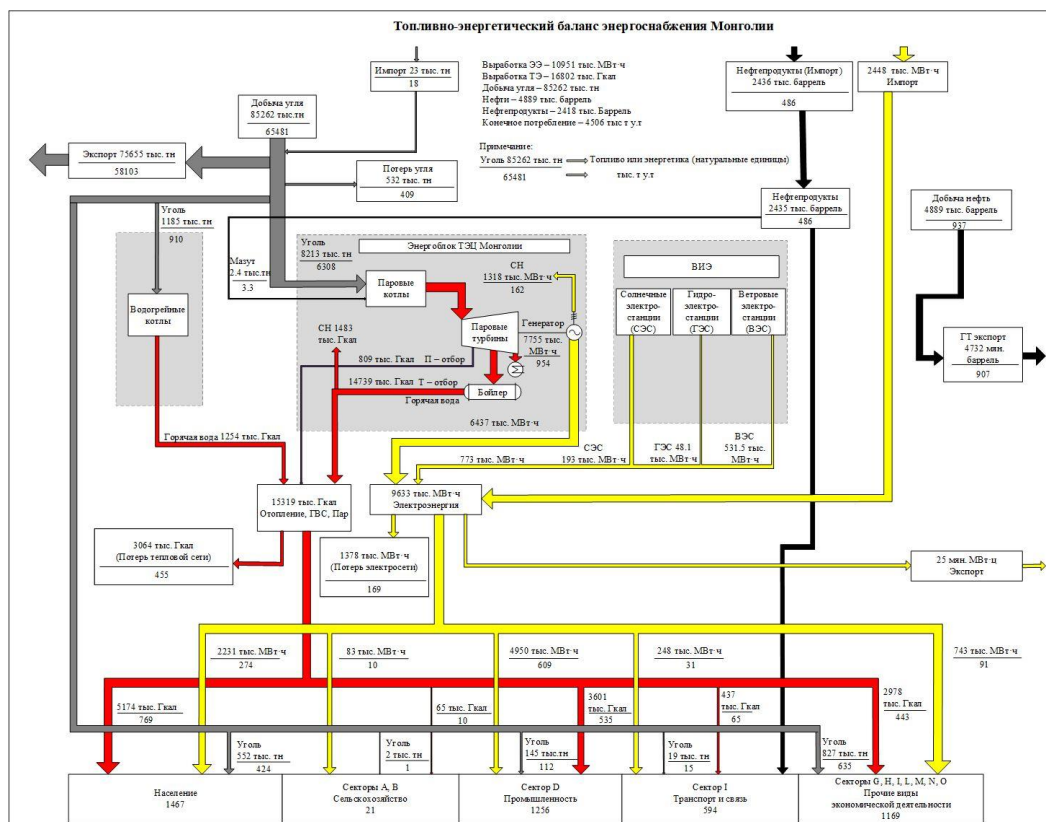


Рис. 9. ТЭБ Монголии (2023)

Fig. 9. Mongolia's fuel and energy balance (2023)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Все существующие старые здания относятся к классу энергоэффективности D. Для достижения энергоэффективности эти здания должны быть классифицированы как энергоэффективные или класса A, а все ограждения должны иметь изоляцию толщиной не менее 250 мм и коэффициентом теплопроводности 0,04 Вт/(м·К). Для панельных многоквартирных домов если учесть, что окна утеплены энергосберегающими стеклопакетами, то годовое потребление рассчитается в состав 133,8 ГВт·ч. Реализация этой меры могла бы сэкономить 368,6 ГВт·ч тепловую энергию и снизить 263,3 тыс. тонн CO₂. Это позволило бы достичь цели, поставленной на 2030 год.

А также для кирпичных многоквартирных домов годовое потребление рассчитается в состав 99,1 ГВт·ч. Реализация этой меры могла бы сэкономить 305,3 ГВт·ч тепловую энергию и снизить 218,2 тыс. тонн CO₂.

Литература

1. Цэрэндорж Ц, Султангузин И.А., Яворовский Ю.В., Яцок Т.В. Результаты расчета теплотеря здания в Улан-Баторе с помощью программ PHPP, DesignPH и ArchiCAD // Вестник МЭИ. 2025. №2. С. 102-109. DOI: 10.24160/1993-6982-2025-2-102-109.
2. Башмаков И.А., Башмаков В.И., Борисов К.Б., Дзедзичек М.Г., Луний А.А., Лебедев О.В., Мышак А.Д. Потенциал экономии энергии в многоквартирных домах России и возможности его реализации. Часть 1. Современные тренды в регулировании повышения энергоэффективности зданий// Энергосбережение. - 2023. - № 4. -С. 36-41.
3. Борисов К.Б. Анализ факторов, влияющих на повышение энергоэффективности многоквартирных домов с учетом территориально-климатических различий// Энергосбережение. - 2024. - № 4. -С. 44-51.
4. Силицын А.А., Соловьева О.В., Ахметова И.Г., Ваньков Ю.В., Закревская Л.В., Ананьев М.С., Шакурова Р.З. Результаты разработки технологии лёгких бетонов на основе диатомитовых пород и приборное исследование его теплопроводности. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(6):124-132. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-124-132>
5. Санжмолон Давааням, Исследование теплотехнических инноваций многоквартирных панельных домов // Диссертация, Университет Науки и Технологии. – 2021. – С. 5-19. (на Монгольском языке)

6. Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов / перевод с немецкого с дополнениями под редакцией А.Е.Елохова. – М.: ООО «КОНТИ ПРИНТ»: – Москва: – 2015. – С.142.
7. Passive House Institute (PHI), The independent institute for outstanding energy efficiency in buildings, URL: <https://passivehouse.com/index.html>
8. Яворовский Ю. В., Султангузин И. А., Кругликов Д. А., Калякин И. Д., Яцюк Т. В. Сравнение результатов энергетического моделирования жилого дома с помощью разных программных средств // Вестник МЭИ. 2020. № 3. С. 31–39.
9. Султангузин И.А., Говорин А.В., Яцюк Т.В., Калякин И.Д., Яворовский Ю.В., Чайкин В.Ю., Бу Дакка Б., Цэрэндорж Ц. Достижение нулевого углеродного следа в единой системе «энергоэффективный дом – электромобиль». Часть 1. // Энергосбережение. - 2024. - № 5. –С. 16-22.
10. Сводный правил, «Тепловая защита зданий», СП 25-01-20, (на Монгольском языке)
11. Яворовский Ю.В., Султангузин И.А., Бартенев А.И., Калякин И.Д., Яшин А.П. Методология стратегического планирования развития города на основе моделирования и оптимизации топливно-энергетического баланса // Журнал СОК, № 9, 2022. С. 44 – 50.
12. Б.Намхайням, «Методология составления национального топливно-энергетического баланса», МГУНТ – Институт теплотехники и промышленной экологии, стр.27, 2024. (на Монгольском языке)
13. Яворовский Ю.В. Оптимизация топливно-энергетического баланса металлургических предприятий на основе применения парогазовых технологий // Вестник МЭИ. 2024. №6. С. 101-110. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-6-101-110
14. Y. V. Yavorovsky, I. A. Sultanguzin, A. I. Bartenev, I. D. Kalyakin and A. P. Yashin, "Development of a program for creation of the fuel and energy balance of the city," 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/REEPE53907.2022.9731495.
15. Национальный статистический комитет, статистические данные, «национальный баланс угля», «тепловой баланс», «производство основных видов промышленной продукции в целом по стране», 2023. URL: <https://www.1212.mn/mn/statistic/statcate/573060/table/573060> (на Монгольском языке)
16. Национальный статистический комитет, «Обзор сектора внешней торговли», Внешняя торговля 2023. URL: <http://web.nso.mn/onlinechat/index.ph> (на Монгольском языке)
17. Правительственное агентство по реализации: Министерство минеральных ресурсов и нефти, Статистика минеральных ресурсов, 2023/1, URL: <http://mrpm.gov.mn>, (на Монгольском языке)
18. Приказ Министерства энергетики РФ от 29 октября 2021 г. № 1169 "Об утверждении Порядка составления топливно-энергетических балансов субъектов Российской Федерации, муниципальных образований", Регистрационный № 65788, УТВЕРЖДЕН приказом Минэнерго России от 29.10.2021 г. № 1169 URL: www.garant.ru
19. Monakov, Y., Tarasov, A., Ivannikov, A., Murzintsev, A., & Shutenko, N. (2023). Optimization of Equipment Operation in Power Systems Based on the Use in the Design of Frequency-Dependent Models. Energies, 16(18), 6756. <https://doi.org/10.3390/en16186756>.
20. Proceedings of the international conference on energy transition: technology and ecology (ICETTE-2025), Contributing to Strategic Energy Planning Through the Optimization of Fuel and Energy Balance of Mongolia // -2025. - pp. 9-16.

Авторы публикации

Цэрэндорж Цэцгээ – ассистент и аспирант кафедры Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0009-4827-7221>. tserendorzhT@mpei.ru

Ахметова Ирина Гареевна – д-р техн. наук, проректор по развитию и инновациям Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. irina_akhmetova@mail.ru

Султангузин Ильдар Айдарович – д-р техн. наук, профессор кафедры Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-6324-5214>. SultanguzinIA@mpei.ru

Калякин Иван Дмитриевич – канд. техн. наук, кафедры Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0007-2285-9309>. KaliakinID@mpei.ru

Лувсандорж Батмэнд – аспирант кафедры автоматизации и теплоснабжения Монгольского государственного университета науки и технологии, г. Улан-Батор, Монголия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0003-1342-1955>. batmend@yandex.com

References

1. Tserendorzh Ts., Sultanguzin I.A., Yavorovsky Yu.V., Yatsuk T.V. The Heat Loss Calculations for Buildings in Ulaanbaatar by Using the PHPP, DesignPH and ArchiCAD Computer Programs. Bulletin of MPEI. 2025;2:102-109. (in Russ) DOI: 10.24160/1993-6982-2025-2-102-109.
2. Bashmakov I.A., Bashmakov V.I., Borisov K.B., Dzedzicek M.G., Lunin A.A., Lebedev O.V., Myshak A.D. Energy saving potential in apartment buildings in Russia and the possibilities of its implementation. Part 1. Modern trends in regulating the improvement of energy efficiency of buildings// Energy saving. - 2023. - No. 4. –P. 36-41. (In Russ.)
3. Borisov K.B. Analysis of factors influencing the increase in energy efficiency of apartment buildings, taking into account territorial and climatic differences // Energy saving. - 2024. - No. 4. –P. 44-51. (In Russ.)
4. Sinitin A.A., Soloveva O.V., Akhmetova I.G., Vankov Y.V., Zakrevskaya L.V., Ananiev M.S., Shakurova R.Z. Results of the development of the technology of light-weight concrete based on diatomite rocks and instrument study of its thermal conductivity. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(6):124-132. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-124-132>
5. Sanjmolom Davaanyam, Research of thermal innovations of multi-apartment panel buildings // Dissertation, University of Science and Technology. - 2021. - P. 5-19. (In Mon.)
6. Feist V. Basic principles for the design of passive houses / translation from German with additions edited by A.E. Elokhov. - M.: OOO "KONTI PRINT": - Moscow: - 2015. - P. 142. (In Russ.)
7. Passive House Institute (PHI), The independent institute for outstanding energy efficiency in buildings, URL: <https://passivehouse.com/index.html>
8. Yavorovsky Yu. V., Sultanguzin I. A., Kruglikov D. A., Kalyakin I. D., Yatsyuk T. V. Comparison of the results of energy modeling of a residential building using different software. Bulletin MPEI. 2020. No. 3. pp. 31–39. (In Russ.)
9. Sultanguzin I.A., Govorin A.V., Yatsyuk T.V., Kalyakin I.D., Yavorovsky Yu.V., Chaikin V.Yu., Bu Dakka B., Tserendorzh Ts. Achieving zero carbon footprint in a single "energy-efficient house - electric car" system. Part 1. // Energy saving. - 2024. - No. 5. –P. 16-22. (In Russ.)
10. Building codes and regulations, "Thermal performance of buildings", SP 25-01-20, (In Mon.)
11. Yavorovsky Yu.V., Sultanguzin I.A., Bartenev A.I., Kalyakin I.D., Yashin A.P. Methodology of strategic planning of city development based on modeling and optimization of the fuel and energy balance // SOK Magazine, No. 9, 2022. Pp. 44–50. (In Russ.)
12. B. Namkhainyam, "Methodology for compiling a national fuel and energy balance," MSUNT – Institute of Thermal Engineering and Industrial Ecology, p. 27, 2024. (In Mon.)
13. Yavorovsky Yu.V. Optimization of the fuel and energy balance of metallurgical enterprises based on the use of combined-cycle technologies. Bulletin MPEI. 2024. No. 6. P. 101-110. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-6-101-110
14. Y. V. Yavorovsky, I. A. Sultanguzin, A. I. Bartenev, I. D. Kalyakin and A. P. Yashin, "Development of a program for creation of the fuel and energy balance of the city," 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/REEPE53907.2022.9731495.
15. National Statistical Committee, statistical data, "national coal balance", "heat balance", "production of main types of industrial products in the country as a whole", 2023. (In Mon.) URL: <https://www.1212.mn/mn/statistic/statcate/573060/table/573060>
16. National Statistical Committee, "Foreign Trade Sector Review", Foreign Trade 2023. URL: <http://web.nso.mn/onlinechat/index.ph> (In Mon.)
17. Government implementing agency: Ministry of Mineral Resources and Petroleum, Mineral Resources Statistics, 2023/1, URL: <http://mrpam.gov.mn>, (In Mon.)
18. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated October 29, 2021 No. 1169 "On approval of the Procedure for compiling fuel and energy balances of constituent entities of the Russian Federation, municipalities", Registration No. 65788, APPROVED by Order of the Ministry of Energy of Russia dated October 29, 2021 No. 1169 URL: www.garant.ru (In Russ.)
19. Monakov, Y., Tarasov, A., Ivannikov, A., Murzintsev, A., & Shutenko, N. (2023). Optimization of Equipment Operation in Power Systems Based on the Use in the Design of Frequency-Dependent Models. Energies, 16(18), 6756. <https://doi.org/10.3390/en16186756>.
20. Proceedings of the international conference on energy transition: technology and ecology (ICETTE-2025), Contributing to Strategic Energy Planning Through the Optimization of Fuel and Energy Balance of Mongolia // -2025. - pp. 9-16.

Authors of the publication

Tsetsgee Tserendorj – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0009-4827-7221>. tserendorzhT@mpei.ru

Irina G. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. irina_akhmetova@mail.ru

Ildar A. Sultanguzin – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-6324-5214>. SultanguzinIA@mpei.ru

Ivan D. Kalyakin – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0007-2285-9309>. KaliakinID@mpei.ru

Batmand Luvsandorj – Mongolian University Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0003-1342-1955>. batmend@yandex.com

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **01.10.2025 г.**

Отредактировано **22.10.2025 г.**

Принято **02.11.2025 г.**



РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ

Варфоломеева О.И., Тененев В.А., Хворенков Д.А.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
г. Ижевск, Россия
varfolomeevaoi@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Достоверное математическое описание процессов, сопровождающих нестационарные течения реагирующих горючих смесей газов, актуально для широкого круга задач, связанных с топочной техникой и теплогенерирующими установками. Разработка инструмента для численного моделирования котловых процессов позволит прогнозировать режимы и условия работы их элементов для улучшения технико-экономических показателей установки в целом. **ЦЕЛЬ.** Разработка математической модели, описывающей трехмерные нестационарные течения реагирующей смеси газов в топочных камерах, котельных пучках и газоходах котельных агрегатов. Рассмотрена возможность применения метода С.К. Годунова к численному моделированию процессов в топочных устройствах и конвективных элементах котельного агрегата. **МЕТОДЫ.** Трудоемкость моделирования топочных процессов связана с их нестационарностью, сложностью конфигурации расчетной области, что требует решения задачи в трехмерной постановке, протеканием процесса горения и наличием сопряженных процессов теплообмена с элементами котла. Поэтому математическая модель, описывающая течения реагирующей смеси газов в топочных камерах, котельных пучках и газоходах котельных агрегатов включает в себя трехмерные нестационарные уравнения Навье-Стокса, энергии и турбулентности. Процесс горения природного газа в топке описывается в рамках простой химически реагирующей системы (ПХРС). Для учета процесса горения предложено добавить в уравнение переноса энергии источник, эквивалентный диффузионному горению при допущениях ПХРС. Для численной реализации математической модели процессов в элементах котла применен метод С.К. Годунова в сочетании со схемой MUSCL, обеспечивающей второй порядок аппроксимации разностных уравнений. **РЕЗУЛЬТАТЫ и ОБСУЖДЕНИЕ.** Разработана и численно реализована математическая модель, пригодная для расчета процессов гидродинамики и тепломассообмена в водотрубных котельных агрегатах. С помощью разработанного пакета прикладных программ выполнены ряд расчетов для водогрейного водотрубного котла марки КВ-ГМ-1,25-115. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Предлагаемый подход к решению задачи разработки модели, пригодной для численного анализа топочных процессов, позволяет получить универсальный инструмент для расчетов и проектирования теплогенерирующих установок, который может быть применен для определения параметров тепловых и газодинамических процессов в котельных агрегатах. Это позволит усовершенствовать существующие конструкции или разработать новые с улучшенными технико-экономическими характеристиками, а также выявить и разрешить локальные проблемы, которые мешают работе котла и не решаются с помощью инженерных методов расчета.

Ключевые слова: топочные процессы; газовая динамика; теплообмен; численное моделирование; горение.

Для цитирования: Варфоломеева О.И., Тененев В.А., Хворенков Д.А. Разработка универсальной модели для численного анализа топочных процессов в теплогенерирующих установках // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 171-186. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-171-186.

DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL MODEL FOR NUMERICAL ANALYSIS OF FIREBOX PROCESSES IN HEAT-GENERATING PLANTS

Varfolomeeva O.I., Tenenev V.A., Khvorenkov D.A.

Kalashnikov State Izhevsk Technical University, Izhevsk, Russia

varfolomeevaoi@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* A reliable mathematical description of the processes accompanying unsteady flows of reacting combustible gas mixtures is relevant for a wide range of tasks related to furnace technology and heat generating plants. The development of a tool for numerical simulation of boiler processes will make it possible to predict the modes and operating conditions of their elements in order to improve the technical and economic performance of the installation as a whole. *PURPOSE.* Development of a mathematical model describing three-dimensional unsteady flows of a reacting mixture of gases in combustion chambers, boiler bundles and flues of boiler units. The possibility of applying S.K. Godunov's method to numerical modeling of processes in furnace devices and convective elements of a boiler unit is considered. *METHODS.* The complexity of modeling furnace processes is related to their non-stationarity, the complexity of the configuration of the computational domain, which requires solving the problem in a three-dimensional formulation, the course of the combustion process and the presence of associated heat exchange processes with boiler elements. Therefore, the mathematical model describing the flows of a reacting mixture of gases in combustion chambers, boiler bundles and flues of boiler units includes three-dimensional unsteady Navier-Stokes equations of energy and turbulence. The process of natural gas combustion in a firebox is described within the framework of a simple chemically reactive system (SCRS). To account for the combustion process, it is proposed to add to the energy transfer equation a source equivalent to diffusion combustion under the assumptions of SCRS. To numerically implement a mathematical model of processes in boiler elements, the S.K. Godunov method was used in combination with the MUSCL scheme, which provides a second-order approximation of difference equations. *RESULTS and DISCUSSIONS.* A mathematical model suitable for calculating the processes of hydrodynamics and heat and mass transfer in water-tube boiler units has been developed and numerically implemented. Using the developed application software package, a number of calculations were performed for the KV-GM-1,25-115 hot water tube boiler. *CONCLUSION.* The proposed approach to solving the problem of developing a model suitable for numerical analysis of combustion processes makes it possible to obtain a universal tool for calculating and designing heat generating plants, which can be used to determine the parameters of thermal and gas-dynamic processes in boiler units. This will make it possible to improve existing structures or develop new ones with improved technical and economic characteristics, as well as identify and resolve local problems that interfere with boiler operation and are not solved using engineering calculation methods.

Keywords: firebox processes; gas dynamics; heat transfer; numerical modeling; combustion.

For citation: Varfolomeeva O.I., Tenenev V.A., Khvorenkov D.A. Development of a universal model for numerical analysis of firebox processes in heat-generating plants. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 171-186. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-171-186.

Введение (Introduction)

Задача достоверного математического описания процессов, сопровождающих нестационарные течения реагирующих горючих смесей газов, актуальна для широкого круга задач, связанных с топочной техникой и теплогенерирующими установками. Технические устройства, в которых организовано сжигание топлива для получения тепловой энергии, как правило, в своей конструкции имеют такие элементы, как горелочные устройства, которые обеспечивают подачу компонентов с требуемыми параметрами, топочный объем, в котором размещаются поверхности нагрева, газоходы котельного агрегата и системы дымоудаления. Трудоемкость моделирования связана с нестационарностью процессов; сложностью конфигурации расчетной области, что требует решения задачи в трехмерной постановке; протеканием процесса горения; и наличием сопряженных процессов теплообмена с элементами котла. Необходимо

заметить, что некорректность расчета топочных процессов и тепломассообмена в элементах котла может быть критична, т.к. результаты расчета влияют на все основные характеристики котлоагрегата, которые определяют и компоновочные решения, и энергоэффективность котла, характеризующую КПД, и теплогенерирующей установки в целом. Очевидно, что такой показатель, как КПД котла имеет определяющее значение при проектировании и конструировании котельной техники, влияет на экономические показатели теплогенерирующего объекта в целом в течение всего его жизненного цикла.

Целью исследования является разработка пакета программ для численного моделирования газодинамических и тепловых процессов в элементах теплогенерирующих установок. Разработанная математическая модель предназначена для численного анализа трехмерных нестационарных течений реагирующей смеси газов в топочных камерах, котельных пучках и газоходах котельных агрегатов и включает в себя уравнения Навье-Стокса, энергии, уравнения, описывающие модель турбулентности и модель горения на основе простой химически реагирующей системы (далее ПХРС). Научная значимость исследования состоит в том, что предлагаемая модификация модели ПХРС позволяет адекватно описывать влияние тепловыделения от химической реакции горения без существенного усложнения математической модели.

Практическая значимость исследования заключается в расширении возможностей применения разработанной модели для оптимизации конструкций элементов устройств сжигания топлива и улучшения их технико-экономических показателей, в том числе на стадии разработки конструкции котельного агрегата.

Литературный обзор (Literature Review)

Инженерный подход к расчету топочных устройств и систем дымоудаления котельных агрегатов приведен в нормативном методе теплового расчёта котельных агрегатов. С практической точки зрения такой подход является продуктивным, когда необходимо выполнить расчет систем дымоудаления при проектировании котельных установок, либо при выполнении поверочных расчетов элементов котла. Тепловой расчет котла в полной постановке является чрезвычайно трудоемким, однако не позволяет учесть все особенности конструкции и протекания процессов, поэтому применение методов математического моделирования позволяет решать эту задачу с максимальной детализацией и с учетом всех возможных особенностей протекающих процессов.

Так в статье [1] представлена математическая модель гидродинамики и теплообмена в прямоточном паровом котле, основанная на одномерных нестационарных уравнениях, которая может применяться для котлов с циркуляцией. Обзор современных технологий, последних разработок в области высокотемпературных теплообменников приведен в [2]. В статье [3] проведен термодинамический анализ газового котельного агрегата на основе численной модели, реализованной на языке программирования Modelica. Модель горения основана на фиксированном расходе природного газа с заданным составом, который при сгорании образует стабильную смесь дымовых газов, процесс теплопередачи происходит от дымовых газов к циркулирующей воде. В статье [4] разработана модель теплопередачи и гидродинамики для изучения работы котла с циркуляцией рабочего тела в условиях переменной нагрузки. Модель позволяет рассчитывать независимо контуры экранных труб и конвективные пучки. В [5] представлены результаты исследования теплопередачи в установках утилизации тепла дымовых газов котлов, получены полуэмпирическая формула, устанавливающая зависимость между температурой точки росы и коэффициентом теплопередачи дымовых газов, безразмерная формула, устанавливающая взаимосвязь между коэффициентом теплопередачи и эксплуатационными параметрами котельного агрегата.

Вопросы применения численного моделирования, как инструмента расчета и оптимизации существующих конструкций котельных агрегатов рассмотрены, например, в [6-10, 13-15]. Как правило, в качестве инструментов применяются программные продукты комплексного расчета аэрогидродинамических течений при наличии тепломассообмена, химических реакций в многофазных системах сложной геометрии [10, 12] (FLUENT, FlowVision), а также специализированные программные продукты, предназначенные для расчета котельных агрегатов [6, 8], такие как SigmaFlame, FIRE 3D и др. Применение закрытых программных кодов ограничено интерфейсом программы и не всегда позволяет учесть особенности решаемых задач. Внутренние численные схемы и алгоритмы часто закрыты, а причины расходимости вычислительного процесса сложно определить. Адаптация программных продуктов под нестандартные задачи может быть сложна или невыполнима. Зачастую реальные процессы такие как многофазность, кинетика, горение описываются аппроксимационными зависимостями, которые могут некорректно

описывать конкретные задачи. Разработка своего программного продукта для решения конкретной задачи позволяет исключить недостатки применения известных программных продуктов для расчета течений, сопряженных с тепломассообменом.

Исследование топочных процессов в установках для сжигания топлива проведены рядом авторов с помощью пакетов программ собственной разработки, например, в работе [14, 15] приведены результаты теплового расчета камеры радиации печи пиролиза углеводородов на основе системы уравнений сохранения для сжимаемого реагирующего потока.

Материалы и методы (Materials and methods)

Математическая модель, пригодная для численного анализа трехмерных нестационарных течений реагирующей смеси газов в топочных камерах, котельных пучках и газоходах котельных агрегатов, включает в себя уравнения Навье-Стокса, энергии и уравнения, описывающие модель турбулентности. Расчетная область представляет собой газовый объем котельного агрегата, где организованы процессы горения, теплообмена и отвода продуктов сгорания. Газовый объем котельного агрегата включает в себя части, существенно отличающиеся по конструкции и протекающим в них процессам. Поэтому весь газовый тракт котельного агрегата разбивается на несколько расчетных областей, сопряженных друг с другом, для каждой из которых может применяться своя система координат.

Пример расчетной области водогрейного водотрубного котла с топочной камерой, смежной с газоходом, и расчетная сетка показаны на рисунке 1. Топочный объем I отделен от конвективного пучка II газоплотной перегородкой IV. Продукты сгорания в топочной камере разворачиваются вдоль перегородки и перенаправляются в конвективный пучок. Для такой компоновки газового тракта расчетная область разделена на две части (рис. 1б). Первая часть, топочная камера, является осесимметричной, в ней используется цилиндрическая система координат (x, r, φ) . Во второй части, конвективном пучке, применяется прямоугольная система координат (x, y, z) .

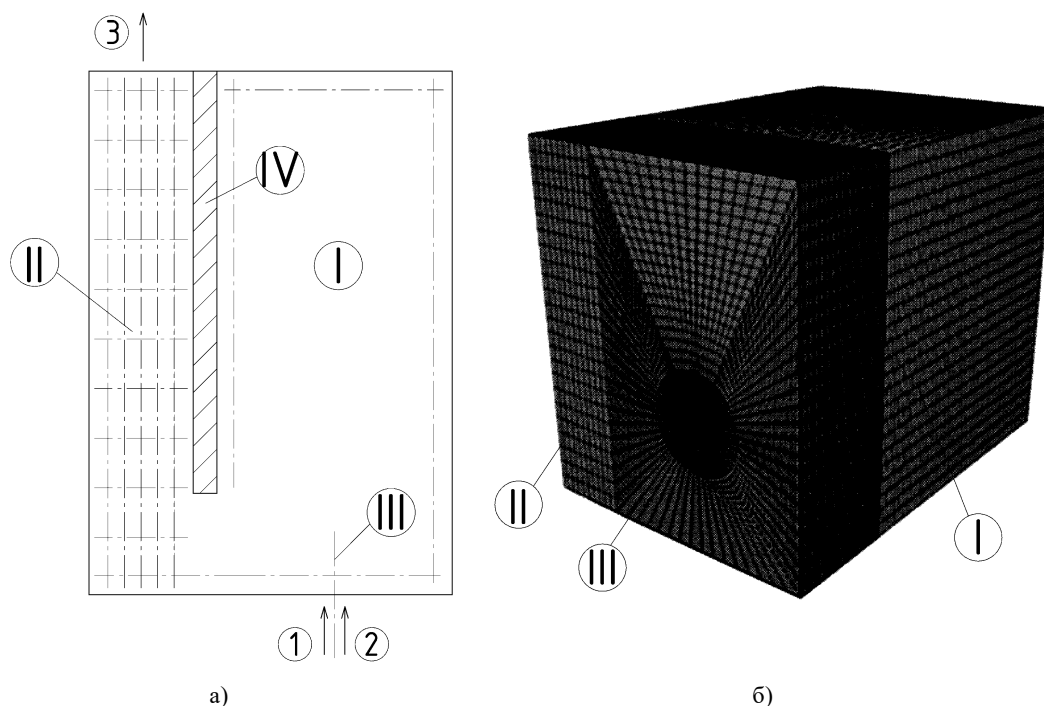


Рис. 1. Газовый объем котельного агрегата: а) в плане; б) расчетная сетка; I – топочная камера; II – конвективная часть; III – ось горелки; 1 – вход топлива; 2 – вход воздуха; 3 – выход продуктов сгорания

Fig. 1. Gas volume of the boiler unit: a) in plan; b) calculation grid; I – combustion chamber; II – convective section; III – burner axis; 1 – fuel inlet; 2 – air inlet; 3 – combustion product outlet

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Безразмерные уравнения, описывающие нестационарное неизотермическое течение реагирующего вязкого теплопроводного газа, имеют следующий вид:

$$\frac{\partial(\xi_\beta^m \sigma)}{\partial \tau} + \frac{\partial[\xi_\beta^m (a - a_v)]}{\partial \xi_\alpha} + \frac{\partial[\xi_\beta^m (b - b_v)]}{\partial \xi_\beta} + \frac{\partial(c - c_v)}{\partial \xi_\gamma} = S \quad (1)$$

В зависимости от выбранной для расчетной области системы координат, координатами являются:

$$(\xi_\alpha, \xi_\beta, \xi_\gamma) = \begin{cases} (x, y, z) | m=0 \\ (x, r, \varphi) | m=1 \end{cases}, \quad (2)$$

где величина m определяет систему координат, а именно, $m=0$ соответствует декартовой системе координат, а $m=1$ – цилиндрической.

Векторы переменных, входящих в (1) записываются в виде

$$\begin{aligned} \sigma &= \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E \\ \rho k \\ \rho \varepsilon \end{pmatrix}, \quad a = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho v u \\ \rho w u \\ u(E + p) \\ \rho u k \\ \rho u \varepsilon \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho u v \\ \rho v^2 + p \\ \rho w v \\ v(E + p) \\ \rho v k \\ \rho v \varepsilon \end{pmatrix}, \quad c = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho u w \\ \rho v w \\ \rho w^2 + p \\ w(E + p) \\ \rho w k \\ \rho w \varepsilon \end{pmatrix}, \\ a_v &= \frac{1}{\text{Re}_0} \begin{pmatrix} 0 \\ \pi_{11} \\ \pi_{21} \\ \pi_{31} \\ \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{V} + \frac{(f_\varepsilon + \mu_T)}{\text{Pr}_T} \rho \gamma \frac{\partial U}{\partial \xi_\alpha} \\ \left(\Phi + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \rho \frac{\partial k}{\partial \xi_\alpha} \\ \left(\Phi + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi_\alpha} \end{pmatrix}, \quad b_v = \frac{1}{\text{Re}_0} \begin{pmatrix} 0 \\ \pi_{12} \\ \pi_{22} \\ \pi_{32} \\ \mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{V} + \frac{(\Phi + \mu_T)}{\text{Pr}_T} \rho \gamma \frac{\partial U}{\partial \xi_\beta} \\ \left(\Phi + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \rho \frac{\partial k}{\partial \xi_\beta} \\ \left(\Phi + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi_\beta} \end{pmatrix}, \\ c_v &= \frac{1}{\text{Re}_0} \begin{pmatrix} 0 \\ \pi_{13} \\ \pi_{23} \\ \pi_{33} \\ \mathbf{p}_3 \cdot \mathbf{V} + \frac{(\Phi + \mu_T)}{\text{Pr}_T} \rho \gamma \frac{\partial U}{\partial \xi_\gamma} \\ \left(\Phi + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \rho \frac{\partial k}{\partial \xi_\gamma} \\ \left(\Phi + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi_\gamma} \end{pmatrix}, \quad s = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ m \left(p + \rho w^2 - \frac{\pi_{33}}{\text{Re}_0} \right) \\ m \left(-\rho v w + \frac{\pi_{23}}{\text{Re}_0} \right) \\ Q_T \\ \xi_\beta^m \rho (\chi D^2 - \varepsilon) \\ \xi_\beta^m \frac{\varepsilon}{k} \rho (\chi C_1 D^2 - c_2 \varepsilon) \end{pmatrix}, \quad (3) \end{aligned}$$

где σ – вектор зависимых переменных; a , b , c – конвективные члены; a_v , b_v , c_v – вязкие члены; S – источниковые члены; ρ – плотность газа; T – температура; Re_0 – число Рейнольдса; ε – полная энергия единицы объема газа; U – внутренняя энергия,

определяемая из уравнения состояния идеального газа; γ – показатель адиабаты; Pr_T – число Прандтля; $\mathbf{V} = (u, v, w)^T$ – вектор скорости в проекциях на векторы выбранного базиса $(\xi_\alpha, \xi_\beta, \xi_\gamma)$.

$$\text{Здесь } \text{Re}_0 = \frac{r_0 c_a^*}{\nu_0}; e = \rho U + \rho \frac{|\mathbf{V}|^2}{2}; U = c_v T = \frac{p}{(\gamma-1)\rho}; \gamma = \frac{c_p}{c_v}, \text{ где } c_p \text{ и}$$

c_v – изобарные и изохорные теплоемкости.

Значения скорости и плотности нормируются относительно критических значений c_a^* и ρ^* . Давление p и энергия e нормируются относительно комплекса $\rho^* \cdot (c_a^*)^2$, где $c_a^* = \sqrt{\gamma \frac{p^*}{\rho^*}}$ – скорость звука. Для определения критических значений плотности и давления в зависимости от параметров торможения применяются следующие соотношения:

$$\rho^* = \rho_0 \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}}, p^* = p_0 \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{-\frac{1}{\gamma-1}}.$$

Энергия турбулентности k и скорость диссипации энергии турбулентности ε нормируются относительно комплексов ν_0/τ и ν_0/τ^2 соответственно. Здесь $\tau = r_0/c_a^*$ – масштаб времени, r_0 – пространственный масштаб, ν_0 – коэффициент кинематической вязкости при температуре торможения T_0 .

Турбулентная вязкость определяется соотношением $\mu_T = c_\mu k^2/\varepsilon$ и нормируется относительно ν_0 . Температурная зависимость кинематической вязкости описывается формулой Сатерленда:

$$\nu_T = \nu_0 \Phi,$$

$$\text{где } \Phi = \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{1.5} \frac{U_0 + U_s}{U + U_s}; U_0 = \frac{c_v T_0}{(c_a^*)^2}; U_s = \frac{c_v S_1}{(c_a^*)^2}.$$

Компоненты π_{ij} , входящие в состав вязких членов, образуют тензор $\mathbf{p}_i = (\pi_{ij})$:

$$\Pi = \rho(\Phi + \mu_T) \left(2 \text{def}(\mathbf{V}) - \frac{2}{3} \text{div}(\mathbf{V}) \right).$$

$$\text{В соотношениях (3) } C_1 = c_1 - \frac{\eta_\varepsilon}{1 + \beta_\varepsilon \eta_\varepsilon^3} \left(1 - \frac{\eta_\varepsilon}{\eta_{\varepsilon 0}} \right), \text{ где } \eta_\varepsilon = \frac{k \sqrt{2D^2}}{\varepsilon},$$

$$D = \text{def}(\mathbf{V}).$$

Приняты следующие значения констант $S_1 = 122 \text{ K}$; $c_\mu = 0.085$; $c_1 = 1.42$; $c_2 = 1.68$; $\beta_\varepsilon = 0.012$; $\eta_{\varepsilon 0} = 4.38$; $\sigma_k = 0.72$; $\sigma_\varepsilon = 0.72$.

Для математического описания процесса горения топлива используется модель горения простой химически реагирующей системы (далее ПХРС), которая включает три компонента – горючее, окислитель, продукты сгорания. Согласно модели, состояние газовой смеси в любой точке пламени характеризуется двумя параметрами: параметр смешения, отражающий степень перемешивания горючего и окислителя в данной точке пламени в результате молекулярной и турбулентной диффузии, и параметр химической реакции, характеризующий степень протекания химической реакции.

В рамках модели ПХРС используется понятие переноса сохраняющегося свойства j , которое определяется отношением суммарной концентрации непрореагировавших

компонентов (горючее и окислитель) к их исходной концентрации. Если обозначить n_i – концентрации компонентов (« i » соответствует: « $fuel$ » – горючий; « air » – окислительный и « $inert$ » – инертный компоненты газа), то получим выражение для j :

$$j = \frac{n_{fuel} - \frac{n_{air}}{\phi} + \frac{n_{air0}}{\phi}}{n_{fuel0} + \frac{n_{air0}}{\phi}}, \quad (4)$$

где индекс « $fuel$ » соответствует параметрам на поверхности подачи горючего, а « air » – на поверхности подачи воздуха. Индекс « 0 » обозначает параметр на входе компонента в расчетную область. Величина ϕ определяет стехиометрическое соотношение компонентов по формуле $n_{fuel} = n_{air} / \phi$.

Из комбинации уравнения энергии и уравнений для концентраций получено выражение, связывающее j с температурой:

$$j = \frac{c_p(T - T_{air0}) + n_{fuel}Q_l}{c_p(T_{fuel0} - T_{air0}) + n_{fuel0}Q_l}, \quad (5)$$

где c_p – теплоемкость при постоянном давлении, Q_l – низшая теплота сгорания топлива.

Добавим к системе еще одно уравнение:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} j) = \nabla \cdot D_j \nabla j, \quad (6)$$

где $D_j = (\Phi + \phi) / \text{Pr}_T$ – коэффициент переноса.

В уравнении (6) граничные условия на поверхности подачи горючего – $j = 1$, на поверхности подачи окислителя – $j = 0$.

Положение фронта пламени определяется условием:

$$j_f = \frac{\frac{n_{air0}}{\phi}}{n_{fuel0} + \frac{n_{air0}}{\phi}}. \quad (7)$$

Используя соотношение (7), можно определить значения концентрации горючего n_{fuel} и окислителя n_{air} , а также температуру газа:

$$\begin{aligned} &\text{–при } j < j_f, n_{fuel} = 0, n_{air} = n_{air0} \frac{j_f - j}{j_f}, T_{comb} = T_{air} + \frac{j}{j_f} (T_a - T_{air}); \\ &\text{–при } j > j_f, n_{air} = 0, n_{fuel} = n_{fuel0} \frac{j_f - j}{j_f - 1}, T_{comb} = T_{fuel} + \frac{1 - j}{1 - j_f} (T_a - T_{fuel}). \end{aligned} \quad (8)$$

Температура в стехиометрической смеси при адиабатных условиях T_a определяется соотношением:

$$T_a = T_{air} + \left(T_{fuel} - T_{air} + \frac{Q_l}{c_p} \right) j_f,$$

где T_{air} , T_{fuel} , T_{comb} – температура воздуха и топлива на входе и температура продуктов сгорания соответственно. Соотношения (8) для температуры использовались в предположении оптически тонкого газа, что справедливо для продуктов сгорания газа в воздухе.

Температура, определенная по (8), не учитывает движения продуктов горения. Для уравнения энергии в рамках модели ПХРС необходимо определить приход энергии в результате сгорания газа $Q = \dot{m}Q_l$. Для нахождения прихода энергии необходимо определить массовую скорость горения \dot{m} , что требует задания констант химических реакций и выходит за рамки ПХРС. При рассмотрении стационарной картины сгорания система дифференциальных уравнений решается методом установления. В этом случае

введем выражение для Q , чтобы согласовать величину температуры продуктов сгорания T , полученную из уравнения энергии, с температурой T_{comb} :

$$Q = z \left| \frac{T_{comb} - T}{T_a} \right| \left(\frac{T_{comb} - T}{T_a} \right),$$

где β – итерационный коэффициент, определяемый как $z = G(U_{comb} - U) \left| \frac{T_a^2}{T_{comb} - T} \right|$,

где G – расход топлива в рамках модели ПХРС; $(U_{comb} - U)$ – разница внутренней энергии топлива в рамках модели ПХРС и по результатам численного расчета; $(T_{comb} - T)$ – разность температуры смеси, вычисленной в рамках модели ПХРС и по результатам численного расчета.

В процессе установления T стремится к T_{comb} . Пример процесса установления приведен на рисунке 2.

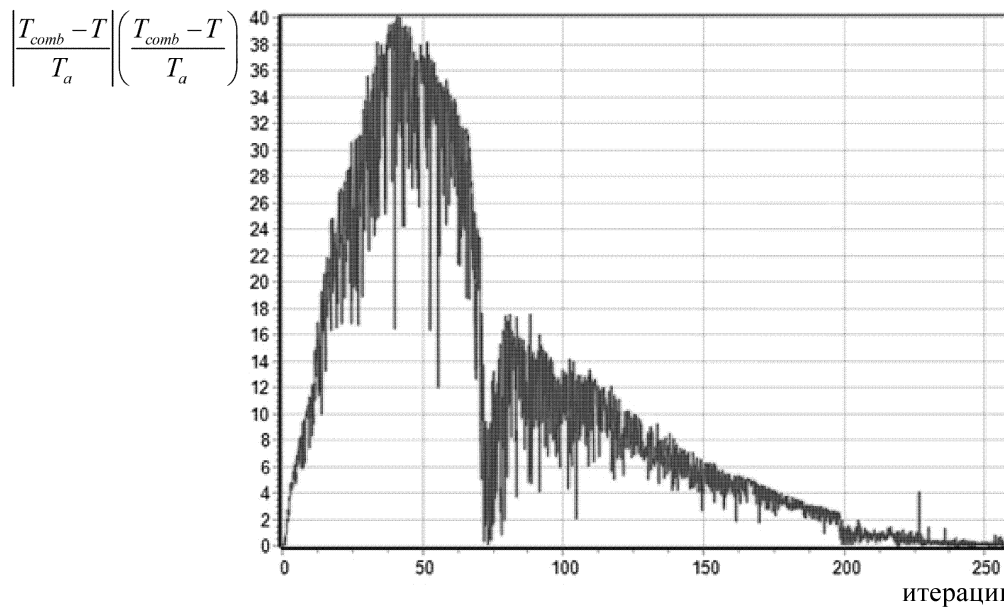


Рис. 2. Процесс установления $T \rightarrow T_{comb}$

Fig. 2. Establishment of the numerical solution $T \rightarrow T_{comb}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для уравнения (1) заданы следующие граничные условия:

– входная граница: заданы вектор скорости; условие постоянства энтропии; соотношения на характеристике, входящей в область; начальные уровни турбулентности k и ε , соответствующие $\mu_T = 1$;

– выходная граница: заданы давление p_a ; «мягкие» условия для k и ε ;

– твердые стенки: заданы условие прилипания для скорости; нулевые градиенты по направлению нормали для k и ε ; для уравнения энергии – условия теплообмена со стенками.

Система уравнений (1) численно решается методом контрольного объема [17]. Выражение для потоков величин через грань g :

$$\Pi_g = \Delta \tau^n \cdot l_g \begin{bmatrix} \Gamma(\Omega - \Theta) \\ \Gamma(\Omega - \Theta)U - v_x P \\ \Gamma(\Omega - \Theta)V - v_y P \\ \Gamma(\Omega - \Theta)W - v_z P \\ \Gamma(\Omega - \Theta)E - \Theta P \\ \Gamma(\Omega - \Theta)K \\ \Gamma(\Omega - \Theta)\Xi \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где Γ – плотность; U, V, W – скорости; E – энергия; P – давление; K – энергия турбулентности; Ξ – скорость диссипации; Ω – скорость грани в направлении нормали; Θ – нормальная составляющая вектора скорости; l_g – площадь поверхности соответствующей грани; $\Delta \tau^n$ – шаг по времени, где $n=1$ для нестационарной задачи, $n=0$ – для стационарной.

Величины Γ, U, V, W, E определяются из решения для каждой грани g (рис. 3) общей задачи о распаде произвольного разрыва по методу С.К. Годунова [18] с двумя наборами газодинамических параметров в контрольных объемах, сопряженных по этой грани. Величины K, Ξ на гранях контрольного объема определяются в соответствии с направлением нормали скорости.

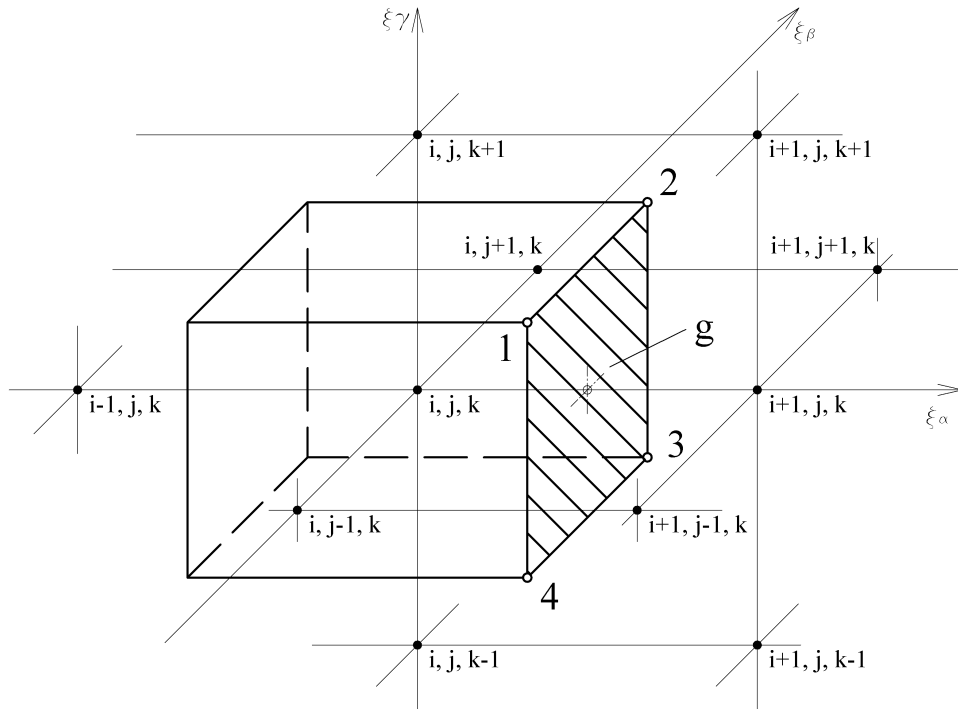


Рис. 3. Схема контрольного объема

Fig. 3. Control volume diagram

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для контрольных объемов (рис. 3) в виде произвольного многогранника рассчитываются нормали для каждой грани. В декартовой системе координат для четырехугольника с вершинами 1, 2, 3, 4 (нумерация против часовой стрелки) определяются:

– вектор нормали:

$$\vec{N} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = 0.5 \begin{bmatrix} \delta y_{21} \delta z_{32} - \delta y_{32} \delta z_{21} + \delta y_{43} \delta z_{14} - \delta y_{14} \delta z_{43} \\ \delta z_{21} \delta x_{32} - \delta z_{32} \delta x_{21} + \delta z_{43} \delta x_{14} - \delta z_{14} \delta x_{43} \\ \delta x_{21} \delta y_{32} - \delta x_{32} \delta y_{21} + \delta x_{43} \delta y_{14} - \delta x_{14} \delta y_{43} \end{bmatrix},$$

где $\delta x_{ij} = x_i - x_j$. По остальным осям запись аналогична;

– тангенциальный вектор: $\bar{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x_{31} \\ \delta y_{31} \\ \delta z_{31} \end{bmatrix};$

– третий орт: $\bar{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} = [\bar{\mathbf{N}} \times \bar{\mathbf{T}}]$, где векторы $\bar{\mathbf{N}}, \bar{\mathbf{T}}$ нормированы.

Проекции вектора скорости $\bar{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}$ на орты определяются как скалярные

произведения $U_N = (\bar{\mathbf{V}}, \bar{\mathbf{N}}); V_T = (\bar{\mathbf{V}}, \bar{\mathbf{T}}); W_S = (\bar{\mathbf{V}}, \bar{\mathbf{S}}).$

Величины скорости на ребре восстанавливаются после решения задачи о распаде произвольного разрыва: $U = v_x U_N + \tau_x V_T + s_x W_S, \quad V = v_y U_N + \tau_y V_T + s_y W_S, \quad W = v_z U_N + \tau_z V_T + s_z W_S.$ Вычисляются потоки $\Gamma, U, V, W, E, P, K, \Xi$ через грани по (9).

Градиенты переменных, входящие в компоненты π_{ij} , тензор Π вычисляются в середине каждой грани через значения переменных в окружающих контрольных объемах, как это описано в работе [19] по координате ξ_α по формуле:

$$\frac{\partial F}{\partial \xi_\alpha} = \sum_{l=1}^3 c_\alpha^l b_l \quad \text{или} \quad \frac{\partial F}{\partial \xi_\alpha} = c_\alpha^1 b_1 + c_\alpha^2 b_2 + c_\alpha^3 b_3 \quad (10)$$

Аналогично (10) определяются градиенты переменных по координатам ξ_β и ξ_γ . В (10) $F = (\rho, u, v, w, p, k, \varepsilon)$ – вектор зависимых переменных. Величины b_l определяют потоки переменных через рассматриваемую грань контрольного объема; c_α^l – расстояние между точками, в которых определяются переменные для расчета потока b_l через соответствующую грань; $\xi_\alpha, \xi_\beta, \xi_\gamma$ – соответствующие координаты по (2).

Для правой грани контрольного объема, обозначенной штриховкой на рисунке 3, перпендикулярной оси x (координата ξ_α), величины c_α^l и b_l определяются соотношениями, приведенными в таблице 1.

Узловые точки, значения зависимых переменных в которых участвуют в расчете градиентов зависимых переменных для правой грани контрольного объема, перпендикулярной оси x , обозначены на рисунке 3.

Таблица 1
Table 1

Соотношения для определения величин b и c
Relationships for determining quantities b and c

	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$
b_l	$F_{i+1,jk} - F_{ijk}$	$F_{ij+1k} - F_{ij-1k} + F_{i+1,j+1k} - F_{i+j-1k}$	$F_{ijk+1} - F_{ijk-1} + F_{i+1,jk+1} - F_{i+1,jk-1}$
c_l	$\xi_{i+1,jk} - \xi_{ijk}$	$\xi_{ij+1k} - \xi_{ij-1k} + \xi_{i+1,j+1k} - \xi_{i+1,j-1k}$	$\xi_{ijk+1} - \xi_{ijk-1} + \xi_{i+1,jk+1} - \xi_{i+1,jk-1}$
c_α^l	$\frac{\mathbf{c}_\beta \times \mathbf{c}_\gamma}{\mathbf{c}_1 \cdot (\mathbf{c}_2 \times \mathbf{c}_3)}$	$\frac{\mathbf{c}_\beta \times \mathbf{c}_\gamma}{\mathbf{c}_2 \cdot (\mathbf{c}_3 \times \mathbf{c}_1)}$	$\frac{\mathbf{c}_\beta \times \mathbf{c}_\gamma}{\mathbf{c}_3 \cdot (\mathbf{c}_1 \times \mathbf{c}_2)}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Переход к следующему шагу по времени осуществляется по двухшаговой схеме со вторым порядком точности:

$$\begin{aligned}
 & \text{– блок 1 } \sigma_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} G_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = \sigma_{i,j,k}^n G_{i,j,k}^n - \left(\sum_g \Pi_g^n - s_{i,j,k}^n G_{i,j,k}^n \right) \frac{\Delta \tau^n}{2}, \\
 & \sigma_{i,j,k}^{n+1} G_{i,j,k}^{n+1} = \sigma_{i,j,k}^n G_{i,j,k}^n - \left(\sum_g \Pi_g^{n+\frac{1}{2}} - s_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} G_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} \right) \Delta \tau^n; \\
 & \text{– блок 2 } \sigma_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = m_{i,j,k}^n - \frac{1}{G_{i,j,k}^n} \left(\sum_g \Pi_g^n - s_{i,j,k}^n G_{i,j,k}^n \right) \frac{\Delta \tau^n}{2}, \\
 & \sigma_{i,j,k}^{n+1} = \sigma_{i,j,k}^n - \frac{1}{G_{i,j,k}^n} \left(\sum_g \Pi_g^{n+\frac{1}{2}} - s_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} G_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} \right) \Delta \tau^n,
 \end{aligned}$$

где i, j, k – номер контрольного объема; $G_{i,j,k}^n$ – величина контрольного объема на временном шаге n ; суммирование потоков проводится по всем граням g контрольного объема.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

С помощью разработанной модели получены численные результаты расчета течения с горением и теплообменом в топочной камере и конвективном пучке водогрейного котельного агрегата КВ-ГМ-1,25-115 конструкции «Теплогаз», производства ООО «Энергетическая компания «ЭНКО», расчетная область которого показана на рисунке 1. Температурное поле в топочной камере и конвективном пучке приведены в виде линий тока с цветовой индикацией по температуре (рис. 4).

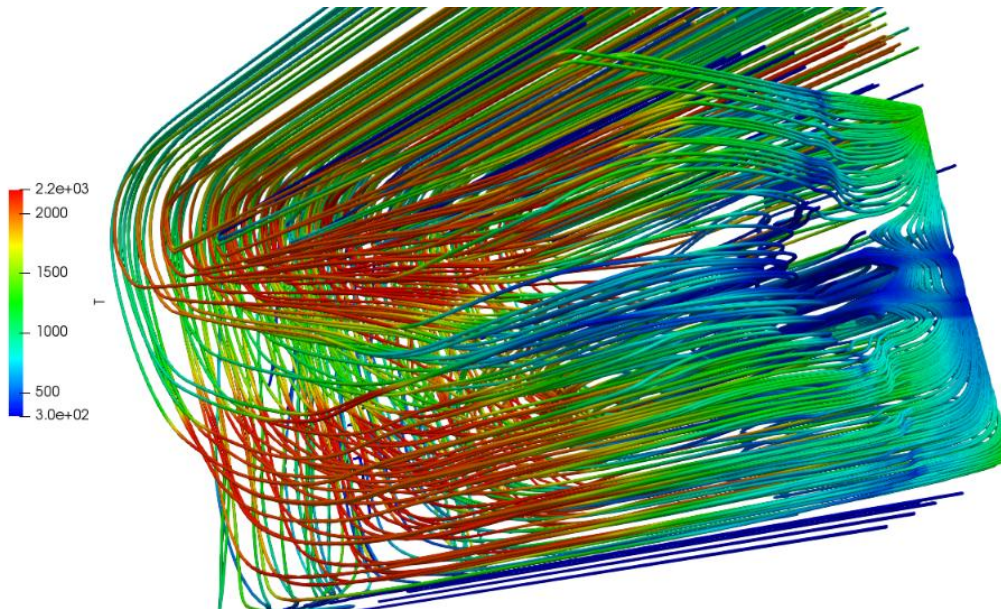


Рис. 4. Картина течения и температура в топке и конвективной части котла (температура указана по шкале Кельвина)

Fig. 4. Flow pattern and temperature in the firebox and convective section of the boiler (temperature is indicated in Kelvin)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 5 показано поле скорости в топочной камере и конвективном пучке в горизонтальной плоскости котла. Из рисунка видно, что в топочной камере образуется зона обратных токов продуктов сгорания к горелке котла, а задняя стенка топочной камеры находится в области натекания струи продуктов сгорания.

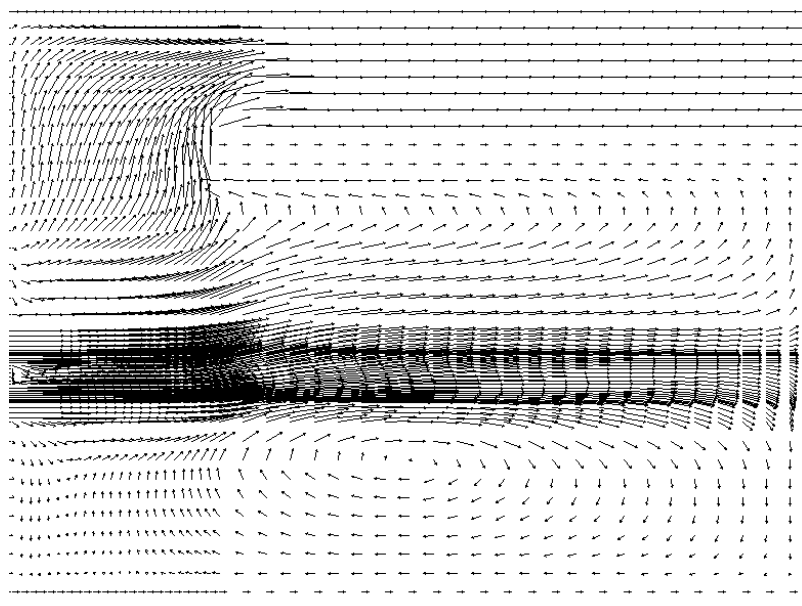


Рис. 5. Поле скорости в плоскости $(\xi_\alpha, \xi_\beta), \xi_\gamma = 0$ Fig. 5. Velocity field in the plane $(\xi_\alpha, \xi_\beta), \xi_\gamma = 0$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Температурное поле на стенках топочной камеры неравномерное, на задней стенке неравномерность еще более выражена из-за натекания на нее струи продуктов сгорания (рис. 6).

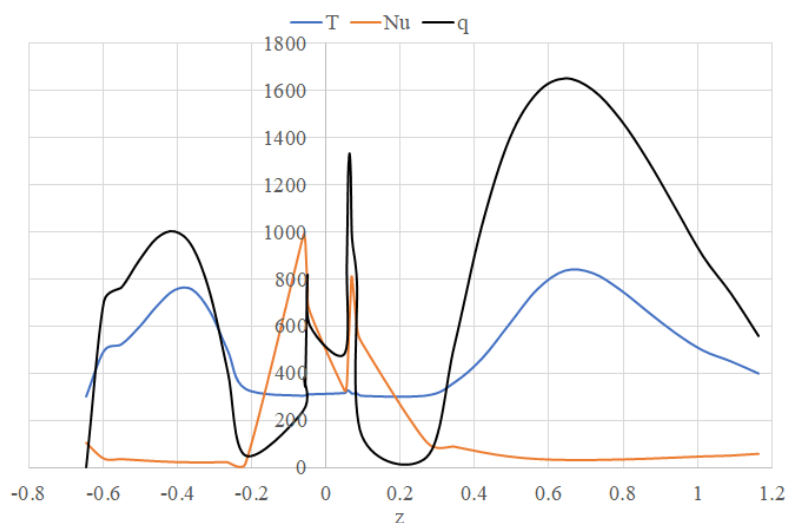


Рис. 6. Распределение температуры (T, K), числа Нуссельта (Nu), теплового потока ($q, Bm/m^2$) на задней стенке топочной камеры Fig. 6. Distribution of temperature (T, K), Nusselt number (Nu), heat flux ($q, Bm/m^2$) on the rear wall of the firebox

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В конвективном пучке продукты сгорания проходят через ряды труб с коридорным расположением. Для расчета течения строится криволинейная разностная сетка в плоскости (ξ_α, ξ_β) (рис. 7). В плоскости (ξ_α, ξ_γ) – сетка прямоугольная.

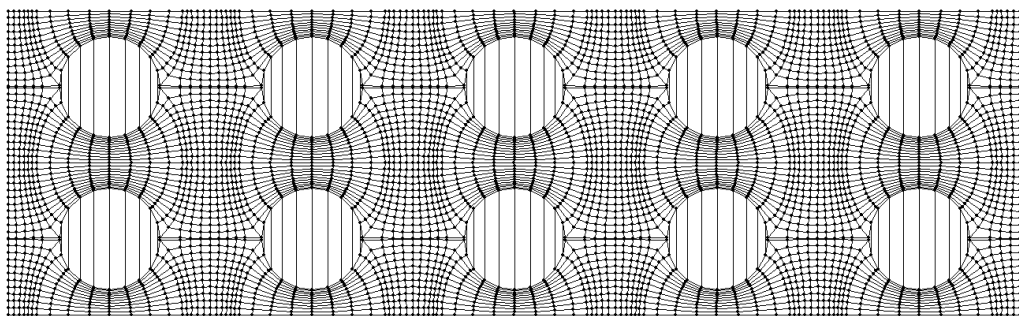


Рис. 7. Разностная сетка в плоскости (ξ_α, ξ_β) Fig. 7. Numerical grid in the plane (ξ_α, ξ_β)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В конвективной части котла, имеющей форму параллелепипеда, формируется практически плоское вихревое течение. Поле скорости показано на рисунке 8.

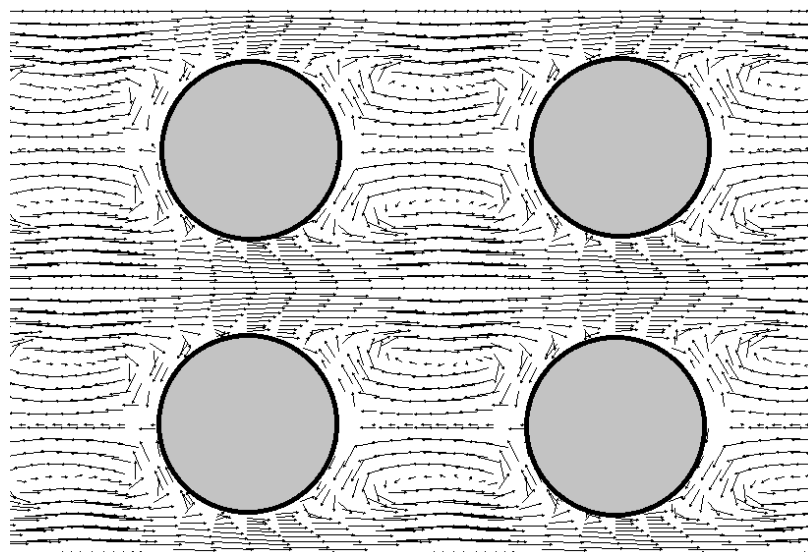


Рис. 8. Фрагмент поля скорости в конвективной части котла в плоскости (ξ_α, ξ_β) Fig. 8. Fragment of the velocity field in the convective section of the boiler in the plane (ξ_α, ξ_β)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение (Conclusions)

Для численной реализации математической модели процессов в водогрейном котле применен метод С.К. Годунова в сочетании со схемой MUSCL, обеспечивающей второй порядок аппроксимации разностных уравнений. Процесс горения природного газа в воздухе описывается в рамках простой химически реагирующей системы. Предложено для учета процесса горения добавить в уравнение переноса энергии источник, эквивалентный диффузионному горению при допущениях ПХРС. Численное моделирование показало существенную неоднородность параметров газодинамики и теплообмена в топочной камере. По тракту конвектора наблюдается вихревое течение. Предлагаемый подход к решению задачи разработки модели, пригодной для численного анализа топочных процессов, позволяет получить универсальный инструмент для расчетов и проектирования теплогенерирующих установок, который может быть применен для определения параметров тепловых и газодинамических процессов в котельных агрегатах. Это позволит усовершенствовать существующие конструкции или разработать новые с улучшенными технико-экономическими характеристиками, а также выявить и разрешить локальные проблемы, которые мешают работе котла и не решаются с помощью инженерных методов расчета.

Литература

1. Lukas Hubka. Temperature Dynamic Model of Once-through Boiler Based on Flue Gases Heat Transports // Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 -

September 2, 2011. pp. 8265-8270.

2. Sajjad Mahmoudinezhad, Meisam Sadi, Hamed Ghiasirad, et al. A comprehensive review on the current technologies and recent developments in high-temperature heat exchangers // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 183. Доступно по: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113467>. Ссылка активна на 03 октября 2025.

3. Katarina Simić, Ilya T'Jollyn, Willem Faes, et al. Dynamic modelling of gas-fired condensing boiler units for the use in residential buildings. Proceedings of the 15th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. HEFAT 2021. pp. 688-693.

4. R.S.Jha, Mandar M. Lele. Dynamic modeling of a water tube boiler // Heat Transfer. 2022. Vol. 51, №7. pp. 6087-6121. Доступно по: <https://doi.org/10.1002/htj.22581>. Ссылка активна на 03 октября 2025.

5. Wei Zhang, Suilin Wang, Lianbo Mu, et. al. Investigation of the forced-convection heat-transfer in the boiler flue-gas heat recovery units employing the real-time measured database // Energy. 2022. Vol. 238, Part A. Доступно по: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121715> Ссылка активна на 03 октября 2025.

6. Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К. Численное моделирование топочного процесса низкоэмиссионного вихревого котла // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 6. С. 59-66.

7. Сабитов М.А., Ведерникова Ю.А. Спасилов В.М. Анализ тепловых процессов в котлоагрегате путем имитационного моделирования // Современные наукоемкие технологии. 2018. №10. С. 109-112.

8. Тайлашева Т.С. Моделирование топочной среды в котле типа ДКВР при сжигании природного газа // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. №4. С. 42-47.

9. Бойко Е.А., Пачковский С.В., Вольнев В.Н. и др. Имитационный динамический тренажер для отработки процессов в топочных устройствах паровых котлов // Теплоэнергетика. 2022. №4. С. 81-92.

10. Деев Равад. Численное исследование характеристик теплообмена и гидравлического сопротивления шахматных пучков сдвоенных труб круглой и каплевидной формы // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. №10. С. 434-444.

11. Крутова И.А., Золотоносов Я.Д. Решение сопряженной задачи теплообмена для конических теплообменных аппаратов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024;26(6):214-226. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-6-214-226>

12. Бадретдинова Г.Р., Калимуллин И.Р., Зинуров В.Э. и др. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023;25(2):176-186. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186>

13. Блинов В.Л., Зубков И.С., Бродов Ю.М. и др. Моделирование течения в тракте комплексного воздухоочистительного устройства ГТУ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021;23(4):66-83. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-4-66-83>

14. Вафин Д.Б., Ваньков Ю.В. Тепловой расчет камеры радиации печи пиролиза углеводородов с несимметричным расположением настенных горелок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023; 25(5): 126-140. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-126-140>

15. Вафин Д.Б., Ваньков Ю.В. Моделирование теплового состояния камер радиации печей пиролиза углеводородов с большим количеством ярусов горелок // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 2. С. 30-35. <https://doi.org/10.17513/snt.40300>

16. D. B. Spalding Combustion and Mass transfer. Pergamon Press. 1979. 200 p.

17. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

18. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

19. Wesseling P., Segal A., Kassel C.G.M. Computing flows on general three-dimensional nonsmooth staggered grids // Journal of Computational Physics. 1999. Vol.149. pp. 333-362.

Авторы публикации

Варфоломеева Ольга Ивановна – канд. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе

Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8094-5140>. varfolomeevaoi@mail.ru

Тенев Валентин Алексеевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры «Высшая математика» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-7685-609X>. tenenev@istu.ru

Хворенков Дмитрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-9838-7404>. d.a.khvorenkov@istu.ru

References

1. Lukas Hubka. Temperature Dynamic Model of Once-through Boiler Based on Flue Gases Heat Transports. *Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011*. pp. 8265-8270.
2. Sajjad Mahmoudinezhad, Meisam Sadi, Hamed Ghiasirad, et al. A comprehensive review on the current technologies and recent developments in high-temperature heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 183. doi: 10.1016/j.rser.2023.113467
3. Katarina Simić, Ilya T'Jollyn, Willem Faes, et al. Dynamic modelling of gas-fired condensing boiler units for the use in residential buildings. *Proceedings of the 15th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. HEFAT 2021*. pp. 688-693.
4. R.S.Jha, Mandar M. Lele. Dynamic modeling of a water tube boiler. *Heat Transfer*. 2022;51(7):6087-34. doi: 10.1002/htj.22581
5. Wei Zhang, Suilin Wang, Lianbo Mu, et. al. Investigation of the forced-convection heat-transfer in the boiler flue-gas heat recovery units employing the real-time measured database. *Energy*. 2022;238(A) doi: 10.1016/j.energy.2021.121715
6. Mar'yandyshev P.A., Chernov A.A., Lyubov V.K. Chislennoye modelirovaniye topochnogo protsessa nizkoemissionnogo vikhrevogo kotla. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2015; 6:59-66. (In Russ).
7. Sabitov M.A., Vedernikova YU.A. Spasibov V.M. Analiz teplovykh processov v kotloagregate putem imitacionnogo modelirovaniya. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2018;10:109-112. (In Russ).
8. Tajlasheva T.S. Modelirovanie topochnoy sredy v kotle tipa DKVR pri szhiganii prirodnogo gaz. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2009;314(4): 42-47. (In Russ).
9. Bojko E.A., Pachkovskij S.V., Vol'nev V.N., et al. Imitacionnyj dinamicheskij trenazher dlya otrabotki processov v topochnykh ustroystvakh parovykh kotlov. *Teploenergetika*. 2022; 4:81-92. (In Russ).
10. Deeb Ravad. Chislennoe issledovanie harakteristik teploobmena i gidravlicheskogo soprotivleniya shahmatnykh puchkov sdvoennykh trub krugloy i kaplevidnoy formy. *Teplovye processy v tekhnike*. 2020; 12(10):434-444. (In Russ).
11. Krutova I.A., Zolotonosov Ya.D. Solution of the conjugate heat exchange problem for conical heat exchangers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024;26(6):214-226. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-214-226
12. Badretdinova G.R., Kalimullin I.R., Zinurov V.E., et al. Evaluation of turbulence models in the external flow around the heated pipe. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(2):176-186. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186
13. Blinov V.L., Zubkov I.S., Brodov Yu.M., et al. Flow simulation in air intake system of gas turbine. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(4):66-83. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-66-83
14. Vafin D.B., Vankov Y.V. Thermal calculation of the radiation chamber of a hydrocarbon pyrolysis furnace with a non-symmetric arrangement wall-mounted burners. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(5):126-140. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-126-140.
15. Vafin D.B., Van'kov YU.V. Modelirovanie teplovogo sostoyaniya kamer radiacii pechej piroliza uglevodorodov s bol'shim kolichestvom yarusov gorelok. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2025;2:30-35. (In Russ). doi: 10.17513/snt.40300

16. Spalding DB. *Combustion and Mass transfer*. Pergamon Press; 1979. 200 p.
17. Patankar S. *Chislennye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti*. Moscow: Energoatomizdat, 1984; 152 p.
18. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.YA. et al. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki*. Moscow: Nauka, 1976; 400 p.
19. Wesseling P., Segal A., Kassel C.G.M. Computing flows on general three-dimensional nonsmooth staggered grids. *Jornal of Computational Phisics*. 1999;149:333-29.

Authors of the publication

Olga I. Varfolomeeva – Kalashnikov State Izhevsk Technical University, Izhevsk, Russia.
ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8094-5140>. varfolomeevaioi@mail.ru

Valentin A. Tenenev – Kalashnikov State Izhevsk Technical University, Izhevsk, Russia.
ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-7685-609X>. tenenev@istu.ru

Dmitry A. Khvorenkov – Kalashnikov State Izhevsk Technical University, Izhevsk, Russia.
ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-9838-7404>. d.a.khvorenkov@istu.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **23.10.2025 г.**

Отредактировано **14.11.2025 г.**

Принято **24.11.2025 г.**

Сдано в набор 15.12.2025 г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 500 экз.

Подписано к печати 22.12.2025 г.
Усл. печ. л. 18,3
Заказ № 5325
Дата выхода в свет 31.12.2025 г.

Формат 60*90/8
Уч.изд. л. 11,62.
Цена свободная

