

ISSN 1999-494X (Print)
ISSN 2313-6057 (Online)

**Журнал Сибирского
федерального университета
Техника и технологии**

**Journal of Siberian
Federal University
Engineering & Technologies**

2026 19 (4)

ISSN 1999-494X (Print)
ISSN 2313-6057 (Online)

2026 19(4)

Журнал включен в «Russian Science Citation Index» на платформе «Web of Science»

Индексируется Российским индексом научного цитирования (НЭБ), представлен в международных и российских информационных базах: Ulrich's periodicals directory, EBSCO (CША), Google Scholar, ProQuest, Erihplus, READera, КиберЛенинке.

Включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» Высшей аттестационной комиссии.

Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

**Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии.
Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.**

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Главный редактор: *В.А. Кулагин*. Редакторы *А.В. Прохоренко*, *А.В. Воробьев*.
Корректор *Т.Е. Бастрыгина*. Компьютерная верстка *Е.В. Гревцовой*

№ 4 от 25.06.2026. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издателя:

660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82, стр. 24, ауд. 117.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ

660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

*Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-28722 от 29.06.2007 г.,
выданное Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.*

<http://journal.sfu-kras.ru>

Подписано в печать 15.06.2026. Формат 60х90/8. Усл. печ. л. 11,4.

Уч.-изд. л. 10,9. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 25980.

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

CHIEF EDITOR

Vladimir Kulagin, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Head of the Department of Heat Technology and Fluid Dynamics of Polytechnic Institute of SibFU, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, member of the expert council of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on energy, electrification and power mechanical engineering, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-5433-7579

EDITORIAL BOARD

- Sergey Alekseenko, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia;
- Sereeter Batmönkh, Academician of the Mongolian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Institute of Heat Engineering and Industrial Ecology Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia;
- Yuri Galerkin, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia;
- Eugene Garin, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Alexander Zavorin, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honored Worker of the Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0001-5724-0150;
- Vladimir Zuev, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of RAS, Siberian Branch, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0002-1271-1200;
- Sergey Ivanov, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Transbaikal State University, Chita, Russia;
- Yuriy Koziratzky, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Military Education and Research Centre of Military-Air Forces «Military-Air Academy name after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russia;
- Genius Kuznetsov, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. Phys.-Math., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;
- Tatiana Kulagina, Honorary Worker of Education of the Russian Federation, Expert of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0003-2601-9570;
- Feng-Chen Li, Prof. Dr. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, China; ORCID 0000-0003-2580-928X;
- Dmitriy Markovich, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia; ORCID 0000-0002-1348-1806;
- Andrey Minakov, Dr. Phys.-Math., Prof., Siberian Federal University, Institute of Thermophysics of RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0003-1956-5506;
- Valery Mironov, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7877-9817;
- Vladimir Moskvichev, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7072-2250;
- Bernard Nacke, Dr. of Tech., Prof., Institute of Electrotechnology Leibniz University, Hannover, Germany;
- Valeriy Nikulin, Honored Scientist of the Udmurt Republic, Honored Engineer of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Kamsk Institute of Humanitarian and Engineering Technologies, Izhevsk, Russia;
- Oleg Ostrovski, Dr. of Tech., Prof., University of New South Wales, Australia;
- Harald Oye, Dr. of Tech., Prof., Norwegian University of Science and Technology, Oslo, Norway;
- Vasili Pantelev, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Scopus ID: 57205124847;
- Petr Polyakov, Honored Metallurgist of the RSFSR, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Miloš Stanković, Prof. Dr., Institute of Applied Sciences, Beograd, Srbija; ORCID 0000-0001-9767-5634;
- Valery Stennikov, Academician of RAS, Dr. of Tech., Prof., Melentiev Energy Systems Institute RAS, Siberian Branch, Irkutsk, Russia, ORCID 0000-0001-6219-0354;
- Viktor Tsibulsky, Dr. Tech., Ch. Scientific Co-worker, National Research Center «Kurchatov Institute», Institute of Economic Forecasting RAS, Moscow, Russia, ORCID 0000-0002-7739-9393;
- Ibragim Khisameev, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Dr. of Tech., Prof., Kazan State Technological University, Kazan, Russia;
- Nikolai Zuglenok, Corresponding member RAS, Dr. of Tech., Prof., Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Shaidurov, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Computational Modelling Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-7883-5804
- Anatoly Shvidenko, Doctor of Agricultural Science, Prof., International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

CONTENTS

Researching. Design. Operating Experience

Ivan S. Sadkin and Evgeny P. Kopyev

Assessment of the Economic Efficiency of Using Liquid Fuel Combustion Technology
in the Presence of Superheated Steam 426

Evgenii V. Ignatev, Galina V. Deriugina and Ustin F. Golubkov

Basic Approaches to Forecasting Wind Power Plant Output and Their Effectiveness 437

**Evgenii V. Ignatev, Galina V. Deriugina,
Vladimir R. Kulik and Dmitry A. Kornev**

Study of the Influence of Aerodynamic Wake Effects on Power Generation
and Economic Performance of Wind Farms 450

Dmitriy N. Karamov, Ekaterina V. Serdyukova and Konstantin V. Suslov

Method for Estimating the Service Life of Storage Batteries in Integrated Energy Systems
with Renewable Generation 467

Mikhail E. Blinnikov and Vasily I. Panteleev

Power Control of a Synchronous Machine with a Flywheel Energy Storage..... 476

**Antonina A. Filimonova, Lilia V. Sirotkina,
Andrey A. Chichirov and Artur M. Khairutdinov**

Analysis of Electrolyzer Designs for Hydrogen Production in Industrial
and Laboratory Environments..... 489

Math Modeling. Numerical Experiment

**Aleksey V. Ivshin, Aleksandr A. Kalyutik,
Victor S. Modestov and Filipp V. Shadelko**

Safety Analysis of Using the Container for Radioactive Graphite of RBMK-1000 Reactors 504

Victor K. Lyubov,

Ilia I. Tsypnyatov and Viacheslav A. Yudin

Study of Thermal Characteristics and Elemental Composition of Pulp Production By-Products
and Municipal Solid Waste for the Purpose of Their Energy Use 515

Information and Communication Technologies

Kirill A. Batenkov

Methodology for Assessing Quality of ATM Networks 532

Muhanned AL-Rawi

Applications of Massive MIMO Technology in US Patents 546

**Evgeny A. Parshin, Alexander S. Zakharov,
Alexander V. Timoshenko, Sergey S. Kulikov and Nikolay N. Fedorov**

A Risk-Based Model of a Data Transmission System
in Credit and Financial Institutions Using Quantum Communications 553

СОДЕРЖАНИЕ

Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

И. С. Садкин, Е. П. Копьев

Оценка экономической эффективности использования
технологии сжигания жидкого топлива в присутствии перегретого водяного пара..... 426

Е. В. Игнатьев, Г. В. Дерюгина, У. Ф. Голубков

Основные подходы прогнозирования выработки ветровых электростанций
и их результативность 437

**Е. В. Игнатьев, Г. В. Дерюгина,
В. Р. Кулик, Д. А. Корнев**

Исследование влияния аэродинамического затенения на выработку электроэнергии
и показатели экономической эффективности ВЭС 450

Д. Н. Карамов, Е. В. Сердюкова, К. В. Сулов

Методика оценки срока службы аккумуляторных батарей
в интегрированных энергетических системах с возобновляемой генерацией 467

М. Е. Блинные, В. И. Пантелеев

Управление мощностью синхронной машины с маховичным накопителем энергии 476

**А. А. Филимонова, Л. В. Сироткина,
А. А. Чичиров, А. М. Хайрутдинов**

Анализ конструкций электролизеров для производства водорода в промышленных
и лабораторных условиях..... 489

Математическое моделирование. Численный эксперимент

**А. В. Ившин, А. А. Калютин,
В. С. Модестов, Ф. В. Шаделко**

Анализ обеспечения безопасности использования контейнера
для радиоактивного графита реакторов РБМК-1000 504

В. К. Любов, И. И. Цыпнятов, В. А. Юдин

Исследование теплотехнических характеристик и элементного состава побочных продуктов
целлюлозных производств и твердых коммунальных отходов
с целью их энергетического использования..... 515

Информационно-коммуникационные технологии

К. А. Батенков

Методика оценки качества функционирования сетей АТМ 532

Муханнед Аль-Рави

Применение технологии Massive MIMO в патентах США 546

**Е. А. Паршин, А. С. Захаров, А. В. Тимошенко,
С. С. Куликов, Н. Н. Федоров**

Риск-ориентированная модель системы передачи данных в кредитно-финансовых организациях
с использованием квантовых коммуникаций 553

**Researching. Design.
Operating Experience**

**Исследования.
Проектирование.
Опыт эксплуатации**

EDN: DVVFIY

УДК 662.941.2.003.13

Assessment of the Economic Efficiency of Using Liquid Fuel Combustion Technology in the Presence of Superheated Steam

Ivan S. Sadkin* and Evgeny P. Kopyev

*Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

Received 19.09.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 11.04.2026

Abstract. Water and steam addition technologies are one of the promising methods for solving the problems of reducing harmful emissions and increasing the efficiency of fuel use. The paper estimates the cost of reducing emissions and the cost of steam preparation for various technological schemes of its generation using the example of a burner device implementing atomization and combustion of fuel in a superheated steam jet, developed at the IT SB RAS. The use of this approach allows achieving a reduction in nitrogen oxide emissions by up to 70 % and carbon monoxide emissions by up to 30 % relative to DIN EN 267 standards. Despite the costs of steam generation, this makes the use of this technology economically feasible when burning low-quality fuels (waste oil, crude oil) or fuels with unstable quality and composition, ensuring a reduction in the cost of thermal energy by 2–3 times compared to the combustion of diesel fuel in traditional burners while maintaining low emission levels.

Keywords: burner device, liquid fuel, water vapor, low-emission combustion, cost of emission reduction.

Acknowledgements. The cost of steam generation was estimated as part of the state assignment of the IT SB RAS (126021217042–8). The analysis of technological schemes for generating and using superheated water in burner devices to reduce harmful emissions was carried out as part of the RSF grant No. 23–79–10029.

Citation: Sadkin I. S., Kopyev E. P. Assessment of the Economic Efficiency of Using Liquid Fuel Combustion Technology in the Presence of Superheated Steam. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 426–436. EDN: DVVFIY



Оценка экономической эффективности использования технологии сжигания жидкого топлива в присутствии перегретого водяного пара

И. С. Садкин, Е. П. Копьев

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
Новосибирск, Российская Федерация*

Аннотация. Технологии добавления воды и водяного пара являются одним из перспективных методов решения задач снижения вредных выбросов и повышения эффективности использования топлива. В работе проведена оценка стоимости снижения выбросов и затрат на приготовление пара для различных технологических схем его генерации на примере горелочного устройства, реализующего распыл и сжигание топлива в струе перегретого водяного пара, разработанного в ИТ СО РАН. Применение данного подхода позволяет достичь снижения выбросов оксидов азота до 70 % и монооксида углерода до 30 % относительно нормативов DIN EN 267. Несмотря на затраты на генерацию пара, это делает использование данной технологии экономически целесообразным при сжигании низкокачественных топлив (отработанное масло, сырая нефть) или топлив с нестабильным качеством и составом, обеспечивая снижение себестоимости тепловой энергии в 2–3 раза по сравнению с сжиганием дизельного топлива в традиционных горелках при сохранении низких уровней выбросов.

Ключевые слова: горелочное устройство, жидкое топливо, водяной пар, низкоэмиссионное сжигание, стоимость снижения выбросов.

Благодарности. Оценка затрат на генерацию пара проведена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (126021217042–8). Анализ технологических схем генерации и применения перегретого водяного пара в горелочных устройствах для снижения производства вредных выбросов выполнен в рамках гранта РНФ № 23–79–10029.

Цитирование: Садкин И. С. Оценка экономической эффективности использования технологии сжигания жидкого топлива в присутствии перегретого водяного пара / И. С. Садкин, Е. П. Копьев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 426–436. EDN: DVVFIY

Введение

Современные энергетические системы сталкиваются с двумя ключевыми вызовами: необходимостью снижения вредных выбросов и повышением экономической эффективности использования топлива. Одним из перспективных методов решения этих задач является технология добавления воды и водяного пара. Так, водяной пар используется в энергетике для решения множества задач: снижение тепловой нагрузки, увеличение мощностной эффективности [1], диспергирование тяжелых топлив [2], сжигание водо-топливных эмульсий [3] и снижение токсичных выбросов [4]. Добавление водяного пара в зону горения влияет на протекание химических реакций (химический эффект), повышает теплоемкость горючей смеси за счет разбавления (физический эффект), снижая температуру пламени [5]. Понижение температуры в зоне горения препятствует образованию термических оксидов азота NOx [6–12]. Водяной пар считается наиболее эффективным из доступных разбавителей (углекислый газ, азот, выхлопные газы и т.п.) [13] за счет наибольшей массовой теплоемкости [14]. Считается, что помимо разбавления он позволяет увеличить скорость окисления сажи, снижает ее объемную долю в продуктах сгорания

[15, 16]. Присутствие H_2O в топливно-воздушной смеси генерирует повышенное содержание реактивных радикалов OH , что интенсифицирует окисление монооксида углерода [17]. Таким образом, добавление пара в качестве разбавителя влияет на химическую кинетику горения углеводородов и способствует более эффективному и экологичному сгоранию топлива [18].

В представленном исследовании рассматривается подход к организации процесса горения, реализованного в разработанном специалистами Института теплофизики СО РАН многотопливном горелочном устройстве [19, 20]. Методика работы устройства основана на использовании перегретого водяного пара для формирования топливно-воздушной смеси в установках малой и средней мощности. Ключевой особенностью предложенного решения является применение паровой струи для диспергирования жидкого топлива, что исключает необходимость использования традиционных форсуночных систем высокого давления. Фундаментальное отличие данного подхода заключается в комплексном воздействии перегретого пара на процесс горения – помимо функции распылителя пар выполняет роль активного участника термохимических превращений. Важным преимуществом данного подхода является его способность работать с широким спектром углеводородных топлив, включая составы с повышенным содержанием механических примесей и водной фазы [2, 21, 22]. Особого внимания заслуживает способность технологии работать с низкокачественными и альтернативными топливами, что особенно важно в контексте развития экономики замкнутого цикла и утилизации отходов нефтехимических производств. При этом достигаемый экологический эффект – снижение выбросов NO_x до 70 % и CO до 30 % – делает данную технологию перспективной для внедрения в регионах с жесткими экологическими требованиями. Эффективность технологии дополнительно повышается за счет гибкой системы управления процессом, позволяющей варьировать такие ключевые параметры, как интенсивность парового потока, его температурный режим, а также баланс между первичным и вторичным воздушными потоками. Такая многопараметрическая система регулирования обеспечивает возможность точной оптимизации процесса горения для различных типов топлив и режимов эксплуатации.

Полученные ранее данные [19, 20] демонстрируют перспективность использования данного подхода, однако дальнейшее внедрение технологии требует оценки экономических показателей, включая стоимость генерации пара, эксплуатационные расходы и потенциальную экономию за счет снижения выбросов. В настоящей работе на примере прототипа горелочного устройства для нужд коммунально-бытового хозяйства, реализующего распыл и сжигание топлива в струе перегретого водяного пара, рассматриваются энергетические и экономические аспекты применения водяного пара. Оценивается величина энергетических затрат на приготовление пара различными техническими решениями, оценивается удорожание переменных затрат от появления дополнительной статьи расходов на очищенную воду, приводится оценка стоимости снижения выбросов. Данные показатели направлены на анализ конкурентоспособности предложенного подхода относительно существующих технологий сжигания топлива.

Методика и оборудование

В рамках настоящей работы выполненные оценки проведены на примере работы котлоагрегата Vitola 200 с установленным горелочным устройством, разработанным в ИТ СО РАН и основанным на методе распыла топлива высокоскоростной струей пара в камеру газогенерации [20], рис. 1.

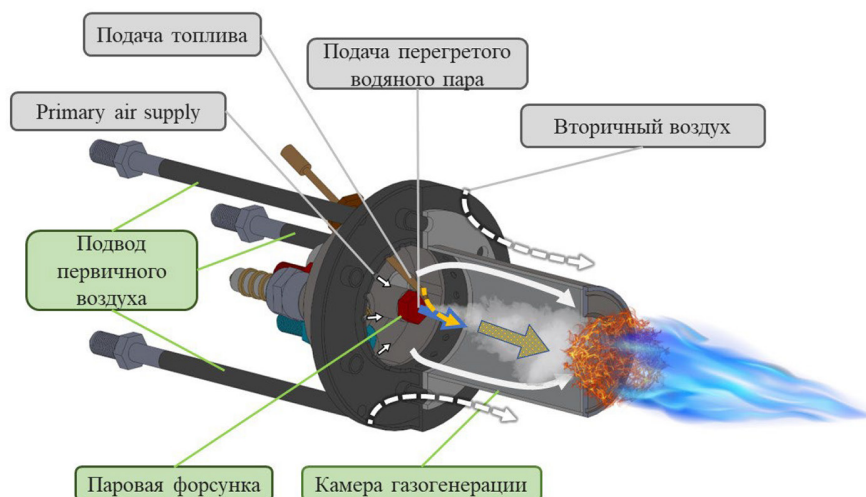


Рис. 1. Схема горелочного устройства

Fig. 1. Scheme of the burner device

Генерация пара в устройстве может производиться как при помощи внешнего оборудования, например электрического парогенератора, так и в самом горелочном устройстве при помощи охлаждающих каналов камеры газогенерации. В работе [20] были продемонстрированы характеристики работы оборудования при расчетном мощностном режиме 37.5 кВт (расходе жидкого топлива 3 кг/ч) и подаче пара с использованием внешнего электрического парогенератора (см. табл. 1).

Оценка эффективности работы энергетического оборудования была выполнена на основе формулы КПД котла, которая зависит не только от полноты сгорания топлива, но и от суммар-

Таблица 1. Тепловые и экологические характеристики работы горелочного устройства ИТ СО РАН на котлоагрегате Vitola 200 при расходе жидкого топлива 3 кг/ч

Table 1. Thermal and environmental characteristics of the IT SB RAS burner device on the Vitola 200 boiler with a liquid fuel consumption of 3 kg/h

Режим	1	2	3	4
Топливо, кг/ч	3			
Расход пара, кг/ч	1000	1400	2000	2500
Абс. давление пара, атм	4	4.4	5	5.5
Температура пара, °C	250 ± 10			
Температура уходящих газов, °C	175	170	143	107
Снижение CO относительно максимально допустимого значения EN 267 для дизельного топлива, %	50	60	80	75
Снижение NOx относительно максимально допустимого значения EN 267 для дизельного топлива, %	45	50	61	70

ных тепловых потерь и совершенства оборудования, что может быть представлено в общем виде:

$$\eta_k = 100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (1)$$

где η_k – КПД котла, $q_2 \dots q_6$ (в %) – потери теплоты с уходящими газами, от химического недожога топлива, от механического недожога топлива, от наружного охлаждения и потери теплоты с шлаком соответственно.

Оценка доли стоимости пара относительно цены топлива ведется по формуле:

$$\delta \Pi_{\text{пар}} = \frac{G_{\text{пар}} \cdot (\Pi_{\text{H}_2\text{O}} + \Pi_{\text{п/о}})}{\Pi_{\text{топл}}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{пар}}$ – расход пара на распыл 1 кг топлива, Π_i – цена очищенной воды, затраты на парогенерацию (стоимость затраченной энергии), цена топлива.

Оценка стоимости снижения выбросов ведется по формуле:

$$\delta \Pi_{\text{пар}} = \frac{G_{\text{пар}} \cdot (\Pi_{\text{H}_2\text{O}} + \Pi_{\text{п/о}})}{G_{\text{топл}}}, \quad (3)$$

где $G_{\text{топл}}$ – расход топлива.

Принимается, что цена очищенной воды формируется из стоимости дистиллированной воды, а затраты на парогенерацию определяются произведением стоимости ресурса (эл/эн либо топлива) на его расход для доведения пара до требуемых параметров. Так, в расчетах сделаны следующие допущения и упрощения на основе текущей рыночной конъюнктуры и физических факторов в целях упрощения ведения расчетов: стоимость 1 л очищенной (дистиллированной) воды для парогенератора – 10 руб, стоимость 1 кВт·ч эл/эн – 8 руб, теплота парообразования и перегрева пара до требуемых параметров – 2,86 МДж/кг, низшая/высшая теплота сгорания топлива – 42,5/44,5 МДж/кг.

Результаты и обсуждение

Из полученных ранее экспериментальных результатов [19, 20] определено, что полнота сгорания топлива близка к 100 %, таким образом, в дальнейших оценках принято, что горелочное устройство ИТ СО РАН позволяет полностью использовать потенциал широкого класса жидких горючих углеводородов. При этом показано, что наибольший эффект от использования пара с целью снижения производства вредных веществ СО и NOx достигается при относительном массовом расходе пара не менее 2/3 к массовому расходу топлива. Считая, что пар производится из воды при стандартных условиях, то на генерацию такого количества пара из воды комнатной температуры расходуется 4–5 % теплоты жидкого топлива. На рис. 1 приведена диаграмма потерь при работе горелочного устройства в котлоагрегате при относительном массовом расходе пара к топливу 0,66 с использованием внешнего источника пара (рис. 2а), а также при его возможной работе при генерации пара в самом горелочном устройстве при помощи охлаждающих каналов камеры газогенерации (рис. 2б).

Из рис. 2 видно, что при генерации пара за счет собственных тепловыделений тепло возвращается назад в топочное пространство вместе с паровой струей. Однако в анализируемой

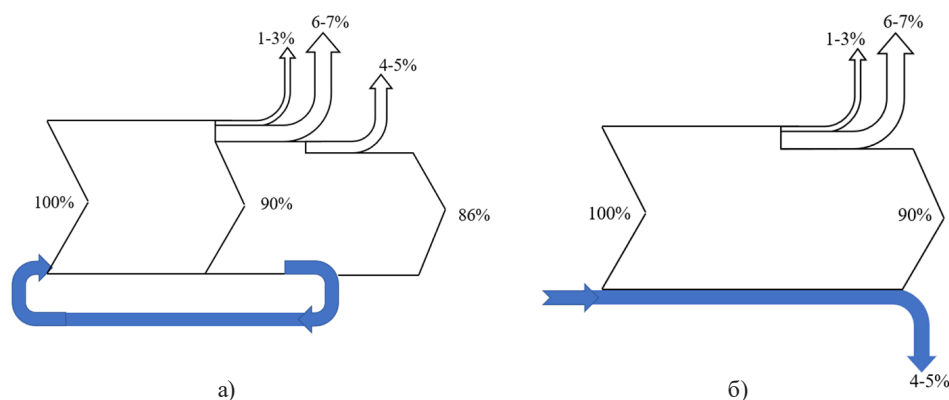


Рис. 2. Диаграммы потерь энергии при паровом распыле топлива на примере работы горелочного устройства ИТ СО РАН в котлоагрегате Vitola 200: а) – пар, генерируемый за счет собственных тепловыделений горелочного устройства, б) – пар, генерируемый во внешнем электрическом парогенераторе

Fig. 2. Energy loss diagrams for steam atomization of fuel using the example of the operation of IT SB RAS burner device in a Vitola 200 boiler unit: а) – steam generated by the burner device's own heat emissions, б) – steam generated in an external electric steam generator

работе [20] котлоагрегат не оборудован дополнительным конденсационным оборудованием, поэтому потери энергии происходят со скрытой теплотой парообразования водяных паров, удаляемых вместе с дымовыми газами, на которые приходится 4–5 % выделяемой при горении топлива теплоты. В этом случае происходит снижение КПД котла относительно нормированного значения на величину дополнительных потерь (см. рис. 1а). Согласно паспорту изделия Viessmann Vitola 200, КПД котла при работе с распылительной форсункой составляет 90 % в расчете по низшей теплоте сгорания: 1–3 % составляют потери от неполноты сгорания топлива и наружного охлаждения, 6–7 % приходится на потери теплоты с уходящими газами.

В случае использования внешнего парогенератора с паровой струей вносится в топку дополнительная теплота. Однако ее полезное использование ограничено теплоемкостью водяных паров, теплота парообразования, на которую приходится большая часть энергопотребления на производство пара, не воспринимается топочным пространством и теряется вместе с теплотой уходящих газов (см. рис. 2б).

Проводя сравнение относительного удорожания топливных издержек, рассчитанных по формуле (2), при распыле топлива паром, генерируемым различными способами (см. рис. 3), можно отметить, что по мере удорожания стоимости топлива затраты на парообразование путем использования электропарогенератора или теплоты самого топлива сравниваются. Становится не принципиальным, какой источник пара использовать для получения пара. Для текущих цен на качественные жидкие топлива затраты на природоохранную технологию в виде добавки пара не превышают 15 %.

В случае использования низкокачественных топлив применение парового распыла ведет к дополнительным издержкам на подготовку пара до 35–45 %. Однако реализация технологии распыла и сжигания топлива в струе перегретого водяного пара обеспечивает возможность сжигания некондиционных жидких топлив, которые не подходят для традиционных горелочных устройств. В этом случае вовлекаются в топливный баланс не востребуемые углеводо-

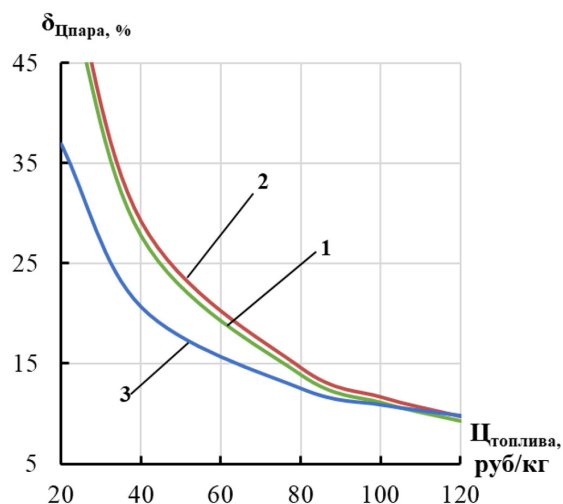


Рис. 3. Доля стоимости подготовки пара на распыл относительно цены топлива при относительном расходе пара 0,66 и стоимости дистиллята 10 руб./л. 1 – КПД электропарогенератора 90 %, 2 – 80 %, 3 – генерация пара за счет собственных тепловыделений горелки

Fig. 3. The share of the cost of steam preparation relative to the fuel price with a relative steam consumption of 0,66 and a distillate cost of 10 rubles/litr. 1 – efficiency of the electric steam generator 90 %, 2 – 80 %, 3 – generation due to burner's heat emissions

роды с низкой стоимостью, в результате чего абсолютная величина топливно-паровых затрат все равно оказывается 1,5–2 раза ниже, чем при стандартном сжигании качественных топлив, таких как дизель.

На рис. 4 представлен график зависимости снижения выбросов CO и NOx относительно максимально допустимой величины по нормативу DIN EN 267 в зависимости от относительного расхода пара, полученных при сжигании дизельного топлива [20]. Характер зависимости снижения выбросов NOx близок к линейному: чем выше расход пара по отношению к топливу, тем значительнее снижаются выбросы. Выбросы CO снижаются до величины относительного расхода пара около 2/3, после чего наблюдается рост выбросов, что обуславливается высоким содержанием влаги в паро-топливо-воздушной смеси.

Далее на примере дизельного топлива представлен прирост затрат от использования пара в зависимости от величины снижения выбросов NOx, рис. 5.

Можно видеть, что при использовании качественного дизельного топлива и принятых затратах на электроэнергию 8 руб./кВт·ч (в частности, в этот диапазон укладывается большинство потребителей Сибирского региона) разница стоимости генерации пара между электрическими вариантами и за счет собственных тепловыделений не превышает 1,5 руб. за каждый литр дизельного топлива. Это обуславливается высокой стоимостью ДТ, при которой различие между способами подготовки пара сокращается, что было показано на рис. 3.

В табл. 2 приведено сопоставление стоимости использования горелочного устройства при сжигании жидкого топлива в струе перегретого пара с широко представленным аналогом горелочного устройства, с механическим распылом топлива, который не требует применения внешнего оборудования, как парогенератор или компрессор.

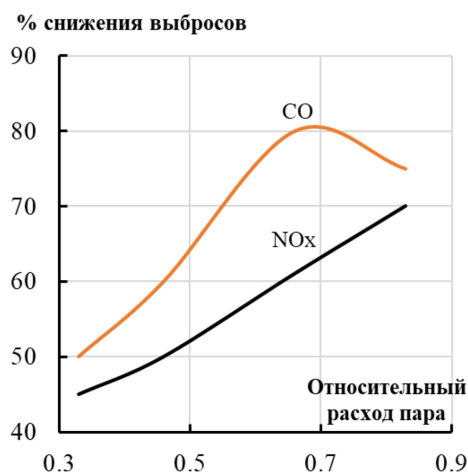


Рис. 4. Доля снижения выбросов CO и NOx относительно максимально допустимых значений DIN EN 267 при сжигании дизельного топлива в зависимости от относительного расхода пара [20]

Fig. 4. Proportion of reduction in CO and NOx emissions relative to the maximum permissible values of DIN EN 267 when burning diesel fuel depending on the relative steam consumption [20]

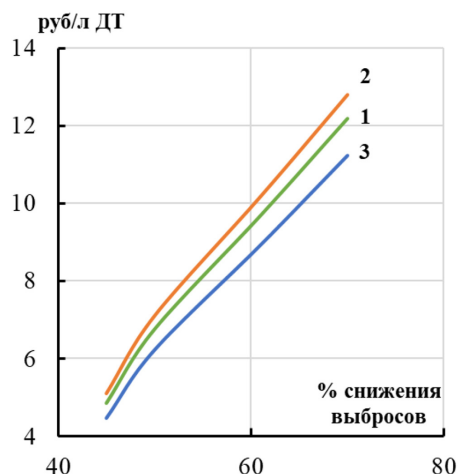


Рис. 5. Прирост затрат на использование пара при относительном расходе пара 0,66 и стоимости дистиллята 10 руб./л. 1 – КПД электропарогенератора 90 %, 2 – 80 %, 3 – генерация пара за счет собственных тепловыделений горелки

Fig. 5. Increase in costs from using steam with a relative steam consumption of 0,66 and a distillate cost of 10 rubles/litr. 1 – efficiency of the electric steam generator 90 %, 2 – 80 %, 3 – steam generation due to the burner's heat emissions

Таблица 2. Экономические параметры работы горелочного устройства ИТ СО РАН на котлоагрегате Vitola 200

Table 2. Economic parameters of the IT SB RAS burner device operation on the Vitola 200 boiler

Горелка	Сажепаровая			Стандартная
Топливо	ДТ	Отработка	Мазут	ДТ
Стоимость топлива	75 руб./л	20 руб./л	25 тыс./т	75 руб./л
Стоимость пара за счет электроПГ, руб./кг топл.	11,3	11,3	11,3	-
Стоимость пара за счет топлива, руб./кг топл.	10,3	7,6	7,8	-
Топливные и паровые затраты на Гкал тепловой энергии, тыс. руб.	10,2	3,5	4	8,7

Можно видеть, несмотря на то, что при использовании качественных энергоносителей, такое как дизельное топливо, использование пара усложняет и удорожает эксплуатацию, с другой стороны, применение пара позволяет в единой конструкции горелочного устройства использовать более дешевые жидкие топлива с сохранением экологических показателей, что ведет к снижению себестоимости получаемой тепловой энергии. В то же время при сопоставлении с экономическими показателями централизованных систем теплоснабжения и газифицированными районами использование жидкотопливных горелочных устройств оказывается дороже. Так, для сравнения (по тарифам Новосибирска и Новосибирской области), стоимость

Гкал тепловой энергии: централизованное теплоснабжение – 2300 руб., электроотопление – 4800 и 8500 для физических и юридических лиц соответственно, газовое отопление ~1000 руб.

Таким образом, актуальным применением данной технологии могут быть удаленные от централизованных сетей малые и средние объекты, где возможно применение различного по качеству и составу жидкого топлива, что снижает зависимость таких объектов от поставок качественного энергоносителя.

Дальнейшим перспективным направлением развития технологии сжигания жидкого топлива при его распыле паровой струей является оптимизация конструкции горелочного устройства: разработка интегрированного парогенератора, исследования коррозионного износа при работе на низкокачественных топливах.

Заключение

Проведена оценка экономических показателей использования разработанного в ИТ СО РАН подхода к сжиганию жидких топлив в струе перегретого водяного пара на примере оригинального горелочного устройства, адаптированного к работе в существующем коммунально-бытовом оборудовании. Выполнена оценка стоимости снижения выбросов и доли затрат на пар в цене топлива для различных технологических схем его генерации. Получено, что анализируемая низкоэмиссионная технология сжигания жидких топлив с использованием перегретого водяного пара, обладающая высокой экологической эффективностью (снижение NO_x до 70 %, CO до 30 %), позволяет использовать низкосортные топлива, что, даже с учётом затрат на пар, приводит к значительному снижению себестоимости энергии. Удорожание топливной составляющей для качественного топлива составляет 10–15 %. Наибольший экономический эффект технология имеет при утилизации дешёвых низкокачественных топлив (отработанное масло, мазут), а также в регионах с жёсткими экологическими нормативами, где стоимость сверхнормативных выбросов высока. Несмотря на затраты, связанные с генерацией пара, технология предлагает значительную экономию за счет топливной гибкости, в том числе с использованием горючих отходов, снижения экологических издержек и увеличения срока службы оборудования. Метод представляет собой пример успешного сочетания экологической и экономической эффективности, а его дальнейшее развитие требует детального анализа затрат и выгод на всех этапах реализации.

Список литературы

- [1] Rocha DD da, de Castro Radicchi F, Lopes GS, Brunocilla MF, Gomes PC de F, Santos NDSA, et al. Study of the water injection control parameters on combustion performance of a spark-ignition engine. *Energy*, 2021, 217, 119346. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.119346>.
- [2] Anufriev I, Kovyev E, Alekseenko S, Sharypov O, Butakov E, Vigriyanov M, et al. Cleaner crude oil combustion during superheated steam atomization. *Thermal Science*, 2021, 25, 331–45. <https://doi.org/10.2298/TSCI200509209A>.
- [3] Chmielewski M, Niszczoła P, Gieras M. Combustion efficiency of fuel-water emulsion in a small gas turbine. *Energy*, 2020, 211, 118961. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118961>.
- [4] Furuhashi T, Kawata T, Mizukoshi N, Arai M. Effect of steam addition pathways on NO reduction characteristics in a can-type spray combustor. *Fuel*, 2010, 89, 3119–26. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.018>.

- [5] Cui G, Dong Z, Wang S, Xing X, Shan T, Li Z. Effect of the water on the flame characteristics of methane hydrate combustion. *Appl Energy*, 2020, 259, 114205. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114205>.
- [6] Boushaki T, Dh   Y, Selle L, Ferret B, Poinot T. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane-air premixed flame: Experimental and numerical analysis. *Int J Hydrogen Energy*, 2012, 37, 9412–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.037>.
- [7] Lee MC, Seo S Bin, Yoon J, Kim M, Yoon Y. Experimental study on the effect of N₂, CO₂, and steam dilution on the combustion performance of H₂ and CO synthetic gas in an industrial gas turbine. *Fuel*, 2012, 102, 431–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.05.028>.
- [8] Farokhipour A, Hamidpour E, Amani E. A numerical study of NO_x reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers. *Fuel*, 2018, 212, 173–86. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.033>.
- [9] Mazas AN, Fiorina B, Lacoste DA, Schuller T. Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames. *Combust Flame*, 2011, 158, 2428–40. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2011.05.014>.
- [10] Xue R, Hu C, Sethi V, Nikolaidis T, Pilidis P. Effect of steam addition on gas turbine combustor design and performance. *Appl Therm Eng*, 2016, 104, 249–57. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.05.019>.
- [11] Terhaar S, Oberleithner K, Paschereit CO. Impact of Steam-Dilution on the Flame Shape and Coherent Structures in Swirl-Stabilized Combustors. 2014, 186, 889–911. <https://doi.org/10.1080/00102202.2014.890597>.
- [12] Le Cong T, Dagaut P. Experimental and Detailed Modeling Study of the Effect of Water Vapor on the Kinetics of Combustion of Hydrogen and Natural Gas, Impact on NO_x. *Energy & Fuels* 2009, 23, 725–34. <https://doi.org/10.1021/ef800832q>.
- [13] Cavaliere A, De Joannon M. Mild combustion. *Prog Energy Combust Sci*, 2004, 30, 329–66. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.003>.
- [14] Li SC, Williams FA. NO_x formation in two-stage methane–air flames. *Combust Flame*, 1999, 118, 399–414. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00002-4).
- [15] Mohapatra S, Garnayak S, Lee BJ, Elbaz AM, Roberts WL, Dash SK, et al. Numerical and chemical kinetic analysis to evaluate the effect of steam dilution and pressure on combustion of n-dodecane in a swirling flow environment. *Fuel*, 2021, 288, 119710. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119710>.
- [16] De Joannon M, Sabia P, Cozzolino G, Sorrentino G, Cavaliere A. Pyrolytic and oxidative structures in hot oxidant diluted oxidant (HODO) MILD combustion. *Combustion Science and Technology*, 2012, 184, 1207–18. <https://doi.org/10.1080/00102202.2012.664012>.
- [17] Donohoe N, Heufer KA, Aul CJ, Petersen EL, Bourque G, Gordon R, et al. Influence of steam dilution on the ignition of hydrogen, syngas and natural gas blends at elevated pressures. *Combust Flame*, 2015, 162, 1126–35. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.10.005>.
- [18] Shu Z, Dai C, Li P, Mi J. Nitric oxide of MILD combustion of a methane jet flame in hot oxidizer coflow: Its formations and emissions under H₂O, CO₂ and N₂ dilutions. *Fuel*, 2018, 234, 567–80. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.057>.
- [19] Anufriev I.S., Kopyev E. P., Alekseenko S. V., Sharypov O. V., Vigriyanov M. S. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam. *Energy*, 2022, 250, 123849. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123849>.

[20] Kopyev E.P., Sadkin I.S., Shadrin E. Yu., Mukhina M.A., Kuznetsov V.A., Minakov A.V. Combustion of liquid hydrocarbon fuels sprayed into gas generation chamber with superheated steam as low emission technology for energy production. *Fuel*, 2025, 381, 133344. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133344>.

[21] Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. Diesel and waste oil combustion in a new steam burner with low NOX emission. *Fuel*, 2021, 290, 120100. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120100>.

[22] Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Sharypov O.V. Burning of Heavy Fuel Oil in a Steam Jet in a New Burner. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2020, 61, 324–30. https://doi.org/10.1134/S_0021894420030025.

Energy Systems and Complexes
Энергетические системы и комплексы

EDN: FGFHBE

УДК 551.509.39; 621.311.24

Basic Approaches to Forecasting Wind Power Plant Output and Their Effectiveness

Evgenii V. Ignatev*,
Galina V. Deriugina and Ustin F. Golubkov
Moscow Power Engineering Institute
Moscow, Russian Federation

Received 15.09.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 11.04.2026

Abstract. The article analyzes the main methodological approaches to forecasting electricity generation by wind farms. Forecasting models are classified based on their time horizon (short-term forecasts and long-term average generation forecasts) and the methodology used for their development (physical, statistical, and hybrid methods). Physical models are based on numerical weather prediction data and characteristics of wind farms, including equipment specifications, site descriptions, and wind turbine placement schemes. These models do not require training on historical data and provide high accuracy in medium- and long-term forecasting. Statistical models use regression methods and machine learning techniques to identify relationships between multiple influencing variables, making them particularly effective for short-term forecasting. However, they require large volumes of high-quality data. Hybrid models combine the strengths of both physical and statistical approaches, incorporating modern techniques such as ensemble learning and neural network algorithms, which enhance forecast accuracy and adaptability. The article provides a review of recent studies on wind power generation forecasting and the key metrics used to assess forecast accuracy. It addresses major challenges related to data processing, the need for standardized model evaluation approaches, and promising future directions for the development of forecasting methods, considering the advancements in computational power and the increasing availability of large datasets.

Keywords: wind energy, forecasting, optimization, hybrid methods, forecasting error.

Citation: Ignatev E. V., Deriugina G. V., Golubkov U. F. Basic Approaches to Forecasting Wind Power Plant Output and Their Effectiveness. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 437–449. EDN: FGFHBE



Основные подходы прогнозирования выработки ветровых электростанций и их результативность

Е. В. Игнатьев, Г. В. Дерюгина, У. Ф. Голубков

Московский энергетический институт

Российская Федерация, Москва

Аннотация. В статье проводится анализ основных методологических подходов к прогнозированию выработки электроэнергии ветровыми электростанциями (ВЭС). Модели прогнозирования классифицируются по временным горизонтам (краткосрочные прогнозы и прогнозы среднесрочной выработки) и методологии их построения (физические, статистические и гибридные методы). Физические модели основываются на численных прогнозах погоды (ЧПП) и характеристиках ВЭС (включающих характеристики оборудования ВЭС; описание площадки ВЭС; схему размещения ВЭУ на площадке ВЭС и т.д.), не требуют обучения на исторических данных и обеспечивают высокую точность при среднесрочном и долгосрочном прогнозировании. Статистические модели используют регрессионные методы и методы машинного обучения для выявления закономерностей между множеством влияющих переменных, что делает их наиболее эффективными для краткосрочных прогнозов, однако они требуют больших объемов качественных данных. Гибридные модели объединяют преимущества физических и статистических методов, включая современные подходы, такие как ансамблевое обучение и нейросетевые алгоритмы, что позволяет повысить точность прогнозов и их адаптивность. В статье представлен обзор современных исследований в области прогнозирования выработки электроэнергии ВЭС и ключевые метрики оценки точности прогнозов. Отмечены основные проблемы, связанные с обработкой данных, необходимостью стандартизации подходов к оценке моделей, а также перспективные направления развития прогнозных методов с учетом современных вычислительных возможностей и увеличения доступных объемов данных.

Ключевые слова: ветровая энергия, прогнозирование, оптимизация, гибридные методы, ошибка прогнозирования.

Цитирование: Игнатьев Е. В. Основные подходы прогнозирования выработки ветровых электростанций и их результативность / Е. В. Игнатьев, Г. В. Дерюгина, У. Ф. Голубков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 437–449. EDN: FGFHBE

Введение

В Global Wind Report 2024 отмечается, что рост ветровой генерации является одним из ключевых трендов мировой энергетики. На начало 2024 г. суммарная установленная мощность ветровых электростанций (ВЭС) в мире достигла 1020 ГВт, что составляет около 7,6 % мирового энергопотребления. По прогнозам, доля солнечной и ветровой генерации вырастет с 13 % в 2022 г. до 35–50 % к 2050 г. [1]. В России также наблюдается активный рост ветроэнергетики: на 01.07.2024 г. в рамках программы ДПМ ВИЭ введены в эксплуатацию 26 ВЭС мощностью 2,455 ГВт, с планами увеличения до 4 ГВт к 2030 г. Мощность, вырабатываемая ветроэлектрическими установками (ВЭУ), зависит от скорости ветра, однако также на неё оказывают влияние другие метеорологические параметры, орография местности и схема размещения ВЭУ на площадке ВЭС. Это обуславливает непредсказуемость выработки ВЭУ/ВЭС и усложняет управление ими,

создает проблемы для устойчивости энергосистемы, а мгновенные небалансы мощности могут приводить к аварийным отключениям энергоустановок и потребителей.

Прогнозирование выработки ВЭС необходимо для:

- оптимизации управления энергосистемой (экономическая диспетчеризация, блокирование, динамическая оценка безопасности, резервирование мощности, межсистемные обмены);
- торговли электроэнергией на оптовом рынке [2, 3].

Прогнозирование выработки ВЭУ/ВЭС в настоящее время признано экономически эффективным решением, способным предоставить адекватную информацию о производстве ВЭУ/ВЭС в период от нескольких часов до нескольких дней и даже до года. Особое внимание уделяется краткосрочному прогнозу выработки ВЭС, как правило, на сутки вперед с часовым разрешением, так как он позволяет операторам планировать резервы мощности, корректировать пропускную способность сети и участвовать в торгах на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) [2, 3]. Например, в России допускаются отклонения фактической выработки ВЭС от прогнозной на $\pm 10\%$ от установленной мощности [4], а в Китае – до $\pm 15\%$.

Задачи краткосрочного прогнозирования скорости ветра и выработки ВЭУ/ВЭС являются многофакторными с большим числом плохо формализуемых метеорологических данных и влияющих переменных [2, 3]. Стандарты для таких моделей пока отсутствуют, как и единые подходы к использованию входных данных. Следует отметить, что для реализации моделей прогнозирования выработки ВЭУ/ВЭС не всегда подходят существующие методы расчета выработки электроэнергии ВЭУ/ВЭС по техническим характеристикам оборудования ВЭС. Кроме того, нет стандартов по использованию метеорологических данных и других переменных при создании моделей прогноза.

Первые модели краткосрочного прогнозирования выработки ВЭС появились в мире в середине 90-х годов прошлого века, и сегодня в мире их разработано много, некоторые из них успешно применяются для функционирующих ВЭС. Разработанные модели различаются по методологии, горизонту прогнозирования, сложности и точности [2, 3, 5–18]. Подобные модели были разработаны и в России [19–23]. При выборе модели прогноза рассматривают различные аспекты, но наиболее важные из них два – точность модели и время вычислений [2].

Основной общий недостаток существующих моделей прогнозирования выработки ВЭУ/ВЭС – это их уникальность, т.е. их применение ограничено особенностями конкретных объектов: использование одной модели для других условий снижает точность результатов [2].

Точность прогнозов в первую очередь зависит от надежности определения исходных метеоданных, что делает исследования в этой области актуальными. Несмотря на множество существующих моделей прогноза выработки ВЭС, поиск решений для повышения точности и универсальности остается приоритетной задачей [2, 3, 13].

Классификация моделей прогноза

Модели прогнозирования выработки ВЭУ/ВЭС классифицируются по временному горизонту прогнозирования и методологии построения прогноза [2, 3, 5, 6]. Выбор подхода зависит от исходных данных и продолжительности периода – горизонта прогнозирования, на который даётся прогноз.

По временному горизонту прогнозы делятся на:

- срочные (несколько часов – несколько дней);
- среднесрочные (на основе исторических данных или среднесрочных метеоданных – исторические данные используются для оценки потенциала площадок для ВЭС, а среднесрочные данные используются для анализа работы ВЭУ/ВЭС, например, при изучении сезонных вариаций выработки ВЭС) [2, 5, 6].

Срочные прогнозы подразделяются на:

- очень краткосрочный («very short term») – от настоящего момента времени с детально-стью от минут до часа, в [2, 3] – менее получаса;
- краткосрочный («short term») – на несколько часов вперед: в [2, 3] – 0,5–6 ч, в [5, 6] – до 8 ч;
- среднесрочный («medium term») – на сутки вперед: в [2, 3] – 6–24 ч, в [5, 6] – 8–24 ч;
- долгосрочный («long term») – на несколько суток вперед: в [2, 3] – до 15 суток, в [5, 6] – до 1 месяца.

Среднесрочные прогнозы, применяемые в России, подаются ВЭС с почасовым шагом в соответствии с правилами оптового рынка электроэнергии.

По методологии построения прогноза модели делятся на [2, 3, 5, 6]:

- физические – основанные на численных методах прогноза погоды (ЧПП);
- статистические – используют архивные данные без учета метеорологических условий, часто с применением методов машинного обучения (нейронные сети);
- гибридные – объединяют физические и статистические подходы.

Каждый метод имеет свои преимущества и ограничения, зависящие от точности исходных данных и целей прогнозирования.

Физический метод

Физический метод не требует обучения на архивных данных о работе ВЭУ/ВЭС. Прогноз выработки основывается на численном прогнозе погоды (ЧПП) и характеристиках ВЭУ/ВЭС. Точность метода определяется составом и надежностью входных данных [2, 3, 24].

Входные данные могут включать:

- динамическую информацию: прогнозы скорости и направления ветра, температуры, влажности, атмосферного давления и других параметров, предоставляемые метеослужбами;
- статическую информацию: характеристики оборудования ВЭС (модель ВЭУ и их количество, мощностная характеристика ВЭУ и т.д.); описание местности (неровности, препятствия, орография и т.д.); схема размещения ВЭУ на площадке ВЭС и т.д. [2, 3, 24].

Прогноз выполняется в два этапа: сначала определяется ЧПП, затем на его основе оценивается выработка ВЭУ/ВЭС. Обычно используются паспортные мощностные характеристики, но исследования [10, 25] показывают, что применение натурных характеристик (полученных с использованием архивов данных SCADA ВЭУ) может значительно повысить точность прогноза.

Основным недостатком физического метода является зависимость от точности ЧПП, которая ограничена временным и пространственным разрешением. Это приводит к средней ошибке прогноза выработки до 10 % и более [2, 3]. Для снижения погрешности требуются:

- улучшение точности прогнозов скорости ветра;
- использование архивных метеоданных и моделей интерполяции для привязки данных к конкретным ВЭУ [13].

Реализация физического метода требует значительных ресурсов для сбора данных, их обработки и вычисления [24]. Также важно учитывать местные условия: орографию, схему размещения ВЭУ и индивидуальные характеристики каждой ВЭУ.

На ранних этапах разработки моделей прогнозирования физический метод использовался в «чистом» виде. Например, Фоккен и др. [26] разработали модель для прогнозирования скорости ветра на высоте оси ветроколеса и выработки ВЭС с горизонтом прогнозирования в 48 часов. Модель учитывает такие факторы, как шероховатость поверхности, рельеф, аэродинамические следы и ежедневные изменения термической стратификации атмосферы.

Физический подход остается важной основой для создания гибридных моделей, которые объединяют его с другими методологиями для повышения точности прогнозирования.

Статистические (регрессионные) методы

Статистические модели прогнозирования выработки ВЭУ/ВЭС основаны на выявлении взаимосвязи между входными данными, включая численные прогнозы погоды (ЧПП), и данными SCADA (мощность ВЭУ, скорость и направление ветра), с использованием методов машинного обучения, таких как искусственные нейронные сети (ИНС) или рекурсивные подходы. Такие модели не требуют технических характеристик ВЭУ/ВЭС и ориентированы на исторические данные метеоусловий и выработки [2, 3, 12]. Их точность зависит от качества и объема исторических данных, но снижается с увеличением горизонта прогнозирования [2, 3, 27].

Часто статистические модели напрямую преобразуют ЧПП и данные SCADA в прогноз мощности, пропуская промежуточные этапы, такие как разработка натурных мощностных характеристик ВЭУ [2, 3].

Наиболее популярными моделями временных рядов являются:

- ARMA (авторегрессия скользящего среднего) для стационарных процессов [28].
- ARIMA (авторегрессия интегрированного скользящего среднего) для нестационарных процессов [29].

Для прогнозирования выработки ВЭУ/ВЭС широко применяются следующие подходы:

- Искусственные нейронные сети (Artificial Neural Networks, ANNs) – наиболее популярный метод, в том числе вейвлетные нейронные сети (Wavelet Neural Networks, WNN) [24, 30, 31]. Их производительность зависит от структуры, алгоритма обучения и качества данных.
- Метод опорных векторов (Support Vector Machines, SVM) – подходит для классификации и регрессии [28].
- Метод пространственной корреляции (Spatial Correlation, SC) – простой метод для анализа пространственных данных [32].

Разработка ИНС включает два этапа: выбор структуры сети (прямая или рекуррентная) и алгоритма обучения (контролируемое, неконтролируемое, с подкреплением).

Методы машинного обучения часто обеспечивают более высокую точность для краткосрочных прогнозов по сравнению с физическими моделями. Однако они требуют значитель-

ных вычислительных ресурсов, что важно учитывать при работе в реальном времени. Например, модель Маркоса и др. [29] выполняет прогноз на 72 часа за 60–70 минут, что подходит для оперативного использования. Время вычислений зависит от алгоритма обучения: например, как показали Чжао и др. [7], ИНС с прямой передачей данных работает быстрее, чем с обратной передачей.

Выбор метода машинного обучения определяется входными данными и необходимостью обеспечения баланса между точностью прогноза и временем вычислений.

Гибридные методы

При решении задач прогноза выработки ВЭУ/ВЭС могут одновременно применяться несколько методов. В этом случае говорят о гибридных методах. В настоящее время гибридные методы являются основными для разработки краткосрочных и среднесрочных моделей прогноза выработки ВЭУ/ВЭС [2, 3].

Обычно с помощью статистических методов дают прогноз скорости ветра в точке ВЭУ на высоте оси ВК, а затем на основе физических методов пересчитывают прогнозные величины в мощность ВЭУ/ВЭС. В целом гибридные методы позволяют достигнуть более высокой точности прогноза, чем методы на основе одного подхода [2, 31].

В статистике и машинном обучении различные прогностические модели часто разрабатываются с использованием нескольких алгоритмов и различных наборов обучающих данных. Этот процесс часто называют ансамблевым моделированием, что является более продвинутым типом гибридного метода [2].

В рамках статистики и машинного обучения гибридные методы часто реализуются через ансамблевое моделирование. Этот подход объединяет несколько алгоритмов и наборов обучающих данных, что делает его более сложной и продвинутой формой гибридного метода [2].

Ансамблевые модели имеют следующие преимущества:

- повышение точности прогнозов за счет использования различных предикторов;
- снижение времени вычислений благодаря объединению выходных данных разных моделей;
- меньшая зависимость от настройки и экспертных знаний.

Эффективность ансамблевого моделирования зависит от распределения ошибок каждой из регрессионных моделей, входящих в ансамбль [2, 6].

Гибридные методы, включая ансамблевое моделирование, предлагают мощные инструменты для прогнозирования выработки ВЭУ/ВЭС, комбинируя сильные стороны статистических и физических подходов. Они особенно полезны для повышения точности и надежности прогнозов в сложных условиях.

Входные данные

Исторические или данные ЧПП в первую очередь влияют на точность прогноза, и им требуется уделять особое внимание при разработке моделей прогноза. Например, для снижения неопределенности ЧПП рекомендуется использовать фильтр Калмана [2]. Также для повышения точности моделей рекомендуется устранять ошибочные данные из исторических данных [2].

Метрики точности прогноза

С развитием технологий точность прогнозирования выработки ВЭУ/ВЭС повышается, однако ошибка возрастает с увеличением временного горизонта прогнозирования [2, 3]. Для оценки точности прогнозов используются различные метрики, в основном основанные на статистических характеристиках [2, 3, 5].

Наиболее часто применяются следующие показатели:

- нормализованная ошибка (Normalised Error, NE) – разность между прогнозируемым и измеренным значением, нормированная на максимальное значение прогноза;
- средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE) – средний модуль отклонения прогнозного значения от реального;
- средняя ошибка смещения (Mean Bias Error, MBE) – определяет систематическую переоценку или недооценку величины;
- среднеквадратичная ошибка (Root Mean Square Error, RMSE) – наиболее широко используемая метрика, характеризующая точность прогноза;
- медиана абсолютной ошибки – оценка медианного отклонения;
- коэффициент корреляции или детерминации – отражает степень совпадения прогнозных и фактических данных.

RMSE наиболее часто используется для определения допустимых пределов ошибок:

- в Китае до 20 % для краткосрочного прогноза и 15 % для горизонта 4 часа [33];
- в Ирландии 6–8 % согласно требованиям системных операторов EirGrid и SONI [34];
- в России рекомендуемый уровень RMSE составляет 10 % от установленной мощности ВЭС [2].

Для сравнения эффективности различных методов прогноза обычно применяются нормированные характеристики:

- NRMSE (нормированное RMSE) – для учета масштаба объекта;
- NMAE (нормированная абсолютная ошибка) – для оценки ошибок независимо от размера объекта;
- NMBE (нормированная средняя ошибка смещения) – для оценки систематических ошибок.

Эти показатели удобны для оценки влияния разных наборов исходных данных на точность прогнозов [2].

В табл. 1 представлены формулы основных метрик, где приняты следующие обозначения: i – индекс значения из общего набора данных; n – количество данных в наборе; $P_i^{\text{изм}}$ – измеренная мощность; $P_{Ni}^{\text{изм}}$ – нормированная измеренная мощность; $P_i^{\text{прог}}$ – прогнозируемая мощность; $P_{Ni}^{\text{прог}}$ – нормированная прогнозируемая мощность.

Большинство авторов пользуются указанными выше классическими статистическими метриками, однако согласно [3], эти показатели погрешности прогноза могут не соответствовать требованиям сетевых операторов. Сетевые операторы требуют дополнительных метрик для выявления экстремальных ошибок, которые могут привести к серьезным экономическим последствиям [3]:

- асимметрия и эксцесс распределения ошибок – для анализа частоты экстремальных отклонений;

Таблица 1. Основные метрики погрешности прогнозирования

Table 1. Main forecasting error metrics

Показатель	Описание	Формула
RMSE	среднеквадратичная ошибка показывает как случайные, так и систематические ошибки	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i^{\text{изм}} - P_i^{\text{прог}})^2} \cdot 100$
MBE (%)	средняя ошибка смещения: – MBE > 0 – завышение прогнозных значений – MBE < 0 – занижение прогнозных значений	$\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i^{\text{изм}} - P_i^{\text{прог}}) \right) \cdot 100$
MAE	средняя абсолютная ошибка	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^{\text{изм}} - P_i^{\text{прог}} $
R^2	коэффициент детерминации	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n [P_i^{\text{прог}} - P_i^{\text{изм}}]^2}{\sum_{i=1}^n \left[P_i^{\text{изм}} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_k^{\text{изм}} \right]^2}$
NE	нормированная ошибка	$E_i = P_{Ni}^{\text{изм}} - P_{Ni}^{\text{прог}}$ $P_{Ni}^{\text{прог}} = \frac{P_i^{\text{прог}}}{\max_{i=1}^n (P_i^{\text{изм}})}$ $P_{Ni}^{\text{изм}} = \frac{P_i^{\text{изм}}}{\max_{i=1}^n (P_i^{\text{изм}})}$
NMBE (%)	нормированная средняя ошибка смещения: – NMBE > 0 – завышение прогнозных значений – NMBE < 0 – занижение прогнозных значений	$\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \right) \cdot 100$
NRMSE (%)	нормированная среднеквадратичная ошибка	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2} \cdot 100$
NMAE (%)	нормированная абсолютная средняя ошибка	$\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \right) \cdot 100$

– максимальная абсолютная ошибка – оценивает возможные последствия в случае максимальной ошибки;

– интеграл Колмогорова-Смирнова (KSI) – определяет отличие между прогнозными и фактическими данными.

Использование дополнительных метрик позволяет учитывать экстремальные отклонения, которые не видны при использовании классических показателей. Это особенно важно для минимизации рисков в работе энергосистем и повышения экономической эффективности прогнозов.

Обзоры существующих моделей краткосрочного прогноза выработки ВЭУ/ВЭС

Существующие модели краткосрочного прогнозирования выработки ВЭУ/ВЭС подробно рассматриваются в ряде научных исследований [2, 3, 5, 7–9]. Однако многие из этих обзоров не содержат информации о необходимых исходных данных для разработки моделей, не дают подробного описания процесса их построения, а также не акцентируют внимание на практической применимости. Более полные и детализированные обзоры представлены в работах [2, 3].

В исследовании [2] рассмотрено 40 моделей краткосрочного прогноза скорости ветра и выработки ВЭУ/ВЭС, разработанных в период с 2006 по 2020 год для береговых ВЭС разных регионов мира. В работе представлены классификация моделей, факторы, влияющие на их точность, и оценка их эффективности. Помимо скорости ветра ключевыми входными данными для таких моделей часто являются температура, направление ветра, влажность и атмосферное давление. Авторы предложили блок-схему (дорожную карту) для выбора оптимального метода прогнозирования, учитывающего доступные данные, временные горизонты и другие условия. Это исследование содержит рекомендации, направленные на улучшение моделей и их адаптацию к различным задачам. Краткая информация по некоторым моделям, анализируемым в исследовании [2], приведена в табл. 2.

Исследование [3] сосредоточено на анализе точности прогнозирования выработки как береговых, так и морских ВЭС для 34 стран-членов ENTSO-E в период с 2013 по 2021 год. Впервые проведена раздельная оценка точности прогнозов на сутки вперед и внутри суток, с учетом завышения и занижения прогнозной выработки относительно фактической. Результаты пока-

Таблица 2. Примеры оценки точности прогнозных моделей

Table 2. Examples of evaluating the accuracy of predictive models

Источник	Метод /Модель	Входные данные	Источник данных/ Размер выборки/ Частота выборки	Метрики оценки	Результаты оценки
Zhao et al., 2016 [7]	Статистический / Bidirectional ELM	Мощность ветрового потока	Наземная ВЭС в США/12 мес/60 мин	NMBE NMAE NRMSE	-0,53 % 16,61 % 21,27 %
Singh et al. 2007 [8]	Статистический / MLP	Скорость и направление ветра, плотность воздуха	ВЭС Форт-Дэвис в Техасе, США/2 мес/10 мин	NMBE	1,08 %
Chang, 2013 [17]	Статистический / BPNN	Мощность ветрового потока	ВЭУ на побережье Тайчжуна (Тайвань)/6 дней/10 мин	NMBE	0,278 %
Zhang et al., 2019 [28]	Гибридный/ LSTM, Gaussian Mixture Model (GMM)	Скорость ветра	ВЭС из 123-х ВЭУ на севере Китая/3 месяца/15 мин	RMSE	6,37 %
Marcos et al. 2017 [29]	Гибридный/ Фильтр Калмана, статистическая регрессия и натурная мощностная характеристика ВЭУ	ЧПП	ВЭС Palmas и RN 05 в Бразилии	MBE RMSE	4,32 кВт 101,11 кВт

зали, что точность прогнозов существенно зависит от качества исходных данных и варьируется между странами. Например, для береговых ВЭС самые точные прогнозы зафиксированы в Германии, Испании, Франции и Швеции, где годовое завышение составило от 0,8 до 6,8 %. В других странах это значение варьировалось до 132 %. Для морских ВЭС годовые отклонения прогнозов в сторону завышения находились в диапазоне от 0,9 до 61,7 %, с наиболее низкими значениями в Германии и Дании.

Эти исследования имеют значительный практический вклад. Они позволяют системным операторам и участникам энергетического рынка учитывать локальные особенности данных и точность прогнозов при планировании работы энергосистем. Кроме того, разработанная в [2] дорожная карта упрощает выбор подходящего метода прогнозирования в зависимости от доступных данных и требований к точности, что особенно важно в условиях растущего использования ВЭС в энергетических системах.

Заключение

1. Физические модели прогнозирования обеспечивают более высокую точность при среднесрочном и долгосрочном прогнозировании выработки ВЭУ/ВЭС, но требуют использования значительных вычислительных ресурсов. В то же время статистические методы более эффективны для краткосрочных прогнозов, однако их точность напрямую зависит от объема и качества используемых данных. Наиболее перспективным направлением являются гибридные модели, объединяющие физические и статистические подходы, а также методы ансамблевого обучения, позволяющие повысить точность прогнозов за счет синергии различных алгоритмов.

2. Из-за стохастической природы ветрового режима ни одна модель прогнозирования не может обеспечить абсолютную точность, которая определяется множеством факторов, включающих объем и частоту выборки данных для обучения, тестирования и валидации, а также используемые алгоритмы и методы. Проведенные исследования показывают, что точность прогнозных моделей относительна и зависит от условий их применения. В литературе представлены различные подходы к оценке точности существующих моделей прогнозирования, однако отсутствие единого подхода к оценке точности моделей прогноза усложняет сопоставление их эффективности. В связи с этим требуется разработка унифицированного метода оценки точности моделей прогнозирования.

3. Современные вычислительные технологии и методы обработки данных позволяют анализировать все более объемные массивы информации, однако это также порождает новые вызовы, связанные с предварительной обработкой и фильтрацией данных. В частности, особое внимание следует уделять устранению выбросов и аномалий в исторических данных и использованию методов коррекции численных прогнозов погоды. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку адаптивных алгоритмов обработки входных данных, способных минимизировать погрешности прогноза и повысить его надежность.

Список литературы / References

[1] Макарова А.А., Кулагина В.А., Грушевенко Д.А., Галкина А.А. *Прогноз развития энергетики мира и России 2024*. М.: ИНЭИ РАН, 2024. 207 с. [Makarova A.A., Kulagina V.A.,

Grushevenko D. A., Galkina A. A. *Forecast of the Development of the World and Russia's Energy Sector 2024*, Moscow, INEI RAN, 2024, 207 p. (in Russian)]

[2] Hanifi S., Liu X., Lin Z., Lotfian S. A Critical Review of Wind Power Forecasting Methods – Past, Present and Future, *Energies*, 2020, 13(15), 1–24

[3] Zsiborács H., Pintér G., Vincze A., Hegedűsné Baranyai N. Wind Power Generation Scheduling Accuracy in Europe: An Overview of ENTSO-E Countries, *Sustainability*, 2022, 14(24), 1–58

[4] Регламент определения объемов, инициатив и стоимости отклонений. Приложение 12 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка. Ассоциация «Некоммерческое партнерство Совет рынка по организации эффективной системы оптовой и розничной торговли электрической энергией и мощностью» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://lk.np-sr.ru/sites/default/files/sr_regulation/reglaments/r12_01012018_24012018.pdf [Regulation on the Determination of Volumes, Initiatives, and Costs of Deviations. Appendix 12 to the Agreement on Joining the Wholesale Market Trading System. Association “NP Market Council” [Electronic resource] – Access: https://lk.np-sr.ru/sites/default/files/sr_regulation/reglaments/r12_01012018_24012018.pdf

[5] Юсупов К. И., Тожибаев С. Т. Обзор методов прогнозирования в ветроэнергетике. *СОК № 12*, 2022, 70–73 [Yusupov K. I., Tozhibaev S. T. An Overview of Wind Power Forecasting Methods, *SOK no. 12*, 2022, 70–73 (in Russian)]

[6] Зубакин В. А. Краткосрочное прогнозирование выработки ветровой электростанции. *Журнал «Энергетическая политика» № 8*, 2022, 20–27 [Zubakin V. A. Short-Term Forecasting of Wind Farm Power Output, *Energy policy no. 8*, 2022, 20–27 (in Russian)]

[7] Zhao Y., Ye L., Li Z., Song X., Lang Y., Su J. A novel bidirectional mechanism based on time series model for wind power forecasting, *Appl. Energy*, 2016, 793–803

[8] Singh S., Bhatti T. S., Kothari D. P. Wind power estimation using artificial neural network, *J. Energy Eng.*, 2007, 46–52

[9] Sharma R., Singh D. A Review of Wind Power and Wind Speed Forecasting, *Rahul Sharma J. Eng. Res. and Appl.*, 2018, 8, 1–9

[10] Зубакин В. А., Величко А. И. Прогнозирование выработки ветряных электростанций и оценка влияния климатических параметров на кривую мощности ветрогенератора. *Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина*, 2022, 1, 120–131 [Zubakin V. A., Velichko A. I. Forecasting Wind Farm Production and Assessing the Influence of Climatic Parameters on the Wind Turbine Power Curve, *Proceedings of the Gubkin University*, 2022, 1, 120–131 (in Russian)]

[11] Соловьев Б. А., Гамисония Г. К. Методы прогнозирования мощности ветра для шельфовых ветроэлектростанций. *Журнал «Электротехнические и информационные комплексы и системы»*, 2022, 18(3–4), 108–120 [Soloviev B. A., Gamisoniya G. K. Methods of Wind Power Forecasting for Offshore Wind Farms, *Electrical engineering and information complexes and systems*, 2022, 18(3–4), 108–120 (in Russian)]

[12] Манусов В. З., Холдонов А. А., Бойко К. Н., Халдаров Ш. К. Повышение степени интеграции ветроэнергетических станций в энергосистему путем использования у системного оператора математических моделей прогнозирования ветра и электропотребления. *Problemele Energeticii Regionale*, 2017, 3(35), 45–57 [Manusov V. Z., Kholdonov A. A., Boiko K. N., Khaldarov

Sh. K. Increase of the Integration Degree of Wind Power Plants into the Energy System Using Wind Forecasting and Power Consumption Predictor Models by Transmission System Operator, *Regional Energy Problems*, 2017, 3(35), 45–57 (in Russian)]

[13] Дерюгина Г. В., Игнатьев Е. В., Голубков У. Ф. Методика разработки модели краткосрочного прогнозирования скорости ветра и выработки ветроэлектрической установки. *Новое в Российской Электроэнергетике*, 2024, 10, 6–21. [Deriugina G.V., Ignatev E.V., Golubkov U.F. Methodology for Developing a Short-Term Wind Speed and Wind Power Forecasting Model, *New in the Russian Electric Power Industry*, 2024, 10, 6–21 (in Russian)]

[14] Горшенин А. Ю., Денисова Л. А. Прогнозирование выработки электроэнергии ветроэлектростанцией с применением рекуррентной нейронной сети. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2023, 4, 39–44 [Gorshenin A. Yu., Denisova L. A. Forecasting Wind Farm Electricity Generation Using a Recurrent Neural Network, *Izvestiya TulsU. Technical Sciences*, 2023, 4, 39–44 (in Russian)]

[15] Манусов В. З., Хасанзода Н. Оценка мощности ветроэнергетических установок на основе нечеткой модели ветрового потока и его вероятностных характеристик. *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*, 2019, № 1 (42), 73–82 [Manusov V. Z., Khasanzoda N. Estimating the Power of Wind Energy Installations Based on a Fuzzy Wind Flow Model, *Reports of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation*, 2019, 1(42), 73–82 (in Russian)]

[16] Soman S. S., Zareipour H., Malik O., Mandal P. A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons, *North American Power Symposium*, 2010, 1–8

[17] Chang W. Y. Comparison of Three Short Term Wind Power Forecasting Methods, *Advanced Materials Research*, 2013, 684, 671–675

[18] Sideratos G., Hatziaargyriou N. D. An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(1), 258–265

[19] Горшенин А. Ю., Блохин А. В., Грицай А. С. Анализ характеристик ветроэлектростанций и метеоусловий, влияющих на энерговыработку. *Математические структуры и моделирование*, 2022, 3(63), 48–56 [Gorshenin A. Yu., Blokhin A. V., Gritsay A. S. Analysis of Wind Farm Characteristics and Meteorological Conditions Affecting Generation, *Mathematical structures and modelling*, 2022, 3(63), 48–56 (in Russian)]

[20] «ВЭС-прогноз» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.inlinegroup.ru/solutions/software/ves_prognoz/ [WPP-forecast [Electronic resource] – Access: https://www.inlinegroup.ru/solutions/software/ves_prognoz/]

[21] «SMARTREN» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://smartren.ru/prediction> [“SMARTREN” [Electronic resource] – Access: <https://smartren.ru/prediction>]

[22] «NBI» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://nbiservice.ru/products/> [“NBI” [Electronic resource] – Access: <https://nbiservice.ru/products/>]

[23] «Метеосервис» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://pro.meteoservice.ru/solutions/solar-wind-power/> [“Meteoservice” [Electronic resource] – Access: <https://pro.meteoservice.ru/solutions/solar-wind-power/>]

[24] Wang H., Han S., Liu Y., Yan J., Li L. Sequence Transfer Correction Algorithm for Numerical Weather Prediction Wind Speed and Its Application in a Wind Power Forecasting System, *Applied Energy*, 2019, 237, 1–10

- [25] Cabezon D., Martí I., Sanisidro M.J. Comparison of Methods for Power Curve Modeling, *Proceedings of the Global WindPower Conference*, 2004, 1–9
- [26] Focken U., Lange M., Waldl H.-P. Previento – A Wind Power Prediction System with an Innovative Upscaling Algorithm, *Proceedings of the European Wind Energy Conference (EWEC)*, 2001, 1–4
- [27] Jiang Y., Chen X., Yu K., Liao Y. Short-Term Wind Power Forecasting Using Hybrid Method Based on Enhanced Boosting Algorithm, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 2017, 5, 126–133
- [28] Zhang Y., Le J., Liao X., Zheng F., Li Y. A Novel Combination Forecasting Model for Wind Power Integrating Least Square Support Vector Machine, Deep Belief Network, Singular Spectrum Analysis and Locality-Sensitive Hashing, *Energy*, 2019, 168, 558–572
- [29] Marcos J.L., Alexandre K.G., Saulo R.F., Jairo P., De Mattos J.G.Z. A Meteorological–Statistic Model for Short-Term Wind Power Forecasting, *J. Control Autom. Electr. Syst*, 2017, 28, 679–691
- [30] Aasim, Singh S.N., Mohapatra A. Repeated Wavelet Transform Based ARIMA Model for Very Short-Term Wind Speed Forecasting, *Renew. Energy*, 2019, 136, 758–768
- [31] Wang D., Luo H., Grunder O., Lin Y. Multi-Step Ahead Wind Speed Forecasting Using an Improved Wavelet Neural Network Combining Variational Mode Decomposition and Phase Space Reconstruction, *Renew. Energy*, 2017, 113, 1345–1358
- [32] Fang X., Hodge B.M., Du E., Zhang N., Li F. Modelling Wind Power Spatial-Temporal Correlation in Multi-Interval Optimal Flow: A Sparse Correlation Matrix Approach, *Appl. Energy*, 2018, 230, 531–539
- [33] Zhang J., Yan J., Infield D., Liu Y., Lien F.-S. Short-term forecasting and uncertainty analysis of wind turbine power based on long short-term memory network and Gaussian mixture model, *Appl. Energy*, 2019, 241, 229–244
- [34] Foley A.M., Leahy P.G., Marvuglia A., McKeogh E.J. Current methods and advances in forecasting of wind power generation, *Renew. Energy*, 2012, 37, 1–8.

EDN: NEZBQJ

УДК 621.311.24

Study of the Influence of Aerodynamic Wake Effects on Power Generation and Economic Performance of Wind Farms

Evgenii V. Ignatev*, Galina V. Deriugina,
Vladimir R. Kulik and Dmitry A. Kornev
*Moscow Power Engineering Institute
Moscow, Russian Federation*

Received 21.10.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 11.04.2026

Abstract. This paper presents a methodology for the comprehensive assessment of the influence of aerodynamic wake effects on power generation and the economic performance of wind farms. The methodology is based on the application of wake models developed by N.O. Jensen in their practical implementations by I. Katić and G.C. Larsen, taking into account the thrust coefficient, surface roughness, and actual air density. The results include modeling of the surface roughness characteristics that reflect seasonal and meteorological variations at the wind farm site, and the thrust coefficient derived using the authors' software WTCurves, which has been validated against data from real wind turbines. A sensitivity analysis was performed to evaluate how variations in input parameters affect the calculated aerodynamic losses and the economic performance indicators of the wind farm. It was found that the actual air density and the method of specifying the thrust coefficient exert the greatest influence, while the choice of wake model and surface roughness characteristics have a secondary effect. The obtained results contribute to improving the accuracy of energy yield forecasting and the reliability of investment assessments at the wind farm design stage.

Keywords: wind turbine, wind power plant, aerodynamic wake, wake effect, thrust coefficient, surface roughness.

Citation: Ignatev E. V., Deriugina G. V., Kulik V.R., Kornev D. A. Study of the Influence of Aerodynamic Wake Effects on Power Generation and Economic Performance of Wind Farms. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 450–466. EDN: NEZBQJ



Исследование влияния аэродинамического затенения на выработку электроэнергии и показатели экономической эффективности ВЭС

Е. В. Игнатъев, Г. В. Дерюгина,
В. Р. Кулик, Д. А. Корнев

*Московский энергетический институт
Российская Федерация, Москва*

Аннотация. В работе представлена методика комплексной оценки влияния аэродинамического затенения на выработку электроэнергии и экономическую эффективность ветроэлектрических станций (ВЭС). Методика основана на применении моделей спутной струи Н. О. Йенсена в её практической имплементации И. Катича и Г. К. Ларсена с учетом характеристики коэффициента тяги, шероховатости подстилающей поверхности и фактической плотности воздуха. Представлены результаты моделирования характеристик шероховатости подстилающей поверхности, отражающей сезонные и метеорологические изменения на площадке ВЭС, и коэффициента тяги с использованием разработанной авторами программы WTCurves, результаты которого прошли верификацию по данным реальных ВЭУ. Выполнена оценка чувствительности расчётов аэродинамических потерь и показателей экономической эффективности ВЭС к изменению входных параметров. Установлено, что наибольшее влияние оказывают фактическая плотность воздуха и способ задания коэффициента тяги, тогда как выбор модели спутной струи и характеристик шероховатости дает второстепенный эффект. Полученные результаты позволяют повысить точность прогнозирования выработки и обоснованность инвестиционных расчётов на этапе проектирования ВЭС.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, ветроэлектрическая станция, аэродинамическое затенение, спутная струя, коэффициент тяги, шероховатость подстилающей поверхности.

Цитирование: Игнатъев Е. В. Исследование влияния аэродинамического затенения на выработку электроэнергии и показатели экономической эффективности ВЭС / Е. В. Игнатъев, Г. В. Дерюгина, В. Р. Кулик, Д. А. Корнев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 450–466. EDN: NEZBQJ

Введение

Эффективность функционирования ветроэлектрических станций (ВЭС) в значительной степени определяется оптимальностью размещения ветроэнергетических установок (ВЭУ) с учётом влияния аэродинамического затенения (wake effect), возникающего вследствие извлечения ветровым колесом ВЭУ части кинетической энергии набегающего ветрового потока. За ометаемой площадью ветроколеса ВЭУ формируется спутная струя ВЭУ – область пониженной скорости и повышенной турбулентности, воздействующая на последующие ВЭУ по направлению ветрового потока [1, 2]. Отсутствие учета этого явления может привести к существенным ошибкам при оценке экономической эффективности проекта [3–5]. Потери годовой выработки электроэнергии вследствие аэродинамического затенения могут достигать 2–20 % в зависимости от схемы и плотности размещения ВЭУ и конфигурации площадки [6]. Повышенная турбулентность в спутной струе, затеняющей ВЭУ, приводит к сокращению срока службы ВЭУ [7, 8], и появляется дополнительная неравномерность выработки электрической мощности внутри площадки ВЭС, которая осложняет прогнозирование режимов работы ВЭС [9].

В настоящее время для расчёта аэродинамического затенения применяется широкий спектр моделей – от простых эмпирических до численных и гибридных. Наиболее распространены модели спутной струи Н. О. Йенсена (N. O. Jensen, 1983), её инженерная имплементация И. Катича (I. Katić, 1986), модель вихревой вязкости Дж. Ф. Эйнсли (J. F. Ainslie, 1988) и модель Г. К. Ларсена (G. C. Larsen, 1996) [1, 2, 10, 11]. Несмотря на развитие вычислительных методов, основанных на решении уравнений Рейнольдса (RANS) или моделировании крупных вихрей (LES), именно эмпирические подходы сохраняют широкое распространение благодаря их простоте, устойчивости и приемлемой точности для инженерных задач, включая микросайтинг ВЭС и физическое моделирование в составе гибридных систем прогнозирования выработки электрической мощности ВЭС [12–14].

В настоящей работе изложена методика расчёта аэродинамического затенения ВЭС, использующая модели спутной струи ВЭУ N. O. Jensen – I. Katić и G. C. Larsen. Особое внимание уделено оценке чувствительности показателей энергетической и экономической эффективности ВЭС к используемой модели спутной струи ВЭУ и характеристикам коэффициента тяги ВЭУ и шероховатости подстилающей поверхности на площадке ВЭС и учету фактической плотности воздуха на площадке.

Метод расчета карты аэродинамического затенения ВЭС

Методика построения карты аэродинамического затенения ВЭС основана на итерационном определении взаимного влияния ВЭУ, расположенных на площадке, с учётом направления ветра и геометрических параметров каждой установки. Схема расчета строится следующим образом: для каждого фиксированного направления ветра формируется карта взаимодействий (wake map), которая отражает наличие затенения между каждой парой ВЭУ. Расчёт выполняется по всем возможным комбинациям пар i, j , где i -я ВЭУ рассматривается как потенциально затеняющая, а j -я ВЭУ – как затеняемая. Проверяется, находится ли j -я ВЭУ в зоне спутной струи, создаваемой i -й ВЭУ, в зависимости от их взаимного расположения и направления ветра.

Для определения относительного положения ВЭУ для каждой пары ВЭУ определяются их географические координаты, которые переводятся в метрическую систему. Взаимное расположение ВЭУ на площадке ВЭС характеризуется продольным (x) и поперечным (L) расстояниями между ВЭУ, где продольное расстояние x характеризует расстояние между плоскостями вращения ветровых колес i -й затеняющей ВЭУ и j -й затеняемой ВЭУ, а поперечное расстояние L – расстояние между осями ветровых колес i -й затеняющей ВЭУ и j -й затеняемой ВЭУ.

Продольное расстояние x и поперечное расстояние L определяются в зависимости от направления ветра, характеризуемого азимутом θ как:

$$x = \Delta Y \cdot \cos\theta + \Delta X \cdot \sin\theta, L = |\Delta Y \cdot \sin\theta + \Delta X \cdot \cos\theta|. \quad (1)$$

В случае если ($x < 0$), то затеняющая ВЭУ находится позади затеняемой по направлению ветра, следовательно, затенения нет.

При расчете карты аэродинамического затенения следует учитывать расширение спутной струи ВЭУ. При удалении от затеняющей ВЭУ спутная струя расширяется пропорционально расстоянию (x). Диаметр спутной струи D_{eff} на расстоянии x определяется в зависимости от используемой модели спутной струи (N. O. Jensen – I. Katić и G. C. Larsen).

Важным фактором является определение доли перекрытия спутной струей i -й затеняющей ВЭУ ометаемой площади ветрового колеса j -й затеняемой ВЭУ. Для оценки доли перекрытия ($\bar{A} = A_{\text{overlap}} / A$) используется геометрическая модель пересечения двух окружностей: с радиусом ветроколеса затеняемой ВЭУ ($R_1 = D/2$) и с радиусом спутной струи на расстоянии x ($R_2 = D_{\text{eff}}/2$), центры которых находятся на расстоянии L . Перекрытие определяется по следующим условиям: в случае если $L \geq R_1 + R_2$, то пересечения нет $\bar{A} = 0$; если $L \leq |R_1 + R_2|$, площадь их пересечения равна площади меньшей окружности; в остальных случаях площадь пересечения рассчитывается по стандартным формулам аналитической геометрии [15]. Схема взаимодействия спутной струи и ветроколеса затеняемой ВЭУ представлена на рис. 1.

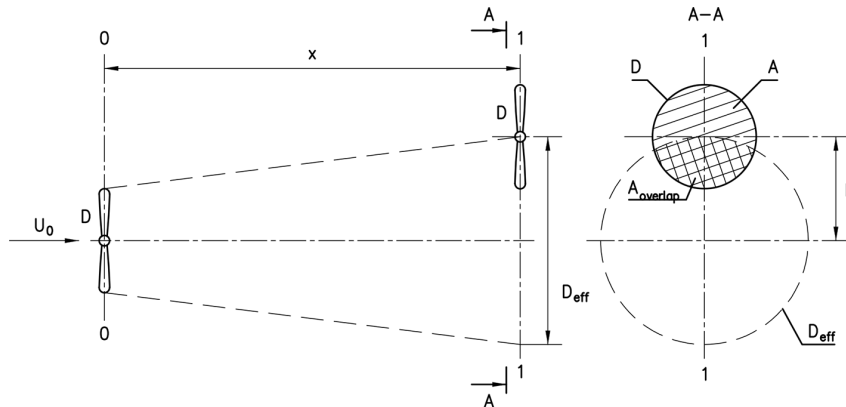


Рис. 1. Схема взаимодействия спутной струи и ветроколеса затеняемой ВЭУ [16, 17]

Fig. 1. Scheme of wake – rotor interaction [16, 17]

Описанная последовательность расчётов выполняется для каждого из наблюдаемых направлений ветра на площадке ВЭС. По результатам формируется совокупная карта аэродинамического затенения, которая содержит: перечень пар ВЭУ с установленным фактом затенения; геометрические параметры взаимодействия; долю перекрытия $\bar{A}$ для каждой пары в каждой возможной ситуации.

Модель спутной струи N. O. Jensen и её практическая имплементация I. Katić

Карта аэродинамического затенения ВЭС (Wake Map) применяется для расчета входных скоростей каждой j -й ВЭУ с применением одной из рассматриваемых моделей спутной струи с учетом её практической имплементации. В данной работе в качестве одной из моделей рассматривается эмпирическая модель N. O. Jensen [1] и её инженерная имплементация, предложенная I. Katić [10]. Для определения сокращения скорости ветрового потока на расстоянии x вдоль оси спутной струи ($\delta V = 1 - V_x / U_0$) используется формула:

$$1 - \frac{V_x}{U_0} = (1 - \sqrt{1 - C_t}) \left(\frac{D}{D + 2kx} \right)^2 \times \bar{A}, \quad (2)$$

где U_0 – скорость невозмущенного ветрового потока на высоте башни ВЭУ; V_x – скорость ветрового потока внутри спутной струи на расстоянии x от плоскости ветрового колеса ВЭУ; D – диаметр ветрового колеса ВЭУ; k – коэффициент затухания спутной струи; C_t – коэффициент тяги ВЭУ.

Расширение спутной струи на расстоянии x от плоскости ветрового колеса ВЭУ определяется по зависимости:

$$D_x^{eff} = D + 2kx. \quad (3)$$

Зависимость значения k от величины шероховатости подстилающей поверхности Z_0 можно установить в соответствии с [18] по приведенной на рис. 2 зависимости [17].

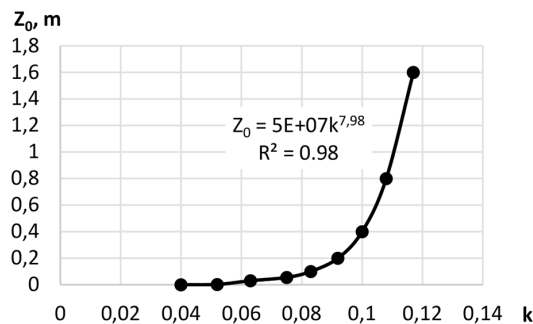


Рис. 2. Зависимость коэффициента затухания спутной струи ВЭУ k от величины шероховатости подстилающей поверхности Z_0

Fig. 2. Dependence of decay coefficient of wind turbine's wake k from surface roughness Z_0

В качестве используемого метода суперпозиции спутных струй применяется метод квадратичной суперпозиции (RSS). Расчеты проводятся с использованием характеристик коэффициента тяги ВЭУ – $C_t(V)$, которые рассчитываются численным методом по паспортным мощностным характеристикам ВЭУ – $N(V)$ с использованием разработанной авторами программы WTCurves [19].

На рис. 3 показана тепловая карта распределения скорости внутри спутной струи ВЭУ по модели N. O. Jensen при следующих параметрах: $U_0 = 6$ м/с; $C_t = 0.801$; $D = 100$ м; $Z_0 = 1.83$ см.

Модель спутной струи G. C. Larsen

Модель спутной струи G. C. Larsen, также известная как EWTS II, является полуаналитической моделью, основанной на асимптотических решениях уравнений турбулентного пограничного слоя с вращательной симметрией, предложенных Прандтлем [11]. С помощью данной модели возможно аналитически рассчитать радиус спутной струи на расстоянии x от плоскости ветрового колеса ВЭУ по формуле:

$$R_w = \left[\frac{35}{2\pi} \right]^{1/5} [3c_1^2]^{1/5} [C_t A x]^{1/3}, \quad (4)$$

где A – ометаемая площадь ветроколеса ВЭУ; c_1 – безразмерная длина смешивания (*Prandtl mixing length parameter*).

Параметр c_1 отделяет влияние аэродинамического сопротивления ветрового колеса от общих характеристик ветрового потока и зависит в основном от параметра интенсивности турбулентности ветрового потока – I_T . Альтернативные и аппроксимированные выражения для c_1 приведены в отчете EWTS II, однако в настоящей работе используется реализованная версия модели, опубликованная в [11, 18].

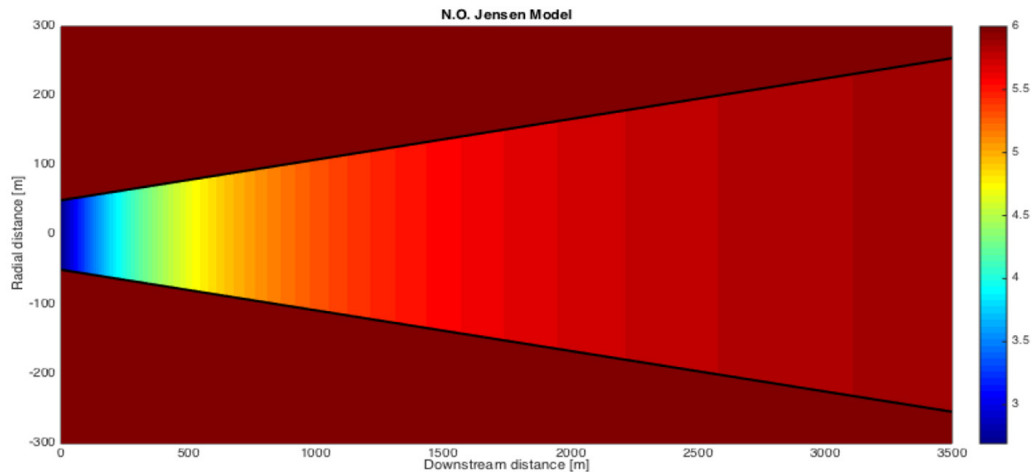


Рис. 3. Тепловая карта распределения скорости внутри спутной струи ВЭУ, рассчитанная с использованием модели N. O. Jensen

Fig. 3. Heatmap of velocity distribution in the wind turbine's wake calculated using N. O. Jensen model

Снижение скорости в радиальной точке r на расстоянии x от плоскости вращения ветрового колеса ВЭУ по модели Ларсена рассчитывается по формуле:

$$U_0 - V(x, r) = -\frac{U_0}{9} (C_t A x^{-2})^{1/3} \times \left\{ r^{3/2} (3c_1^2 C_t A x)^{-1/2} - \left(\frac{35}{2\pi} \right)^{3/10} (3c_1^2)^{-1/5} \right\}^2. \quad (5)$$

Интенсивность турбулентности I_T состоит из двух составляющих: $I_{\text{амбиент.}}$ – AMBIENT (интенсивности турбулентности в невозмущенном ветровом потоке) и $I_{\text{доб.}}$ – добавленной турбулентности (интенсивности турбулентности в спутной струе ВЭУ). В инженерной практике общепринятым является подход расчета I_T по методу квадратичного суммирования (*Residual Sum of Squares, RSS*) [18]:

$$I_T = \sqrt{I_{\text{амбиент.}}^2 + I_{\text{доб.}}^2}. \quad (6)$$

Величина AMBIENT турбулентности может быть определена по данным фактических измерений и с использованием эмпирической формулы, приводимой в [18] и международных (IEC 61400–1:2019 «Wind turbines – Part 1: Design requirements») и национальных (DNV & Risø «Guidelines for the Design of Wind Turbines») стандартах:

$$I_{\text{амбиент.}} = A_x \cdot k \cdot \left[\frac{1}{\ln\left(\frac{H}{Z_0}\right)} \right], \quad (7)$$

где: A_x – безразмерная величина (задаётся пользователем в диапазоне от 2,5 до 1,8) [18]; $k = 0,4$ – константа фон Кармана; H – высота, для которой определяется величина интенсивности турбулентности, м; Z_0 – шероховатость подстилающей поверхности, м.

В качестве модели добавленной турбулентности используется эмпирическая модель, также разработанная Г.К. Ларсеном, основанная на зависимости добавленной турбулентности от расстояния между плоскостями вращения ветровых колес (в диаметрах) вдоль направления ветра и коэффициента тяги ВЭУ – C_t [11]:

$$I_{\text{доб.}} = 0,29 \cdot S^{-\frac{1}{3}} \sqrt{1 - \sqrt{1 - C_t}}, \quad (8)$$

где S – расстояние между плоскостями вращения ветровых колес затеняемой и затеняющей ВЭУ в диаметрах ветрового колеса.

В случае если ВЭУ подвергается одновременному воздействию нескольких спутных струй, то суперпозиция добавленной турбулентности для неё может также рассчитываться с использованием квадратичной суперпозиции (RSS):

$$I_{\text{доб.}}^{\text{сумм.}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{\text{доб.}i}^2}. \quad (9)$$

Для общего случая, когда ВЭУ затеняется несколькими спутными струями с их неполным перекрытием ометаемой площади, возможно использовать следующий подход:

$$I_T = \sqrt{I_{\text{амбиент.}}^2 + \sum_{i=1}^n \left(I_{\text{доб.}i} \cdot \frac{A_{\text{overlap}}}{A} \right)^2}. \quad (10)$$

Существует большое количество методов интеграции скорости внутри площади перекрытия, так, например, схема интегрирования при полном перекрытии была разработана самим Г.К. Ларсеном [11]. Наиболее экономным методом интеграции с точки зрения затрат вычислительной мощности, дающим умеренную погрешность, является метод одномерной квадратуры вдоль «центральной хорды» площади перекрытия. В качестве используемого способа суперпозиции спутных струй, рассчитанных по модели G. C. Larsen, также целесообразно применение метода квадратичной суперпозиции (RSS).

На рис. 4 показана тепловая карта распределения скорости внутри спутной струи ВЭУ, рассчитанная с использованием модели G.C. Larsen при следующих параметрах: $U_0 = 6$ м/с; $C_t = 0.801$; $D = 100$ м; $I_T = 0.1$; $Z_0 = 1.83$ см.

Корректировка мощностной характеристики ВЭУ

Паспортные мощностные характеристики ВЭУ в виде зависимости $N(V)$ предоставляются производителем для стандартной плотности воздуха $\rho_0 = 1,225$ кг/м³. Использование характеристики $N(V)$ в условиях, отличных от стандартных, приводит к искажению оценок годовой

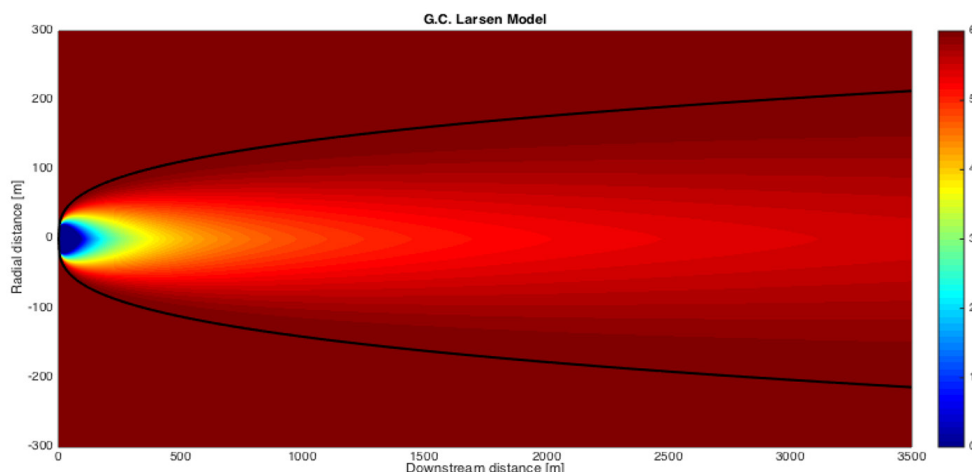


Рис. 4. Тепловая карта распределения скорости внутри спутной струи ВЭУ, рассчитанная с использованием модели G. C. Larsen

Fig. 4. Heatmap of velocity distribution in the wind turbine's wake calculated using G. C. Larsen model

выработки (*AEP*), особенно на высокогорных или континентальных площадках с пониженной плотностью воздуха либо в северных широтах – с повышенной плотностью. В соответствии с IEC 61400–12–1:2005 «Wind turbines – Part 12–1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines», корректировка мощности должна проводиться при отклонении плотности воздуха более чем на 0.05 кг/м^3 от стандартного значения. В стандарте приведены методики (формулы) расчета реальной плотности воздуха с учетом среднееголетних значений температуры и давления на площадке ВЭС и коррекции паспортной мощностной характеристики ВЭУ для реальной плотности воздуха.

Практическое влияние демонстрирует пример корректировки мощностной характеристики ВЭУ модели Komai KWT-300 на площадке Усть-Камчатской ВЭС: абсолютная отметка расположения трех ВЭУ примерно соответствует уровню моря, годовой диапазон температур составляет от $t_1 = -11.9^\circ\text{C}$ до $t_2 = 12.1^\circ\text{C}$ [20] – данному диапазону температур соответствует диапазон плотности воздуха от $\rho_1(t_1) = 1.35 \text{ кг/м}^3$ до $\rho_2(t_2) = 1.24 \text{ кг/м}^3$ (см. рис. 5).

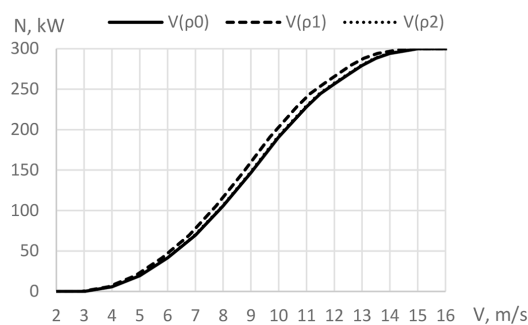


Рис. 5. Скорректированные мощностные характеристики ВЭУ Komai KWT-300 по фактическим плотностям воздуха

Fig. 5. Modified by actual air density power curves of Komai KWT-300 wind turbine

Методика расчета характеристики шероховатости поверхности

Показатель шероховатости подстилающей поверхности Z_0 в различных моделях входит либо напрямую (в модели N. O. Jensen – через коэффициент затухания струи k), либо косвенно – через амбиентную турбулентность и высоту внутреннего пограничного слоя в модели G. C. Larsen. Табличные значения шероховатости, приведенные в ряде источников (таких, как [21]), являются ориентировочными и не учитывают сезонные, погодные и орографические особенности. Сравнение этих значений по разным классификациям показывает значительные расхождения, что ограничивает их применение в инженерных задачах. Поэтому в рамках данной работы была разработана методика численного определения характеристики шероховатости подстилающей поверхности на основе данных ветроизмерительного комплекса (ВИК). Были рассмотрены два подхода для расчёта фактической шероховатости подстилающей поверхности Z_0 , которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. Методики мгновенной оценки величины шероховатости подстилающей поверхности

Table 1. Methods of assessment of the instant value of surface roughness

Шаг	Первый подход (скорости ветра на двух высотах)	Второй подход (интенсивность турбулентности)
1	Основан на логарифмической зависимости ветра по высоте [21, 22]: $\frac{V(h_2)}{V(h_1)} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{Z_0}\right)}$	Основан на использовании зависимости интенсивности турбулентности от высоты [18]: $I_T = A_x \cdot k \cdot \left[\frac{1}{\ln\left(\frac{H}{Z_0}\right)} \right]$
2	Для рассматриваемых пар высот $r(t) = V_2/V_1$	Для каждой высоты $I_T(t)$
3	$Z_0 = (h_2/h_1^r)^{1/(1-r)}$	$Z_0 = H \cdot \exp(-A_x k / I_T)$
4	Фильтр качества: $V_1, V_2 \leq 0 \rightarrow NaN, r = 1 \rightarrow NaN$	Фильтр качества: $I_T \leq 0 \rightarrow NaN$
5	Фильтр выбросов: $Z_0 > 3 \text{ м} \rightarrow NaN$	

В качестве практических рекомендаций при применении первого подхода можно выделить требование по качеству высот: $h_2/h_1 \geq 1.5$ – иначе относительная ошибка Z_0 растёт. При использовании второго подхода A_x изменяется с типом подстилающей поверхности (показатель возможно откалибровать на основании корреляции с другим фактически измеренным параметром – например, высотой снежного покрова).

Для моделирования Z_0 разработан алгоритм, который выполняет автоматическую синхронизацию и агрегацию данных измерений ветра и турбулентности; мгновенную оценку Z_0 по методу, описанному в табл. 1; осреднение по интервалу ΔT (сутки, декада, календарный месяц); формирование итогового ряда значений $Z_0(t)$ для использования в моделях аэродинамического затенения.

Методика была апробирована на данных ВИК Усть-Камчатской ВЭС за период 01.07.2010–30.06.2012 на основании построения регрессионной зависимости параметра высота снежного покрова sss , см (*Snow Surface Height*), полученного по данным с ближайшей метеостанции-

аналога с сайта «Расписание погоды» [23]. Для этого: агрегировались временные ряды sss по тем же интервалам осреднения, что и Z_0 ; выполнялось построение регрессионной зависимости $Z_0 = f(sss)$; оценивалось качество аппроксимации по критерию коэффициента детерминации R^2 (цель – получение зависимости обладающей корреляционной связью, т.е. с $R^2 \geq 0.49$). Наиболее высокая корреляция получена при использовании второго подхода и среднемесячных интервалов осреднения (см. рис. 6).

Коэффициент детерминации в лучшем случае составил $R^2 = 0.89$ при коэффициенте $A_x = 0.7$ (см. рис. 7 – красным показана наилучшая зависимость).

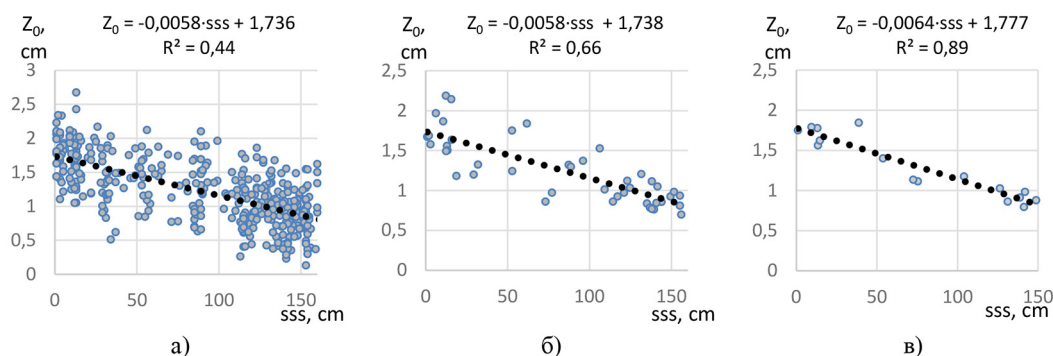


Рис. 6. Примеры регрессионных зависимостей $Z_0 = f(sss)$, полученных по значениям Z_0 , определенным с использованием второго подхода при коэффициенте $A_x = 0.7$, для рассматриваемых интервалов осреднения: а) среднесуточного; б) среднедекадного и в) среднемесячного

Fig. 6. Examples of regression dependences $Z_0 = f(sss)$, built by Z_0 values obtained using second approach with $A_x = 0.7$ coefficient for considered intervals: a) daily; c) decade and c) monthly

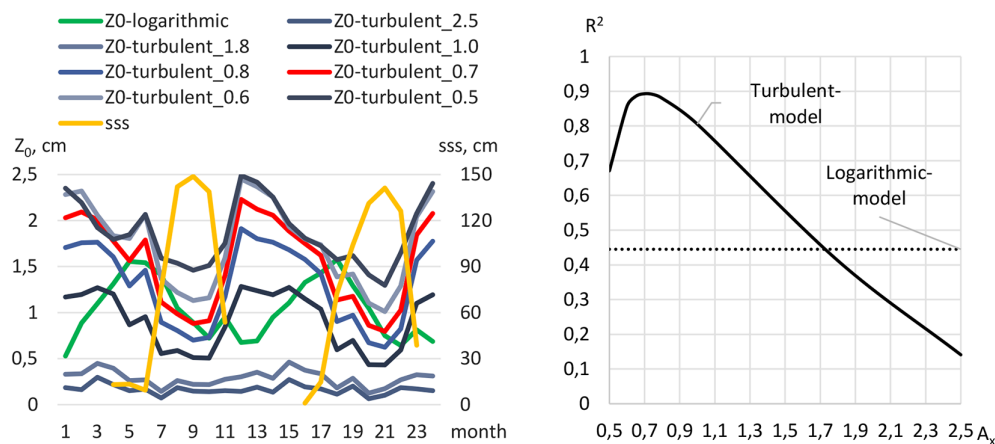


Рис. 7. Временные зависимости шероховатости подстилающей поверхности Z_0 в точке ВИК Усть-Камчатской ВЭС, определенные с использованием рассматриваемых подходов (слева) и зависимости коэффициента детерминации от величины коэффициента A_x для двух рассматриваемых подходов к определению зависимости $Z_0(t)$ (справа) для среднемесячного интервала осреднения

Fig. 7. Time-dependencies of surface roughness Z_0 at the point of wind measuring complex Ust'-Kamchatsky obtained using considered approaches (left) and dependencies of determination coefficient from A_x coefficient for two considered approaches for obtaining $Z_0(t)$ dependency (right) for monthly averaging interval

На основании проведенной верификации методики расчета характеристики шероховатости поверхности можно сделать следующие выводы:

- для оптимального результата рекомендуется использовать второй подход и месячную агрегацию данных с обязательной верификацией по параметру sss или другому аналогичному;
- использование табличных значений Z_0 по типу местности не рекомендуется – оно может приводить к появлению серьёзной ошибки в расчёте затенения.

Чувствительность энергетических и экономических показателей ВЭС к принимаемым в расчетах аэродинамического затенения ВЭС параметрам

Оценка чувствительности показателей эффективности ВЭС к принимаемым в расчетах аэродинамического затенения ВЭС параметрам производится на примере Усть-Камчатской ВЭС, основные характеристики которой и используемых исходных данных для расчета приведены в табл. 2. Оценка величины потерь на аэродинамическое затенение производится для нескольких вариантов расчета в зависимости от используемой модели спутной струи ВЭУ – N.O. Jensen – I. Katić или G.C. Larsen; наличия или отсутствия корректировки мощностной характеристики в зависимости от фактической плотности воздуха; значений шероховатости подстилающей поверхности (среднее за период значение, определенное по характеристике $Z_0(t)$; характеристика $Z_0(t)$ с месячной дискретностью; и характерное значение Z_0 , определенное по табличным значениям); значений коэффициента тяги (постоянное значение C_t или использование характеристики коэффициента тяги $C_t(V)$).

Предварительно ряд скорости и направления ветра за период измерений был восстановлен до 100 % методом линейной интерполяции и смоделирован на высоту оси ветроколеса ВЭУ по методу матрицы коэффициентов Хэллмана [17]. Используемая характеристика шероховатости подстилающей поверхности $Z_0(t)$ была получена по данным измерений интенсивности турбулентности на ВИК и показана на рис. 7 красным цветом.

Таблица 2. Основные характеристики Усть-Камчатской ВЭС и исходных данных для расчетов

Table 2. Main characteristics of Ust'-Kamchatsky wind farm and its initial data for wind energy calculations

Характеристика	Значение
Количество и модель ВЭУ	3 × Komai KWT-300
Мощность ВЭС, кВт	3 × 300
Диаметр ветрового колеса, м	33
Высота башни ВЭУ, м	41.5
Расстояние между ВЭУ, м	125
Азимут оси расположения ВЭУ	64°
Период ветровых измерений ВИК (Δt)	01.07.2010-30.06.2012 ($\Delta t = 10$ с)
Высота измерений, м	34 и 55
Полнота измерений скорости	92.41 % (34 м), 99.36 % (55 м)
Полнота измерений направления	96.51 % (34 м), 99.38 % (55 м)

Оценка чувствительности расчетов аэродинамических потерь на показатели энергетической эффективности ВЭС производится на основании показателей коэффициента использования установленной мощности ВЭС – $k_{иум}$ и выработки электроэнергии ВЭС за период, приведенный к одному году – $\mathcal{E}_{выр.}$, МВт·ч. Результаты расчета приведены в табл. 3. Для рассматриваемого примера без учета аэродинамического затенения и влияния фактической плотности воздуха выработка ВЭС за период составила $\mathcal{E}_{выр.} = 3955.104$ МВт·ч и коэффициент использования установленной мощности $k_{иум} = 0.25$.

Таблица 3. Величины выработки электроэнергии ВЭС и коэффициента использования установленной мощности для рассматриваемых вариантов

Table 3. Wind farm's energy yield and capacity factor values for considered variants

$C_t = 0.75$	Без корректировки $N(V)$				$C_t(V)$	Без корректировки $N(V)$			
Модели спутной струи	N.O. Jensen-I. Katić		G.C. Larsen		Модели спутной струи	N.O. Jensen-I. Katić		G.C. Larsen	
	$k_{иум}$	$\mathcal{E}_{выр.}$ МВт·ч	$k_{иум}$	$\mathcal{E}_{выр.}$ МВт·ч		$k_{иум}$	$\mathcal{E}_{выр.}$ МВт·ч	$k_{иум}$	$\mathcal{E}_{выр.}$ МВт·ч
$Z_0 = const$	0.148	2340.209	0.149	2355.431	$Z_0 = const$	0.196	3087.056	0.197	3104.721
$Z_0(t)$	0.148	2340.041	0.149	2355.335	$Z_0(t)$	0.195	3086.879	0.197	3104.951
$Z_0 = 0.4$ (табл.)	0.148	2339.622	0.149	2355.130	$Z_0 = 0.4$ (табл.)	0.195	3086.491	0.197	3104.681
$C_t = 0.75$	С корректировкой $N(V)$				$C_t(V)$	С корректировкой $N(V)$			
Модели спутной струи	N.O. Jensen-I. Katić		G.C. Larsen		Модели спутной струи	N.O. Jensen-I. Katić		G.C. Larsen	
	$k_{иум}$	$\mathcal{E}_{выр.}$ МВт·ч	$k_{иум}$	$\mathcal{E}_{выр.}$ МВт·ч		$k_{иум}$	$\mathcal{E}_{выр.}$ МВт·ч	$k_{иум}$	$\mathcal{E}_{выр.}$ МВт·ч
$Z_0 = const$	0.189	2978.659	0.190	2999.530	$Z_0 = const$	0.246	3884.059	0.248	3911.034
$Z_0(t)$	0.189	2978.390	0.190	2999.413	$Z_0(t)$	0.246	3883.766	0.248	3911.408
$Z_0 = 0.4$ (табл.)	0.189	2977.761	0.190	2999.026	$Z_0 = 0.4$ (табл.)	0.246	3883.103	0.248	3910.979

Анализ результатов расчета (табл. 3) показал, что наибольшее влияние на расчёт аэродинамических потерь оказывают учёт фактической плотности воздуха (влияние до $\pm 18\%$) и способ задания коэффициента тяги (влияние до $\pm 16\%$). Влияние выбора модели спутной струи и характеристик шероховатости не превышает $\pm 1\%$ и может рассматриваться как второстепенное. Расчёт с использованием характеристики $C_t(V)$, полученной численно с использованием программы WTCurves, обеспечивает реалистичное снижение $\approx 25\%$, что хорошо согласуется с типовыми значениями, наблюдаемыми на действующих ВЭС.

Таким образом, чувствительность модели аэродинамического затенения наиболее высока к параметрам, отражающим физическую динамику воздушного потока, тогда как геометрические и эмпирические параметры вносят ограниченный вклад.

Оценка чувствительности расчетов аэродинамических потерь на экономические показатели ВЭС должна учитываться наряду с обычными инвестиционными показателями. В каче-

стве экономических показателей были приняты следующие: чистый дисконтированный доход (ЧДД, *Net Present Value, NPV*); внутренняя норма доходности (ВНД, *Internal Rate of Return, IRR*); индекс доходности (ИД, *Profitability Index, PI*); дисконтированный срок окупаемости (ДКО, *Discounted Payback Period, DPP*).

Методика расчета экономических показателей реализована в программе на Matlab R 2014b, которая использует входные данные, приведенные в табл. 4, где значения указаны для рассматриваемого примера Усть-Камчатской ВЭС. Удельные стоимостные показатели ВЭУ Komai KWT-300 переводились из евро в российские рубли по среднему курсу на 2015 год, когда ВЭС была введена в эксплуатацию (1 евро = 68 рублей).

Таблица 4. Исходные данные для расчета показателей экономической эффективности рассматриваемой Усть-Камчатской ВЭС

Table 4. Initial data for economic efficiency calculations of considered Ust'-Kamchatsky wind farm

Показатель	Значение
Тариф на продажу электроэнергии, руб./кВт·ч	15.00
Ставка дисконтирования	0.12
<i>CAPEX ВЭУ:</i>	
Удельная стоимость ВЭУ, руб./кВт	174 420.00
Удельная стоимость строительно-монтажных работ по ВЭС, руб./кВт	72 916.40
Удельная стоимость доставки ВЭУ, руб./кВт	41 310.00
Суммарная величина капитальных затрат для одной ВЭУ, млн руб.	86.59
Суммарная величина капитальных затрат для ВЭС, млн руб.	259.78
НДС, млн руб.	51.96
Суммарная величина капитальных затрат для ВЭС с НДС, млн руб.	311.74
<i>OPEX ВЭУ:</i>	
Стоимость годового обслуживания одной ВЭУ, млн руб./год	1.56
Суммарная величина эксплуатационных затрат ВЭС, млн руб./год	4.69
Срок эксплуатации, лет	20
$i_{\text{тариф}_1}$ и $i_{\text{тариф}_2}$, доля/год	0.017 и 0.117
$i_{\text{ОРЕХ}}$, доля/год	0.197
$Y_{\text{фаз}_1}$, лет	6

Показатели выработки электроэнергии, приведенной к одному году, для каждого варианта расчета аэродинамического затенения принимаются из табл. 3. Для базового варианта, не учитывающего аэродинамическое затенение и климатические факторы, величины показателей энергетической эффективности ВЭС составляют: NPV – 320.097 млн руб.; IRR – 27.326 %; PI – 2.232; DPP – 5.628 лет. Результаты расчетов показателей экономической эффективности для рассматриваемых вариантов приведены в табл. 5.

Результаты расчётов относительно базового варианта показали, что учет аэродинамического затенения и корректировка мощностной характеристики ВЭУ оказывают заметное вли-

Таблица 5. Величины показателей экономической эффективности ВЭС для рассматриваемых вариантов

Table 5. Wind farm's economic efficiency values for considered variants

$C_t = 0.75$	Без корректировки $N(V)$				$C_t(V)$	Без корректировки $N(V)$			
Модели спутной струи	N.O. Jensen-I. Katić		G.C. Larsen		Модели спутной струи	N.O. Jensen-I. Katić		G.C. Larsen	
$Z_0 = const$	NPV , млн руб.	32.976	NPV , млн руб.	35.682	$Z_0 = const$	NPV , млн руб.	165.762	NPV , млн руб.	168.902
	IRR , %	14.101	IRR , %	14.262		IRR , %	20.875	IRR , %	21.017
	PI , о.е.	1.127	PI , о.е.	1.137		PI , о.е.	1.638	PI , о.е.	1.650
	DPP , лет	14.483	DPP , лет	14.242		DPP , лет	8.417	DPP , лет	8.336
$Z_0(t)$	NPV , млн руб.	32.946	NPV , млн руб.	35.665	$Z_0(t)$	NPV , млн руб.	165.730	NPV , млн руб.	168.943
	IRR , %	14.099	IRR , %	14.261		IRR , %	20.874	IRR , %	21.019
	PI , о.е.	1.127	PI , о.е.	1.137		PI , о.е.	1.638	PI , о.е.	1.650
	DPP , лет	14.486	DPP , лет	14.243		DPP , лет	8.418	DPP , лет	8.335
$Z_0 = 0.4$ (табл.)	NPV , млн руб.	32.871	NPV , млн руб.	35.628	$Z_0 = 0.4$ (табл.)	NPV , млн руб.	165.661	NPV , млн руб.	168.895
	IRR , %	14.094	IRR , %	14.259		IRR , %	20.871	IRR , %	21.016
	PI , о.е.	1.127	PI , о.е.	1.137		PI , о.е.	1.638	PI , о.е.	1.650
	DPP , лет	14.492	DPP , лет	14.246		DPP , лет	8.419	DPP , лет	8.336
$C_t = 0.75$	С корректировкой $N(V)$				$C_t(V)$	С корректировкой $N(V)$			
Модели спутной струи	N.O. Jensen-I. Katić		G.C. Larsen		Модели спутной струи	N.O. Jensen-I. Katić		G.C. Larsen	
$Z_0 = const$	NPV , млн руб.	146.489	NPV , млн руб.	150.200	$Z_0 = const$	NPV , млн руб.	307.465	NPV , млн руб.	312.261
	IRR , %	19.994	IRR , %	20.165		IRR , %	26.827	IRR , %	27.017
	PI , о.е.	1.564	PI , о.е.	1.578		PI , о.е.	2.184	PI , о.е.	2.202
	DPP , лет	8.942	DPP , лет	8.836		DPP , лет	5.793	DPP , лет	5.730
$Z_0(t)$	NPV , млн руб.	146.441	NPV , млн руб.	150.179	$Z_0(t)$	NPV , млн руб.	307.413	NPV , млн руб.	312.328
	IRR , %	19.991	IRR , %	20.164		IRR , %	26.825	IRR , %	27.020
	PI , о.е.	1.564	PI , о.е.	1.578		PI , о.е.	2.183	PI , о.е.	2.202
	DPP , лет	8.943	DPP , лет	8.837		DPP , лет	5.794	DPP , лет	5.729
$Z_0 = 0.4$ (табл.)	NPV , млн руб.	146.330	NPV , млн руб.	150.110	$Z_0 = 0.4$ (табл.)	NPV , млн руб.	307.295	NPV , млн руб.	312.252
	IRR , %	19.986	IRR , %	20.161		IRR , %	26.820	IRR , %	27.017
	PI , о.е.	1.563	PI , о.е.	1.578		PI , о.е.	2.183	PI , о.е.	2.202
	DPP , лет	8.946	DPP , лет	8.839		DPP , лет	5.795	DPP , лет	5.730

яние на все ключевые показатели экономической эффективности. Так, в зависимости от выбранной модели спутной струи и параметров аэродинамического расчёта величина чистого дисконтированного дохода (NPV) уменьшается на 15–25 %, внутренняя норма доходности (IRR) снижается до 19–26 %, а дисконтированный срок окупаемости (DPP) увеличивается в среднем на 2–3 года. Наибольшее влияние на экономические результаты оказывает корректировка мощности по плотности воздуха и способ задания коэффициента тяги (C_t). Таким образом, аэродинамическое затенение следует рассматривать как значимый физический фактор, непосредственно влияющий на достоверность расчёта выработки электроэнергии и, следовательно, на инвестиционные показатели ВЭС.

Заключение

1. В статье подробно рассмотрена разработанная и реализованная авторами автоматизированная методика расчёта аэродинамического затенения ВЭС на основе моделей Н.О. Йенсена – И. Катича и Г.К. Ларсена, учитывающая влияние коэффициента тяги, шероховатости подстилающей поверхности и корректировки мощностной характеристики ВЭУ в зависимости от фактической плотности воздуха.

2. Разработанная методика моделирования характеристики шероховатости подстилающей поверхности $Z_0(t)$ на базе фактических измерений скорости ветра и интенсивности турбулентности на ВИК отражает сезонные и метеорологические изменения и показывает высокую точность при верификации по значениям фактических измерений высоты снежного покрова sss , см, особенно при более высоких периодах осреднения.

3. Установлено, что наибольшее влияние на потери выработки электроэнергии ВЭС оказывают фактическая плотность воздуха (до ± 18 %) и способ задания коэффициента тяги (до ± 16 %), тогда как выбор модели спутной струи и параметров шероховатости подстилающей поверхности оказывает влияние менее 1 %.

4. Учёт аэродинамического затенения в экономических расчётах снижает значения NPV на 15–25 %, увеличивает срок окупаемости до 8–9 лет и уменьшает IRR до 19–26 %, что подчёркивает необходимость его включения в инженерно-экономическое моделирование ветроэнергетических проектов.

Список литературы / References

- [1] Jensen N. O. A note on wind generator interaction, *Risø National Laboratory*, Report Risø-M No. 2411, Denmark, 1983.
- [2] Ainslie J. F. Calculating the flowfield in the wake of wind turbines, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1988, 27, 213–224.
- [3] Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. *Wind Energy Handbook*, 2nd ed., Wiley, Chichester (UK), 2011.
- [4] Archer C. L., Vassel-Be-Hagh A., Yan C., Wu S., Pan Y., Brodie J. F., Maguire A. E. Review and evaluation of wake loss models for wind energy applications, *Appl. Energy*, 2018, 226, 1187–1207.
- [5] Sørensen J. N., Shen W. Z. Numerical modeling of wind turbine wakes, *J. Fluids Eng.*, 2002, 124(2), 393–399.

- [6] Stevens R.J.A.M., Gayme D.F., Meneveau C. Generalized coupled wake boundary layer model: applications and comparisons with field and LES data for two real wind farms, *Wind Energy*, 2016, 19(11), 2023–2040.
- [7] Churchfield M.J., Lee S., Moriarty P.J., Martínez L.A., Leonardi S., Vijayakumar G., Brasseur J.G. A large-eddy simulation of wind-plant aerodynamics, *Conf. Paper*, NREL/CP-5000–53554, 2012.
- [8] Porté-Agel F., Wu Y.T., Chen C.H. A numerical study of the effects of wind direction on turbine wakes and power losses in a large wind farm, *Energies*, 2013, 6(10), 5297–5313.
- [9] González-Longatt F., Wall P., Terzija V. Wake effect in wind farm performance: steady-state and dynamic behavior, *Renew. Energy*, 2012, 39(1), 329–338.
- [10] Katić I., Højstrup J., Jensen N.O. A Simple Model for Cluster Efficiency, *Proc. EWEA Conf. and Exhib.*, 7–9 Oct 1986, Rome (Italy), 407–410.
- [11] Larsen G.C., Højstrup J., Aagaard H.M. Wind fields in wakes, *Proc. 1996 EU Wind Energy Conf.*, Göteborg (Sweden), 1996, 764–768.
- [12] Keane A. Advancement of an analytical double-Gaussian full wind turbine wake model, *Renew. Energy*, 2021, 171, 687–708.
- [13] Göçmen T., Laan P., Réthoré P.E., Diaz A.P., Larsen G.C., Ott S. Wind turbine wake models developed at the Technical University of Denmark: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, 60, 752–769.
- [14] Vermeer L.J., Sørensen J.N., Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics, *Prog. Aerospace Sci.*, 2003, 39(6–7), 467–510.
- [15] Расчет площади пересечения окружностей [Электронный ресурс]. URL: <https://abakbot.ru/online-2/73-ploshhad-peresecheniya-okruzhnostej> (дата обращения: 10.10.2025). [Calculation of circle intersection area [Electronic resource]. Access: <https://abakbot.ru/online-2/73-ploshhad-peresecheniya-okruzhnostej> (in Russian)]
- [16] Корнев Д.А. Сравнение методик расчета аэродинамического затенения ветроэлектрических установок на площадке ветроэлектрической станции, *Вестник МЭИ*, 2024, 6, 48–54 [Kornev D.A. Comparison of methods for calculating aerodynamic wake effects of wind turbines at wind farm sites, *Vestnik MPEI*, 2024, 6, 48–54 (in Russian)]
- [17] Deriugina G., Ignatev E., Kornev D. Wind Turbines Wake Models Comparison, *Proc. 2024 Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi (Russia), IEEE, 2024, 271–276.
- [18] Thøgersen M.L., Ahsbahs T., Pedersen M.C., Sørensen T., Nielsen P., Grötzner A., Chun S. *Introduction to Wind Turbine Wake Modelling and Wake Generated Turbulence*, EMD International A/S, Aalborg (Denmark), 2023.
- [19] Корнев Д.А., Игнатьев Е.В., Дерюгина Г.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета характеристик ВЭУ «WTCurves»». № 2025680893, 08.08.2025. [Kornev D.A., Ignatev E.V., Deriugina G.V. Certificate of State Registration of Computer Program “WTCurves”, No. 2025680893, 08.08.2025 (in Russian)]
- [20] *Climate-data.org* [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.climate-data.org> (дата обращения: 10.10.2025). [Climate-data.org [Electronic resource]. Access: <http://ru.climate-data.org> (in Russian)]

- [21] Holmes J. D. *Wind Loading of Structures*, 3rd ed., CRC Press, 2015.
- [22] Wegley H. L., Ramsdell J. V., Orgill M. M., Dreake R. L. *Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems*, Battelle, US DOE, 1980.
- [23] Российский метеорологический сайт «Расписание погоды» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rp5.ru> (дата обращения: 10.10.2025). [Russian meteorological site “*Reliable Prognosis*” [Electronic resource]. Access: <http://www.rp5.ru> (in Russian)]

Energy Systems and Complexes
Энергетические системы и комплексы

EDN: QJXYQN

УДК 621.311

Method for Estimating the Service Life of Storage Batteries
in Integrated Energy Systems with Renewable Generation

Dmitriy N. Karamov^{a,*},
Ekaterina V. Serdyukova^{a,b} and Konstantin V. Suslov^c

^a*Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russian Federation*

^b*Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the RAS
Irkutsk, Russian Federation*

^c*Moscow Power Engineering Institute
Moscow, Russian Federation*

Received 28.10.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 22.04.2026

Abstract. This article addresses a key issue in the design and operation of autonomous renewable energy systems: accurately predicting the service life of batteries, which account for a significant share (45–60 %) of total capital investment. Existing methods for assessing battery service life often oversimplify real-world operating conditions, specifically by assuming a predominance of partial charge-discharge cycles over full ones, leading to inaccurate technical and economic assessments. The study analyzes well-known models, such as the RainFlow calculation method and the Schiffer model, highlighting their limitations. A comprehensive service life assessment methodology is proposed that takes into account actual battery operating modes, characterized by an alternating function of the system's power. The methodology is based on the identification and modeling of partial cycles, determination of the average annual number of cycles, and the local minimum state of charge. The algorithm relates these parameters to the battery service life characteristic depending on the depth of discharge. The presented approach enables a more realistic, albeit pessimistic, assessment of battery life, which facilitates the optimization of system configuration and operating modes to minimize lifecycle costs. The method is universal and can be applied to various battery technologies, making it a valuable tool for planning and developing off-grid power systems.

Keywords: off-grid power systems, integrated power systems, renewable energy, partial cycles, depth of discharge, alternating power function, life-cycle assessment model.

Citation: Karamov D. N., Serdyukova E. V., Suslov K. V. Method for Estimating the Service Life of Storage Batteries in Integrated Energy Systems with Renewable Generation. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 467–475. EDN: QJXYQN



© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: dmitriy.karamov@mail.ru

Методика оценки срока службы аккумуляторных батарей в интегрированных энергетических системах с возобновляемой генерацией

Д. Н. Карамов^а, Е. В. Сердюкова^{а, б}, К. В. Суслов^в

^а*Иркутский национальный исследовательский
технический университет*

Российская Федерация, Иркутск

^б*Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева
Российская Федерация, Иркутск*

^в*Московский энергетический институт
Российская Федерация, Москва*

Аннотация. Статья посвящена решению важной задачи при проектировании и эксплуатации интегрированных энергосистем с возобновляемыми источниками – точному прогнозированию срока службы аккумуляторных батарей, которые составляют значительную долю (45–60 %) от общих капиталовложений. Существующие методы оценки срока службы батарей часто упрощают реальные условия эксплуатации, в частности преобладание частичных циклов заряда-разряда над полными, что приводит к некорректным технико-экономическим оценкам. В исследовании анализируются известные модели, такие как метод подсчета RainFlow и модель Шиффера, с выделением их ограничений. Предлагается комплексная методика оценки срока службы, учитывающая фактические режимы работы батареи, характеризуемые знакопеременной функцией мощности системы. Основу методики составляют идентификация и моделирование частичных циклов, определение среднегодового количества циклов и локально-минимального состояния заряда. Алгоритм связывает эти параметры с характеристикой срока службы батареи в зависимости от глубины разряда. Представленный подход позволяет провести более реалистичную, хотя и пессимистичную оценку срока службы батарей, что способствует оптимизации конфигурации системы и режимов работы для минимизации затрат на протяжении жизненного цикла. Метод является универсальным и может быть применен для различных технологий аккумуляторных батарей, что делает его ценным инструментом для планирования и развития интегрированных энергокомплексов.

Ключевые слова: автономные энергосистемы, интегрированные энергосистемы, возобновляемая энергетика, частичные циклы, глубина разряда, знакопеременная функция мощности, модель оценки срока службы.

Цитирование: Карамов Д. Н. Методика оценки срока службы аккумуляторных батарей в интегрированных энергетических системах с возобновляемой генерацией / Д. Н. Карамов, Е. В. Сердюкова, К. В. Суслов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 467–475. EDN: QJXYQN

Введение

Переход к децентрализованному и устойчивому энергоснабжению обуславливает развитие автономных и интегрированных энергетических систем (ИЭС) на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в первую очередь солнечной и ветровой. Под интегрированными системами подразумеваются комплексы, объединяющие разнородные источники генерации, нагрузки и системы накопления энергии в единый, управляемый комплекс, способный функционировать как в автономном режиме, так и в составе более крупной энергосети. Ключевым

компонентом, обеспечивающим устойчивость и управляемость таких систем, является система накопления энергии, чаще всего на основе электрохимических аккумуляторных батарей (АБ). Доля затрат на АБ в общих капиталовложениях в ИЭС может достигать 45–60 % [1], что делает точное прогнозирование их срока службы и количества замен за время жизненного цикла проекта критически важным экономическим фактором, что особенно актуально для сложных ИЭС [7, 9]. Некорректная оценка срока службы приводит к ошибочному планированию развития системы, росту затрат и снижению надежности.

Специфика работы аккумуляторных батарей в интегрированных системах с ВИЭ заключается в сложном, нерегулярном характере их заряда и разряда, обусловленном стохастической природой первичных источников энергии и переменностью нагрузки. Это приводит к преобладанию частичных циклов над полными, что и должно быть учтено в адекватной модели оценки их ресурса.

Анализ публикаций по теме исследования

Проблеме прогнозирования срока службы АБ посвящены многочисленные исследования. Известны подходы, основанные на определении среднегодового числа полных циклов заряд-разряд [2] и методе подсчета циклов *RainFlow*, классифицирующем циклы по их глубине разряда (ГР) [3]. Однако эти модели зачастую упрощают реальные условия эксплуатации АБ в системах на основе ВИЭ. Более сложная и комплексная модель, учитывающая в большей степени широкий диапазон эксплуатационных параметров, влияющих на износ батареи, была предложена Шиффером [4]. Исследование [4] указывает, что модели [2, 3] склонны существенно завышать срок службы АБ, что негативно сказывается на точности технико-экономических расчетов для всего энергокомплекса.

Специфической особенностью работы АБ в ИЭС с ВИЭ является нерегулярный характер генерации, приводящий к частому чередованию процессов заряда и разряда различной глубины. Это делает понятие «полного цикла» малоприменимым. Вместо этого АБ подвергается многочисленным «частичным циклам» – неполным процессам заряда и разряда в пределах располагаемой емкости. Влияние этих частичных циклов на деградацию АБ отличается от влияния полных циклов и должно учитываться в моделях срока службы.

Целью данной статьи является разработка универсальной методики оценки срока службы аккумуляторных батарей в ИЭС с ВИЭ, которая:

1. Учитывает фактический режим работы АБ, характеризуемый знакопеременной функцией мощности системы.
2. Формально описывает и идентифицирует частичные циклы заряда-разряда.
3. Связывает параметры частичных циклов (глубину, количество) с характеристиками срока службы АБ, предоставляемыми производителем.
4. Предоставляет практический алгоритм расчета срока службы, пригодный для использования в задачах оптимизации системы.

В отличие от идеализированных лабораторных условий, состояние заряда (SOC) АБ в ИЭС изменяется (рис. 1). Полный цикл (разряд до рекомендуемой ГР с последующим полным зарядом) встречается редко.

Частичным циклом называется неполный процесс заряда/разряда АБ в диапазоне ее располагаемой емкости. Задача идентификации частичного цикла основана на знакопеременной

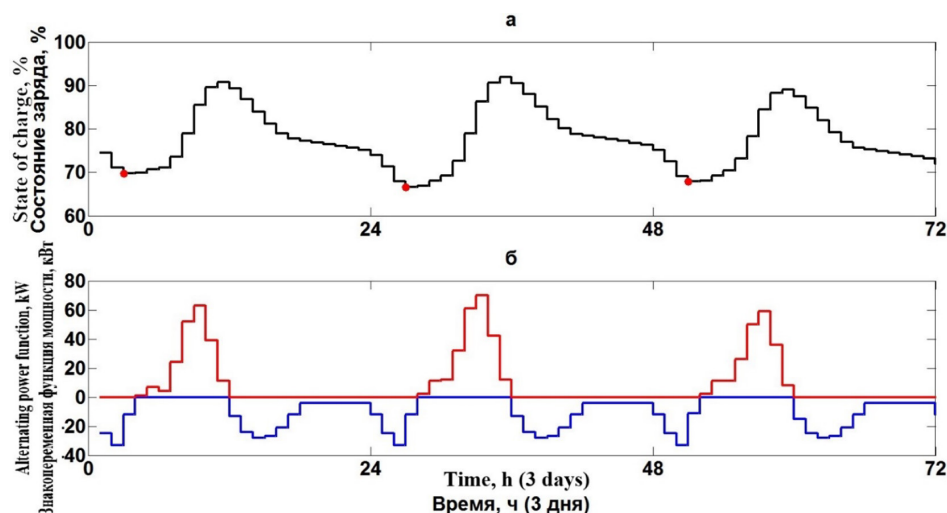


Рис. 1. Изменение состояния заряда батареи, % (а); функция переменной мощности, кВт (б). Цвета: заряд (красный), разряд (синий)

Fig. 1. Battery charge status change, % (a); variable power function, kW (b). Colors: charge (red), discharge (blue)

функции мощности системы $P(t)$ и текущем SOC. Цикл начинается, когда АБ после фазы разряда $P(t) < 0$ переходит к фазе заряда $P(t) > 0$, и заканчивается, когда процесс разряда начинается вновь после завершения фазы заряда (необязательно до 100 % SOC). Алгоритм идентификации частичных циклов и их продолжительности, основанный на логических условиях, анализирующих последовательность знака $P(t)$ и уровня SOC, представлен в виде блок-схемы (рис. 2).

В случае если структура интегрированного энергетического комплекса включает в себя дополнительные источники, например ветроэнергетические установки, то алгоритм моделирования остается прежним.

Современные исследования в области управления ИЭС [8] и оптимизации их структуры [6, 9] подтверждают необходимость учета деградации ключевых компонентов, таких как АБ, для повышения экономической эффективности проектов. В частности, в работе [7] подчеркивается критическая роль моделей срока службы АБ при выборе между централизованным и распределенным накоплением энергии.

Методика расчета срока службы аккумуляторных батарей

Предлагаемая методика является «пессимистичной» оценкой, рассматривающей наихудший сценарий деградации АБ, что обеспечивает запас прочности при планировании, аналогично подходам, используемым в задачах оптимального планирования ИЭС [6]. Она состоит из нескольких последовательных шагов.

Данный алгоритм может быть интегрирован в современные системы управления на основе глубокого обучения с подкреплением [8], где точная оценка состояния заряда батареи является ключевым параметром.

Основываясь на том, что в фотоэлектрических системах циклы заряд/разряд могут сменять друг друга, использование характеристики предельного количества циклов до замены

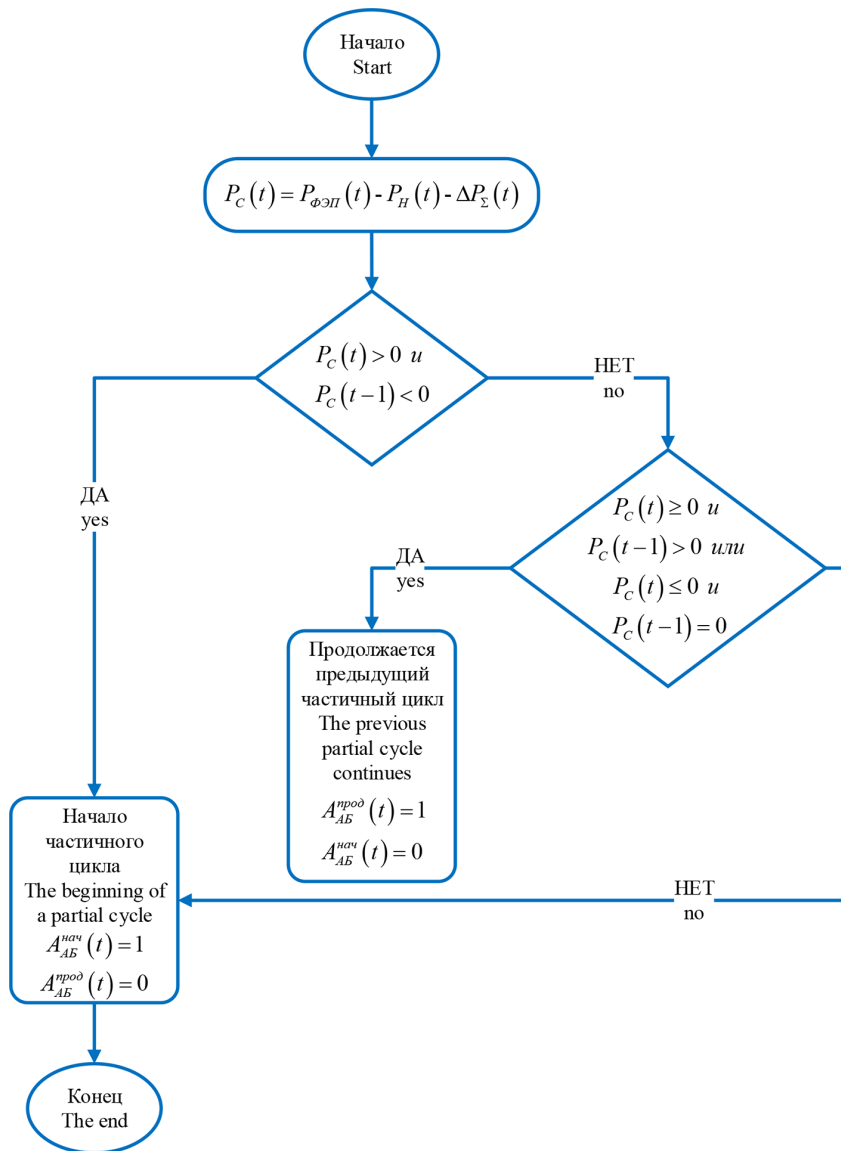


Рис. 2. Блок-схема расчета частичных циклов

Fig. 2. Block Diagram for Calculating Partial Cycles

должно учитывать промежуточные состояния заряда аккумуляторной батареи в зависимости частичного неполного цикла. При этом нижняя граница каждого частичного цикла имеет значение состояния заряда аккумуляторной батареи, при котором произошла смена знака функции мощности системы.

Для этого вводится понятие локально-минимального состояния заряда аккумуляторной батареи. Локально-минимальное значение соответствует наименьшему уровню заряда аккумуляторной батареи для каждого частичного цикла. Учитывая, что частичный цикл – это малая составляющая всей характеристики состояния заряда аккумуляторной батареи, его наименьшее значение является локальным.

Шаг 1. Определение локально-минимального состояния заряда. Для каждого идентифицированного частичного цикла i определяется локально-минимальное значение состояния заряда аккумуляторной батареи. Его можно определить в зависимости от продолжительности частичного цикла и глубины разряда. Среднегодовое локально-минимальное значение состояния заряда аккумуляторных батарей определяется следующим образом:

$$SOC_{AB}^{LM} = SOC_{AB}^{чл, \Sigma} / A_{AB}^{чл, \Sigma}, \quad (1)$$

где $SOC_{AB}^{чл, \Sigma}$ – является средним значением состояния заряда аккумуляторных батарей для каждого частичного цикла и определяется по следующей формуле:

$$SOC_{AB}^{чл, \Sigma} = \sum_{t=1}^T SOC_{AB}^{чл}(t), \quad (2)$$

где $SOC_{AB}^{чл}(t)$ – нижняя граница состояния заряда аккумуляторных батарей находится по следующему логическому условию:

$$SOC_{AB}^{чл}(t) = \begin{cases} SOC_{AB}(t); & A_{AB}^{нач}(t) = 1 \\ 0, & A_{AB}^{нач}(t) = 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Итоговое количество частичных циклов в данном случае равно:

$$A_{AB}^{чл, \Sigma} = \sum_{t=1}^T A_{AB}^{нач}(t). \quad (4)$$

Использование среднегодового значения локально-минимального состояния заряда аккумуляторной батареи является оценкой наихудшего случая, которая также называется оценкой снизу (пессимистичной оценкой).

Шаг 2. Определение предельного количества циклов до замены. Определяется путем сравнения полученного среднегодового значения локально-минимального состояния заряда аккумуляторной батареи с характеристикой срока службы в зависимости от рассматриваемой технологии аккумуляторных батарей и глубины разряда. На рис. 3 показаны типовые характеристики срока службы аккумуляторных батарей в зависимости от глубины разряда.

На *первом* этапе определяется область, на которой будут сформированы характеристики, необходимые для дальнейшего моделирования аккумуляторных батарей. Данная область описывается линейной характеристикой глубины разряда (DOD_{AB}).

На *втором* этапе записываются численные значения количества циклов заряд/разряд ($n_{AB}^{ч, \partial 3}$) в зависимости от глубины разряда с дискретным шагом, равным 10 %.

На *третьем* этапе, используя линейную интерполяцию, определяются численные значения функции, которая имеет вид вектор-столба.

$$n_{ABi}^{ч, \partial 3}(DOD_{AB}) = n_{AB}^{ч, \partial 3}(DOD_{ABi}) + \frac{n_{AB}^{ч, \partial 3}(DOD_{ABi+1}) - n_{AB}^{ч, \partial 3}(DOD_{ABi})}{DOD_{ABi+1} - DOD_{ABi}} \cdot (DOD_{AB} - DOD_{ABi}) \quad (5)$$

Далее, используя полученную характеристику, можно определить фактическое значение предельного количества циклов заряд/разряд до замены в зависимости от глубины разряда. Этот этап выполняется путем сравнения полученного результата среднегодового локально-

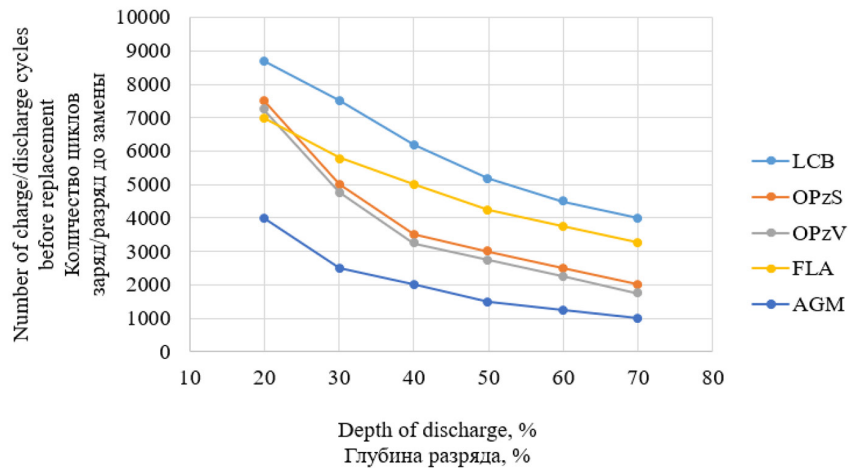


Рис. 3. Срок службы в зависимости от глубины разряда для различных типов аккумуляторных батарей (FLA – залитая свинцово-кислотная; LCB – свинцово-карбоновая; OPzS – залитая свинцово-кислотная с цилиндрическими пластинами; OPzV – гелеобразная свинцово-кислотная с цилиндрическими пластинами; AGM – свинцово-кислотная с абсорбированным электролитом)

Fig. 3. Service life depending on the depth of discharge for different types of batteries (FLA – filled lead-acid; LCB – lead-acid -carbon fiber; OPzS – filled lead-acid with cylindrical plates; OPzV – gel-like lead-acid with cylindrical plates; AGM – lead-acid with absorbed electrolyte)

минимального значения состояния заряда SOC_{AB}^{LM} и характеристики $n_{ABi}^{u_{\partial 3}}$. Таким образом, связь между предельным количеством циклов до замены и локально-минимального состояния заряда аккумуляторных батарей описывается зависимостью.

$$n_{ABi}^{u_{\partial 3}} = f(SOC_{AB}^{LM}). \quad (6)$$

В данном случае можно выявить следующую закономерность: чем выше суммарная установленная ёмкость аккумуляторных батарей, тем выше среднегодовое значение локального минимального состояния заряда, что, естественно, увеличивает число циклов до замены.

Шаг 3. Определение среднегодового количества циклов. Помимо среднегодового локально-минимального состояния заряда батарей и предельного числа циклов до замены необходимо определить среднегодовое число циклов заряд/разряд. Для этого нужно рассчитать количество энергии, *проходящей* через аккумуляторную батарею за рассматриваемый период времени. Далее полученное значение необходимо разделить на произведение средних значений следующих параметров: КПД аккумуляторных батарей и глубины разряда в зависимости от среднего значения состояния заряда аккумуляторных батарей при различных частичных циклах. Это дает возможность рассмотреть все частичные циклы за рассматриваемый период и привести их к общему значению.

$$n_{AB}^{u_{\Sigma}} = \frac{[\sum_{t=1}^T P_{AB}^{+}(t) + (\sum_{t=1}^T P_{AB}^{-}(t) \cdot (-1))]/C_{AB}^{max}}{[1 + (1/\eta_{AB}^{cp})] \cdot [1 - (SOC_{AB}^{LM}/100)]}, \quad (7)$$

где η_{AB}^{cp} является средним значением КПД системы аккумулирования энергии за расчетный период времени, о.е.; C_{AB}^{max} – суммарная установленная ёмкость аккумуляторных батарей, кВт·ч.

Имеется следующая закономерность: чем выше суммарная установленная ёмкость аккумуляторных батарей, тем меньше среднегодовое количество циклов заряд/разряд.

Шаг 4. Итоговый расчет срока службы. Для определения срока службы аккумуляторных батарей необходимо предельное количество циклов до замены, зависящих от среднегодового значения локально-минимального состояния заряда, разделить на среднегодовое число циклов заряд/разряд.

$$T_{AB} = n_{ABi}^{u_{\partial z}} / n_{AB}^{u_{\Sigma}}. \quad (8)$$

Полный алгоритм расчета срока службы обобщен в блок-схеме (рис. 4).

Представленная методика обеспечивает более адекватную оценку срока службы АБ по сравнению с моделями, основанными исключительно на полных циклах. Учитывая частичные циклы и связывая их с характеристикой срока службы АБ через локально-минимальный SOC, она позволяет точнее учесть процесс деградации.

Данная модель универсальна и может быть применена для различных технологий АБ (свинцово-кислотные, литий-ионные и др.) путем использования соответствующей характеристики $N_{lim}(DOD)$. Кроме того, она служит основой для решения оптимизационных задач, таких как определение оптимальной установленной емкости АБ и фотоэлектрических модулей, выбор оптимальной глубины разряда и управление режимами системы для максимизации срока службы АБ.

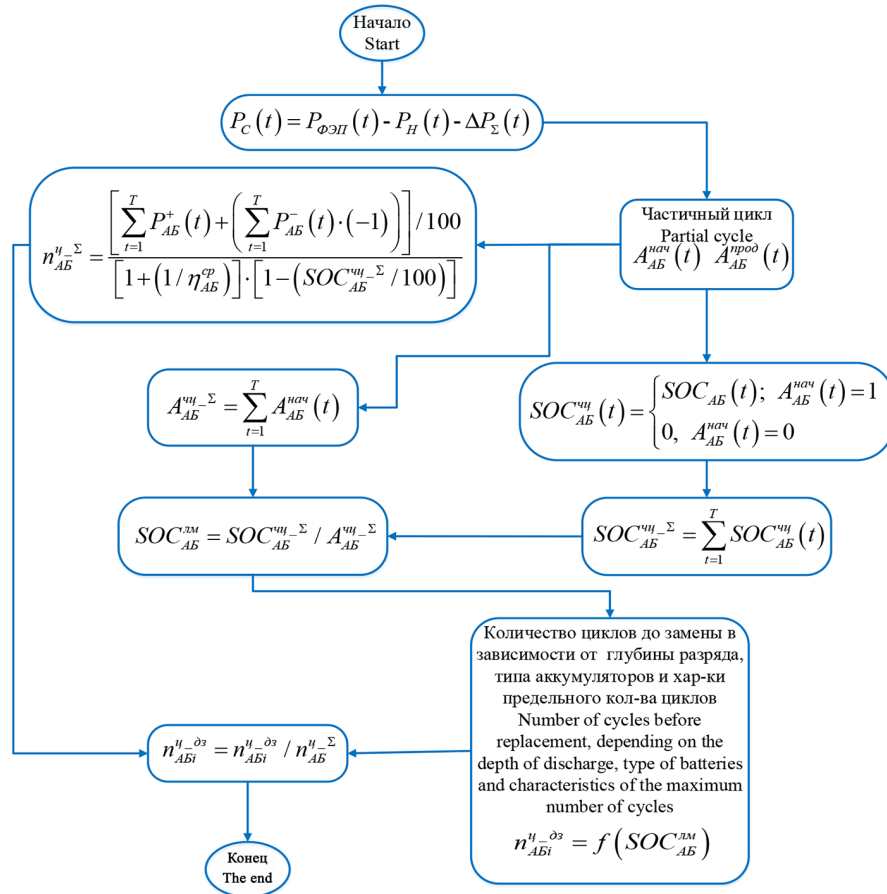


Рис. 4. Блок-схема, описывающая алгоритм расчета срока службы аккумуляторных батарей

Fig. 4. Block Diagram Describing the Battery Service Life Calculation Algorithm

Выводы

1. Разработана методика оценки срока службы аккумуляторных батарей в автономных и интегрированных энергетических системах с возобновляемой генерацией, учитывающая специфику их эксплуатации, характеризующую частичными циклами заряда-разряда.
2. Ключевым элементом методики является формализация и идентификация частичных циклов на основе анализа знакопеременной функции мощности системы и состояния заряда АБ.
3. Алгоритм связывает параметры частичных циклов (среднегодовое количество и локально-минимальное состояние заряда) с характеристикой срока службы АБ от производителя, что позволяет рассчитать ожидаемый срок службы.
4. Разработанная методика является универсальным инструментом, применимым не только для изолированных систем, но и для сложных интегрированных энергокомплексов. Ее использование позволяет оптимизировать режимы совместной работы разнородных источников генерации и накопления энергии [6, 9], минимизируя деградацию наиболее дорогостоящего компонента – аккумуляторных батарей.
5. Использование данной методики на этапе проектирования системы позволяет точнее оценить затраты жизненного цикла, оптимизировать состав оборудования и снизить финансовые риски, связанные с преждевременным выходом АБ из строя.

Список литературы / References

- [1] Zakeri B., Gisse G.C. Centralized vs. distributed energy storage – Benefits for integrated energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 183, 113489.
- [2] Bernal-Agustin J.L., Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13, 2111–2118.
- [3] Green H.J., Manwell J. HYBRID 2 – A Versatile Model of the Performance of Hybrid Power Systems, *Proceedings of WindPower'95*, 1995, Washington DC.
- [4] Schiffer J., Sauer D.U., Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Kaiser R. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems, *Journal of Power Sources*, 2007, 168, 66–78.
- [5] Dufo-López R., Lujano-Rojas J.M., Bernal-Agustín J.L. Comparison of different lead-acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems, *Applied Energy*, 2014, 115, 242–253.
- [6] Liu B. Optimal scheduling of combined cooling, heating, and power system-based microgrid coupled with carbon capture storage system, *Journal of Energy Storage*, 2023, 61, 106746.
- [7] Zakeri B., Gisse G.C., Subkhankulova D., Aghaie P.V., Dodds P.E. Centralized vs. distributed energy storage—Benefits for residential users, *Energy*, 2021, 236, 121443.
- [8] Tang X., Chen J., Qin Y., Liu T., Yang K., Khajepour, A., Li, S. Reinforcement learning-based energy management for hybrid power systems: state-of-the-art survey, review, and perspectives, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 73 (1), 143.
- [9] Zhang G., Wang W., Chen Z., Li R., Niu Y. Modeling and optimal dispatch of a carbon-cycle integrated energy system for low-carbon and economic operation, *Energy*, 2022, 240, 122795.

EDN: OHYVDQ

УДК 621.31, 621.3.072

Power Control of a Synchronous Machine with a Flywheel Energy Storage

Mikhail E. Blinnikov* and Vasily I. Panteleev
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 24.12.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 11.04.2026

Abstract. The paper proposes a control system for the active and reactive power of a synchronous machine with a flywheel energy storage. The active power control system takes into account the reserve of kinetic energy of the flywheel rotation, has no feedback, does not depend on the design of the synchronous machine, but requires precise consideration of the flywheel parameters and the characteristics of power losses in the storage complex. The reactive power control system is based on a mathematical model of a non-salient-pole unsaturated synchronous machine, has no feedback, but takes into account the parameters of the synchronous machine. The obtained control system was tested on a simulation model of a salient-pole synchronous machine in the SimInTech environment. The maximum error in setting the watt current was 2.18 %, the maximum error in setting the wattless current was 38 %, and the maximum angular error was 12°. The proposed active power control system can be used to control both standard salient-pole and non-salient-pole machines, as well as machines with permanent magnets. To improve the accuracy of reactive power regulation, it is possible to use a feedback-control system with feedback.

Keywords: flywheel energy storage, reversible energy converter, control system, synchronous machine, simulation modeling, SimInTech model.

Citation: Blinnikov M. E., Panteleev V. I. Power Control of a Synchronous Machine with a Flywheel Energy Storage. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 476–488. EDN: OHYVDQ



Управление мощностью синхронной машины с маховичным накопителем энергии

М. Е. Блинников, В. И. Пантелеев
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В работе предложена система управления активной и реактивной мощностью синхронной машины с маховичным накопителем энергии. Система управления активной мощностью учитывает запас кинетической энергии вращения маховика, не имеет обратной связи, не зависит от конструкции синхронной машины, но требует точного учёта параметров маховика и характеристик потерь мощности в накопительном комплексе. Система управления реактивной мощностью основана на математической модели неявнополусной ненасыщенной синхронной машины, не имеет обратной связи, но учитывает параметры синхронной машины. Полученная система управления проверена на имитационной модели явнополусной синхронной машины в среде SimInTech. Наибольшая погрешность при задании активной составляющей тока – 2,18 %, наибольшая погрешность при задании реактивной составляющей тока – 38 %, наибольшая угловая погрешность 12°. Предложенная система управления активной мощностью может быть использована для управления как серийными явнополусными и неявнополусными машинами, так и машинами с постоянными магнитами. Для повышения точности регулирования реактивной мощности возможно применение замкнутой системы управления с обратной связью.

Ключевые слова: маховичный накопитель энергии, обратимый преобразователь энергии, система управления, синхронная машина, имитационное моделирование, SimInTech-модель.

Цитирование: Блинников М. Е. Управление мощностью синхронной машины с маховичным накопителем энергии / М. Е. Блинников, В. И. Пантелеев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 476–488. EDN: OHYVDQ

Введение

Развитие энергетических систем связано с применением технологий накопления энергии. Применение накопителей энергии является альтернативой выделения резервов мощности на электростанциях и подстанциях [1–3]. Накопители энергии являются основой для построения современной концепции интеллектуальной сети, в которой они входят как в состав распределённой генерации на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии, так и являются самостоятельными многозадачными энергоресурсами, например, для регулирования частоты или управления спросом [4–15]. На сегодняшний день с точки зрения разработанности решений, простоты и опыта применения в строительстве и эксплуатации электрохимические накопители лучше остальных подходят для распределённой энергетики [1, 6, 9, 16]. Однако востребован поиск альтернативных решений [15, 17].

Одним из решений может стать маховичный накопитель энергии, запасующий механическую энергию вращающихся масс [1, 2, 10, 16, 18, 19]. Преимуществами маховичных накопителей энергии являются быстроедействие, способность развивать большие мощности, длительный срок службы, широкий диапазон рабочих температур, экологичность, теоретический неограниченный предел накопления энергии [11–13, 17].

Разновидностью электротехнического комплекса с маховичным накопителем энергии является обратимый преобразователь энергии (ОПЭ), состоящий из маховичного накопителя,

синхронной машины и преобразователя частоты [20]. Основными режимами работы ОПЭ являются пусковой режим синхронной машины, заряд накопителя или разгон в двигательном режиме и разряд маховичного накопителя или торможение в генераторном режиме синхронной машины.

Данная работа посвящена управлению мощностью синхронной машины с маховичным накопителем энергии в режиме заряда и разряда без рассмотрения пускового режима работы. С помощью синхронной машины явнополусной и неявнополусной конструкции возможно регулировать не только активную, но и реактивную мощность. Регулирование реактивной мощности в контуре преобразователь частоты–синхронная машина необходимо для регулирования напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты для его нормальной работы. Регулирование реактивной мощности электротехнического комплекса в контуре преобразователь частоты–внешняя сеть осуществляется с помощью преобразователя частоты.

Целью данной работы является разработка системы управления активной и реактивной мощностью синхронной машины с маховичным накопителем энергии.

Описание математической модели

Баланс мощности в узле подключения ОПЭ при заряде накопителя, кВт:

$$P_{GS} = P_{МНЭ} + \Delta p_{ОПЭ}, \quad (1)$$

где P_{GS} – переток мощности между накопительным комплексом и внешней сетью, кВт; $P_{МНЭ}$ – мощность потребления маховичного накопителя, кВт; $\Delta p_{ОПЭ}$ – потери мощности в рассматриваемом электротехническом комплексе, кВт.

Баланс мощности в узле подключения ОПЭ при разряде накопителя, кВт:

$$-P_{GS} = -P_{МНЭ} + \Delta p_{ОПЭ}, \quad (2)$$

где $P_{МНЭ}$ – мощность генерации маховичного накопителя, кВт.

Мощность, развиваемая маховичным накопителем, для обеспечения требуемого перетока мощности с внешней сетью определяется выражением, кВт:

$$\pm P_{МНЭ} = \pm P_{GS} - \Delta p_{ОПЭ}, \quad (3)$$

где положительные значения величин принимаются для режима потребления мощности, а отрицательные значения для режима выдачи мощности во внешнюю сеть.

Потери мощности в обратимом преобразователе энергии представляют зависимость от загрузки комплекса и скорости вращения маховичного накопителя. В общем виде потери в электротехническом комплексе можно описать выражением, кВт:

$$\Delta p_{ОПЭ}(I, \omega) = \Delta p_{МНЭ}(I, \omega) + \Delta p_{СМ}(I, \omega) + \Delta p_{ПЧ}(I) + \Delta p_{СУ}, \quad (4)$$

где $\Delta p_{МНЭ}$ – потери мощности в маховичном накопителе энергии, кВт; $\Delta p_{СМ}$ – потери мощности в синхронной машине, кВт; $\Delta p_{ПЧ}$ – потери мощности в преобразователе частоты, кВт; $\Delta p_{СУ}$ – потери мощности в системе управления, кВт; I – ток нагрузки, А; ω – скорость вращения маховика, рад/с.

Маховичный накопитель энергии накапливает механическую энергию вращательного движения. Потребление мощности синхронной машиной и накопление энергии в маховичном

накопителе обусловлены разгоном ротора с маховиком. В то же время при торможении маховика синхронная машина выдаёт в сеть запасённую в маховичном накопителе энергию, разряжая его.

Наиболее простой системой управления является разомкнутая система управления без обратных связей. Для синхронной машины регулирование скорости ротора можно выполнить с помощью регулирования частоты напряжения. Регулирование реактивной мощности осуществляется регулированием напряжения возбуждения. В общем виде требуемую систему управления можно представить в виде блока или «чёрного ящика», на вход которого подаются значения активного и реактивного тока или мощности согласно заданию, а на выходе блока формируются управляющие значения частоты напряжения статора и напряжение возбуждения (рис. 1).



Рис. 1. Модель «чёрного ящика» системы управления мощностью

Fig. 1. Black box model of power control system

Изменение энергии, связанное с изменением скорости, определяется выражением, о.е.:

$$\Delta W_* = \frac{T_j}{2} (\omega_n^2 - \omega_k^2) \cdot \frac{1}{pt_6}, \quad (5)$$

где T_j – инерционная постоянная, с; ω_n – начальная скорость вращения маховика, о.е.; ω_k – конечная скорость вращения маховика, о.е.; p – количество пар полюсов синхронной машины, шт.; t_6 – базисное время, с.

Мощность, развиваемая маховичным накопителем, о.е.:

$$P_{\text{МНЭ}} = \frac{\Delta W_*}{\Delta t_*} = \frac{\Delta W_* pt_6}{\Delta t} = \frac{T_j}{2\Delta t} (\omega_n^2 - \omega_k^2), \quad (6)$$

где Δt – продолжительность изменения запаса энергии, с; Δt^* – то же, о.е.

Работа маховичного накопителя свыше номинальной скорости синхронной машины осуществляется при ослабленном поле, величина напряжения равна номинальной и не изменяется. В относительных единицах номинальное напряжение равно 1, поэтому свыше номинальной скорости активная составляющая тока равна активной мощности в относительных единицах, о.е.:

$$i_{\text{МНЭ}} = \frac{P_{\text{МНЭ}}}{u} = \frac{P_{\text{МНЭ}}}{1} = P_{\text{МНЭ}} = \frac{T_j}{2\Delta t} (\omega_n^2 - \omega_k^2), \quad (7)$$

Выразим конечную скорость, о.е.:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{2i_{\text{МНЭ}}\Delta t}{T_j} + \omega_{\text{н}}^2}, \quad (8)$$

Для обеспечения заданного активного тока i_a маховичный накопитель должен быть нагружен током, о.е.:

$$i_{\text{МНЭ}} = i_a - \Delta i, \quad (9)$$

где Δi – потери токовой нагрузки, обуславливающие потери мощности в электротехническом комплексе, о.е.

Закон изменения частоты имеет вид, о.е.:

$$v(s) = \sqrt{\frac{2}{T_j} \cdot \frac{i_{\text{МНЭ}}}{s} + \omega_{\text{н}}^2}, \quad (10)$$

где s – оператор дифференцирования.

Угловые характеристики активного и реактивного токов неявнополюсной машины соответственно, о.е.

$$i_a = \frac{E}{x_d} \sin \theta, \quad (11)$$

$$i_p = \frac{E}{x_d} \cos \theta - \frac{U}{vx_d}, \quad (12)$$

где E – ЭДС взаимной индукции, о.е.; x_d – сопротивления статора по продольной оси, о.е.; U – напряжение статора, о.е.; v – частота напряжения источника энергии, о.е.; θ – угол нагрузки, рад.

Решая совместно выражения (11) и (12), угол нагрузки определяется выражением, рад:

$$\theta = \arctg \frac{i_a}{i_p + \frac{U}{vx_d}}. \quad (13)$$

Требуемое напряжение возбуждения для обеспечения заданного реактивного тока, о.е.:

$$u_f = \frac{Er_f}{x_{afd}}, \quad (14)$$

где r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения, о.е.; x_{afd} – сопротивление взаимной индукции между статором и обмоткой возбуждения, о.е.

ЭДС взаимной индукции целесообразно определять через угловую характеристику реактивного тока (12), поскольку при задании активного тока, равного нулю, угловая характеристика активного тока (11) обращается в нуль, о.е.:

$$E = \left(x_d i_p + \frac{U}{v} \right) \cdot \frac{1}{\cos \theta}. \quad (15)$$

Токи синхронной машины по поперечной и продольной осям соответственно, о.е.:

$$i_q = \frac{i_a \cos \psi}{\cos \varphi} = \frac{i_a \cos(\varphi + \theta)}{\cos \varphi}, \quad (16)$$

$$i_d = -\frac{i_a \sin \psi}{\cos \varphi} = -\frac{i_a \sin(\varphi + \theta)}{\cos \varphi}, \quad (17)$$

где ψ – угол между током и ЭДС синхронной машины; φ – угол между током и напряжением синхронной машины; знак «минус» в выражении (17) обусловлен принятой в имитационной модели системой координат.

Для описания синхронной машины рассмотрена модель неявнополюсной машины. Данное допущение значительно упрощает конечные выражения и результаты расчётов, однако требует проверки полученных результатов для явнополюсной машины. Допущение увеличивает погрешность определения угла нагрузки (13) и, следовательно, задание напряжения возбуждения (14), ЭДС взаимной индукции (15) и расчёт собственных токов машины (16, 17). При этом представленный закон управления активной составляющей тока не зависит от выбора математической модели синхронной машины.

Результаты численного эксперимента

Исследование режимов работы маховичного накопителя выполним с помощью имитационной модели в среде SimInTech. Математическая модель синхронной машины представлена дифференциальными уравнениями Парка-Горева в системе dq-координат [21], вращающихся синхронно с ротором машины в системе относительных единиц. В качестве источника энергии рассмотрим идеальный источник напряжения с управляемой амплитудой и частотой напряжения. В качестве синхронной машины рассмотрим явнополюсный синхронный генератор МС500–1000 с номинальным напряжением 230 В и мощностью 400 кВт [22]. Маховичный накопитель задаётся увеличенным моментом инерции на валу генератора.

Применение явнополюсных машин ограничено скоростью вращения до 1500–2000 об/мин из-за прочности крепления полюсов. Потери в накопительном комплексе представим упрощённо постоянным моментом сопротивления на валу, кВт:

$$\Delta p_{\text{ОПЭ}} \approx M_{c0} \omega, \quad (18)$$

где M_{c0} – статический момент нагрузки на валу, Н·м; ω – скорость вращения ротора, рад/с.

Статический момент нагрузки примем по значению потерь в ОПЭ при скорости вращения маховика 1500 об/мин. В относительных единицах момент нагрузки $M_{c0} = 0,1$. Поскольку ротор синхронной машины вращается синхронно с полем, в относительных единицах скорость ротора и поля равны, $\omega = \nu$.

Тогда потери токовой нагрузки, обуславливающие потери мощности в электротехническом комплексе, о.е.:

$$\Delta i = \frac{\Delta p_{\text{ОПЭ}}}{u} \approx M_{c0} \nu. \quad (19)$$

Для проверки работы системы управления проведём ряд численных экспериментов при задании чисто активного потребления, чисто активной генерации, чисто ёмкостного и индуктивного тока, а также смешанной нагрузки, характерной для каждого из четырёх ква-

Таблица 1. Результаты имитационного моделирования

Table 1. Simulation modeling results

№	Задание				Результат моделирования				$\delta I, \%$	$\Delta \varphi, ^\circ$
	$i_a, \text{о.е.}$	$i_p, \text{о.е.}$	$i, \text{о.е.}$	$\varphi, ^\circ$	$i_a, \text{о.е.}$	$i_p, \text{о.е.}$	$i, \text{о.е.}$	$\varphi, ^\circ$		
1	0,1	0	0,1	0	0,1001	0,0021	0,1002	1,21	0,16	1,21
2	0,3	0	0,3	0	0,3011	0,0549	0,3061	10,33	2,03	10,33
3	0,6	0	0,6	0	0,6046	0,0977	0,6124	9,18	2,07	9,18
4	–0,1	0	0,1	180	–0,1022	0,0051	0,1023	177,14	2,30	–2,86
5	–0,3	0	0,3	180	–0,3027	–0,0535	0,3074	190,03	2,47	10,03
6	–0,6	0	0,6	180	–0,5960	0,0300	0,5968	177,12	–0,53	–2,88
7	0	0,1	0,1	90	0,0027	0,0798	0,0799	88,05	–20,15	–1,95
8	0	0,3	0,3	90	0,0004	0,2839	0,2839	89,92	–5,37	–0,08
9	0	0,6	0,6	90	0,0067	0,5857	0,5857	89,35	–2,38	–0,65
10	0	–0,1	0,1	–90	0,0040	–0,1136	0,1137	–88,01	13,70	1,99
11	0	–0,3	0,3	–90	–0,0021	–0,3172	0,3172	–90,38	5,73	–0,38
12	0	–0,6	0,6	–90	0,0039	–0,6183	0,6183	–89,64	3,05	0,36
13	0,2	0,15	0,25	36,87	0,2010	0,1725	0,2649	40,64	5,94	3,77
14	0,2	–0,15	0,25	–36,87	0,2003	–0,1275	0,2374	–32,48	–5,05	4,39
15	–0,2	0,15	0,25	143,13	–0,1995	0,0927	0,2200	155,07	–12,0	11,94
16	–0,2	–0,15	0,25	–143,13	–0,1990	–0,2062	0,2866	–133,98	14,65	9,14

дрантов комплексной плоскости. Значения заданий и результаты моделирования сведены в табл. 1.

На рис. 2 приведены осциллограммы фазных тока и напряжения синхронной машины в относительных единицах при задании потребления чисто активного тока 0,3 в течение 100 мс, а на рис. 3 при задании генерации чисто активного тока –0,3 в течение 50 мс. Частота напряжения сети приведена на рис. 4 и 5 соответственно для режимов заряда в течение 30 с и разряда накопителя в течение 8 с. Токи синхронной машины в dq-координатах и ток возбуждения для режимов чисто активного потребления в течение 30 с и генерации в течение 8 с приведены соответственно на рис. 6 и 7.

При задании на потребление чисто активного тока наибольшая относительная токовая погрешность составила около 2 %, при генерации – около 2,5 %. При этом при росте потребления погрешность увеличивается, а при росте генерации уменьшается. Наибольшая погрешность по углу составила чуть более 10°.

При потреблении и генерации чисто реактивных токов относительная погрешность достигала 20 % в области малых токов, снижаясь до 2–3 % при увеличении тока. При этом в области индуктивных токов смоделированное значение было меньше по амплитуде, а в области ём-

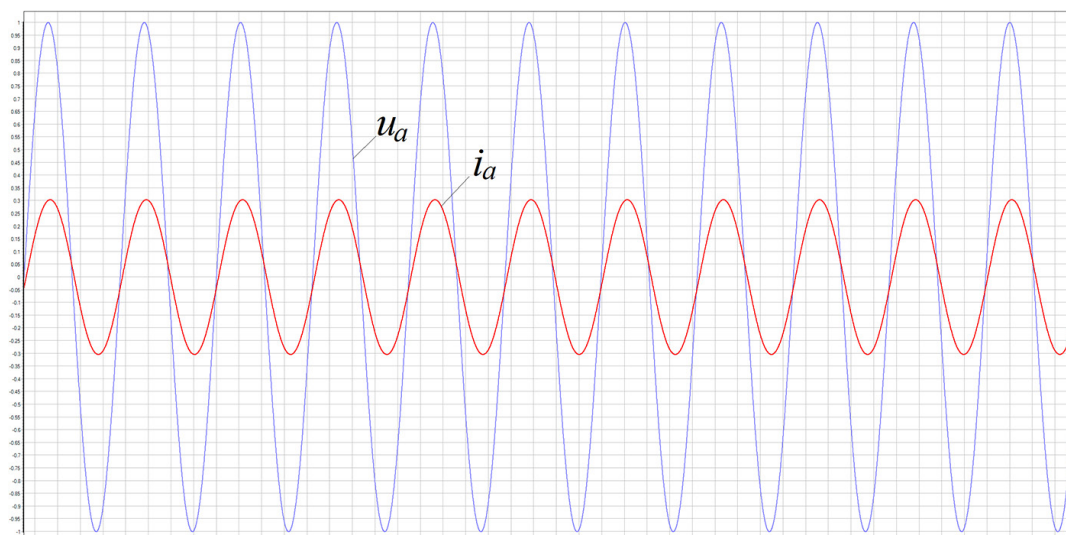


Рис. 2. Осциллограммы фазных тока и напряжения при задании на потребление чисто активного тока

Fig. 2. Oscillograms of phase current and phase voltage at consumption of watt current

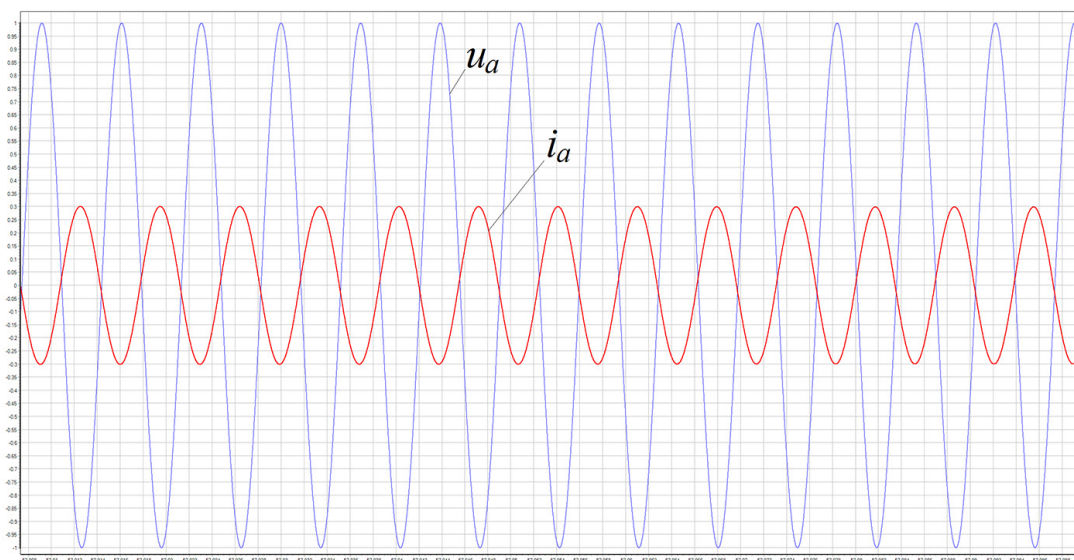


Рис. 3. Осциллограммы фазных тока и напряжения при задании на генерацию чисто активного тока

Fig. 3. Oscillograms of phase current and phase voltage at generation of watt current

костных токов смоделированное значение было завышено. Наибольшая погрешность по углу составила около 2° .

При исследовании смешанной нагрузки меньшая погрешность по току до 5–6 % и по углу $3,8\text{--}4,4^\circ$ соответствует режимам работы при потреблении активной составляющей тока. При генерации активной составляющей погрешность по току достигает 12–15 %, а по углу до 12° .

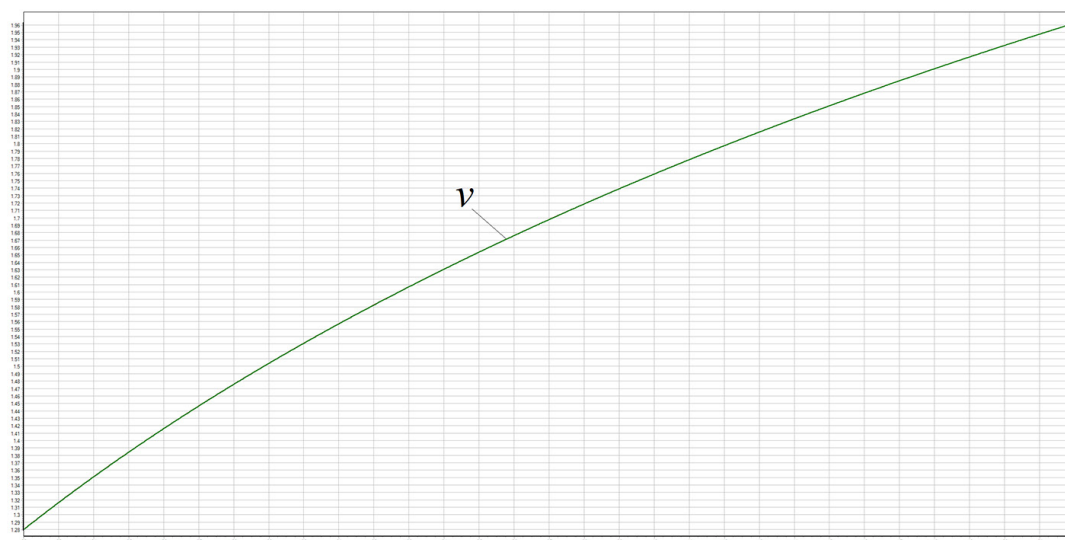


Рис. 4. Осциллограмма частоты напряжения синхронной машины при заряде накопителя

Fig. 4. Oscillogram of a synchronous machine voltage frequency during of storage unit charging

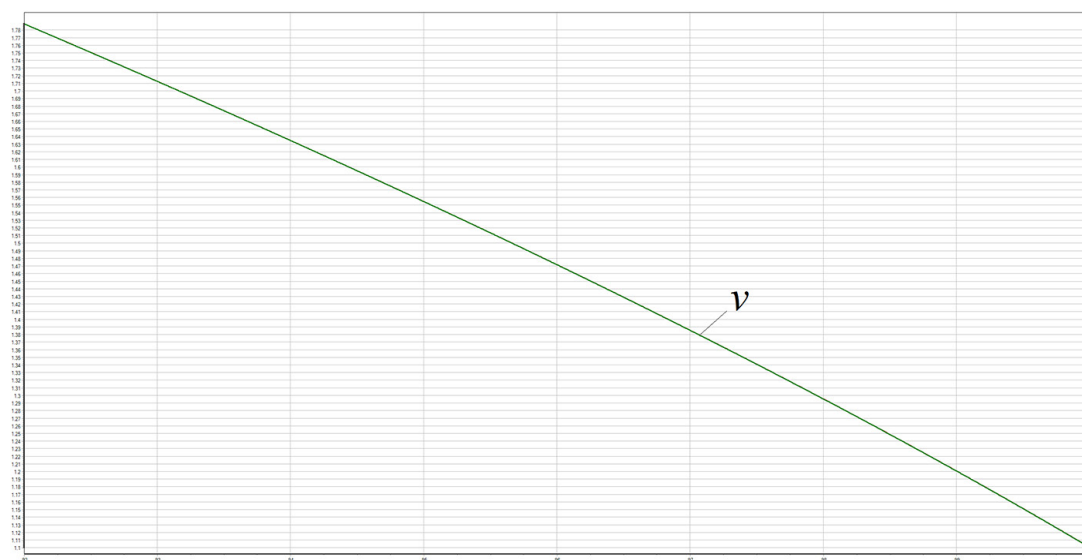


Рис. 5. Осциллограмма частоты напряжения синхронной машины при разряде накопителя

Fig. 5. Oscillogram of a synchronous machine voltage frequency during of storage unit discharging

Наибольшая токовая погрешность задания активной составляющей составила 2,18 % при задании чисто активного тока $-0,1$ в генерирующем режиме. В остальных экспериментах погрешность задания активного тока не превысила 1 %. В то же время погрешность задания реактивной составляющей достигала 38 % при смешанной нагрузке при генерации активной составляющей тока.

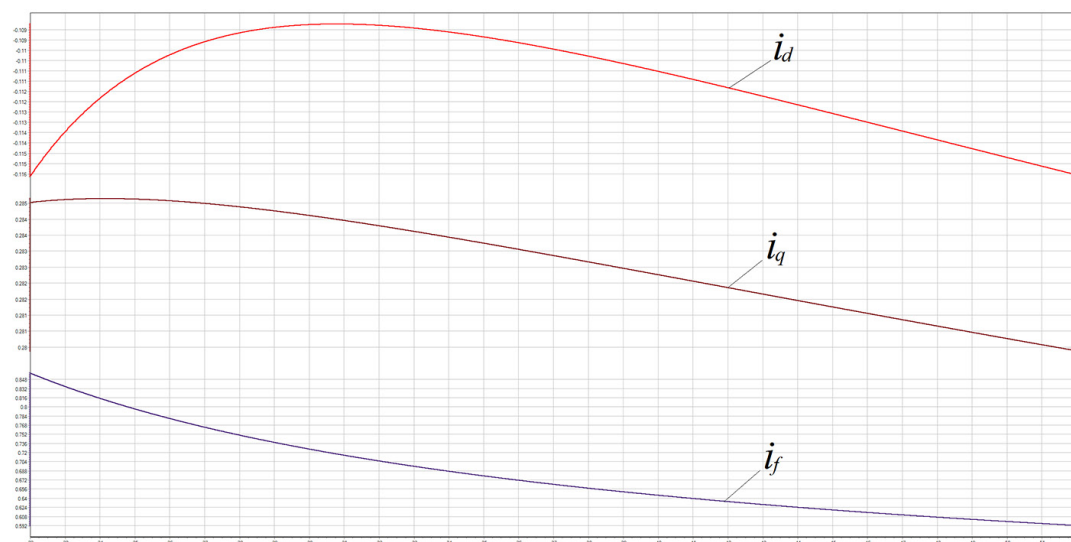


Рис. 6. Осциллограммы токов синхронной машины в dq-координатах и тока возбуждения при заряде накопителя

Fig. 6. Oscillograms of a synchronous machine currents in dq-coordinates and the excitation field current during of storage unit charging

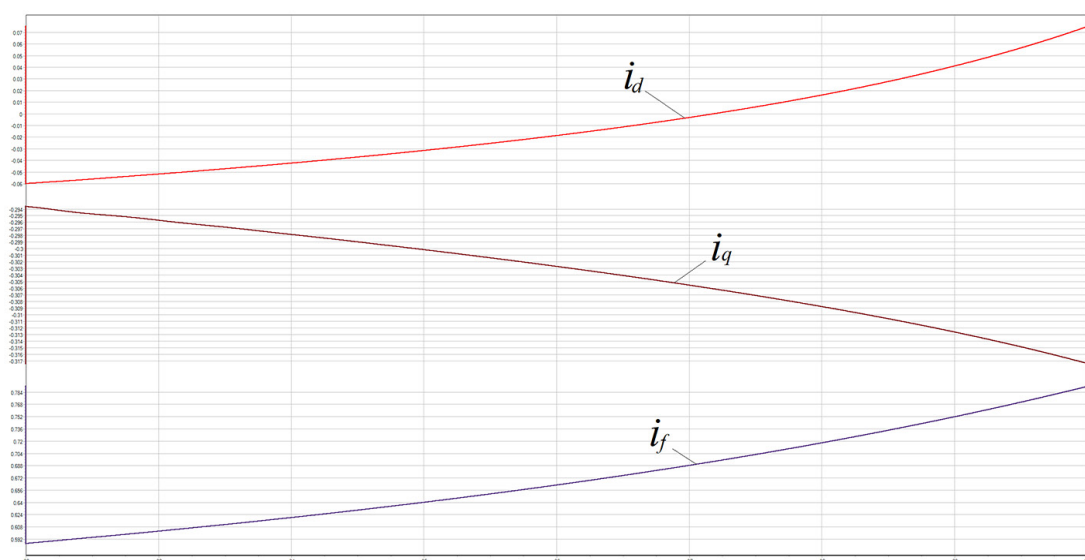


Рис. 7. Осциллограммы токов синхронной машины в dq-координатах и тока возбуждения при разряде накопителя

Fig. 7. Oscillograms of a synchronous machine currents in dq-coordinates and the excitation field current during of storage unit discharging

Данные отклонения могут быть объяснены как использованием упрощённой модели неявнополюсной синхронной машины для описания явнополюсной синхронной машины, так и применением формул для статического режима, в то время как частота и напряжение возбуждения

непрерывно меняются для поддержания заданных постоянных значений. В то же время закон управления частотой, полученный по выражению кинетической энергии маховичного накопителя, даёт хороший качественный и количественный результат для активной составляющей тока.

Заключение

Разработана система управления активной и реактивной мощностью синхронной машины с маховичным накопителем энергии без обратных связей. При проверке системы управления на имитационной модели наибольшая погрешность задания активной составляющей тока составила 2,18 %. Данная точность закона управления (он не зависит от конструкции синхронной машины) позволяет использовать его как для серийных явнополюсных и неявнополюсных машин, так и для машин с постоянными магнитами, применяемыми в высокоскоростных и высокоёмких маховичных накопителей. Однако для его применения необходимо знать инерционную постоянную маховика с ротором и характеристику потерь мощности в электротехническом комплексе, упрощённый учёт которых увеличит погрешность закона управления.

Закон управления реактивной мощностью разработан на основе математической модели неявнополюсной ненасыщенной синхронной машины. При проверке на имитационной модели явнополюсной ненасыщенной синхронной машины погрешность задания реактивной составляющей тока имела широкий разброс от 2 до 38 %. При этом точность управления может быть дополнительно снижена для реальных машин при их насыщении. Необходимость управления реактивной мощностью обусловлена поддержанием напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты. Для машин с постоянными магнитами регулирование реактивной мощности осуществляется сторонним источником реактивной мощности, который также необходим для серийных явнополюсных и неявнополюсных машин, так как предельные значения реактивной мощности синхронной машины зависят от активной мощности в соответствии с U-образными характеристиками и PQ-диаграммой. Поэтому дополнительное регулирование реактивной мощности со стороны синхронной машины имеет положительный эффект даже при значительной погрешности закона управления.

Для повышения точности регулирования необходимо применение замкнутой системы управления активной и реактивной мощностью с обратными связями. Управляющие воздействия могут быть получены в зависимости от ошибки регулирования токов с помощью ПИ-регуляторов.

Список литературы / References

- [1] Владимиров Л. В. Накопители электрической энергии в системах децентрализованного электроснабжения. *Вестник Югорского государственного университета*, 2024, 20(4). 31–35. [Vladimirov L. V. Electric energy storage in decentralized power supply systems, *Bulletin of Ugra State University*, 2024, 20(4). 31–35 (in Russian)]
- [2] Li Y., Ding Z., Yu Y., Liu Y. Mitigation effect of flywheel energy storage on the performance of marine gas turbine DC microgrid under high-power load mutation, *Energy Reports*, 2023, 9. 1380–1396.
- [3] Cruz-De-Jesús E., Martínez-Ramos J. L., Marano-Marcolini A., Gómez-Expósito A. Economic assessment of battery energy storage systems for frequency regulation reserve provision: A case study of the Dominican Republic, *Energy for Sustainable Development*, 2025, 88. 101749.

[4] Косарев Б. А., Кошук Г. А., Лазарев Д. В., Охотников А. А., Хамитов Р. Н. Способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах в условиях распределенной генерации при резкопеременном характере нагрузки потребителя, *Электротехнические и информационные комплексы и системы*, 2023, (19)3. 64–73. [Kosarev B. A., Koshhuk G. A., Lazarev D. V., Ohotnikov A. A., Xamitov R. N. Methods for maintaining voltage and frequency values within acceptable limits in distributed generation conditions with a sharply variable consumer load, *Electrotechnical and information complexes and systems*, 2024, 19(3). 64–73 (in Russian)]

[5] Khaleel M., Yusupov Z., Kilic H., Moftah A., Hesri A., Ahmed A. A., Nassar Y., Yilmaz M., Martinez-Morales A. A. Battery technologies In electrical power Systems: Pioneering secure energy transitions, *Journal of Power Sources*, 2025, 653.

[6] Lee D., Chiang Y., Chen Y.-T., Tsai H.-H. Impacts of battery energy storage system on power grid smartness: Case study of Taiwan Power Company, *Journal of Energy Storage*, 2024, 86.

[7] Song Z., Zhang M., Chi Y., Li J., Zheng Y. Research on the coordinated optimization of energy storage and renewable energy in off-grid microgrids under new electric power systems, *Global Energy Interconnection*, 2025, 8(2). 213–224.

[8] Ajami O. M. T., Tan R. H. G., Nadarajah M., Jamaludin F. A., Pradana A. B. Tribrid energy storage system for frequency support with stage-specific control in a complex interconnected power system with HVDC link, *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2025, 13.

[9] Jaradat T., Khatib T. A review of battery energy storage system for renewable energy penetration in electrical power system: Environmental impact, sizing methods, market features, and policy frameworks, *Future Batteries*, 2025, 7.

[10] Гарифуллина Н. А. Современные технологии хранения электроэнергии для энергосистем будущего, *Экономика и управление: проблемы, решения*, 2024, 9(150). 95–101 [Garifullina N. A. Modern electric power storage technologies for future power systems, *Economics and management: problems, solutions*, 2024, 9(150). 95–101 (in Russian)]

[11] Ойдинская С. В. Применение маховичных аккумуляторов в ветровой отрасли электроэнергетики, *Политехнический молодежный журнал*, 2025, 1(96) [Oidinskaya S. V. The use of flywheel batteries in the wind industry of the electric power industry, *Polytechnic Youth Journal*, 2025, 1(96) (in Russian)]

[12] Мотова М. В. Анализ накопителей электрической энергии для применения в интеллектуальных энергосистемах, *Вестник НИЦ ВА РВЧН*, 2024, 7. 28–34 [Motova M. V. Analysis of electric energy storage devices for use in intelligent power systems, *Bulletin of SIC VA RVSN*, 2024, 7. 28–34 (in Russian)]

[13] Casarin S., Cavazzini G., Pérez-Díaz J. I. Battery and Flywheel hybridization of a reversible Pumped-Storage Hydro Power Plant for wear and tear reduction, *Journal of Energy Storage*, 2023, 71. 108059

[14] Duan J., Ni H., Tao J., Li Z., Zhang Y., Wang J. Adaptive primary frequency regulation method based on energy perspective for integrated unit-level wind storage systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2025, 169. 110822.

[15] Pelosi D., Baldinelli A., Cinti G., Ciupageanu D.-A., Ottaviano A., Santori F., Carere F., Barelli L. Battery-hydrogen vs. flywheel-battery hybrid storage systems for renewable energy integration in mini-grid: A techno-economic comparison, *Journal of Energy Storage*, 2023, 63. 106968.

- [16] Жилин Е. В., Долгаль С.В., Малышева А.Д. Перспективы применения накопителей электроэнергии в энергетических системах, *Энергетические системы*, 2023, 3. 32–41 [Zhilin E. V., Dolgal S. V., Malysheva A. D. Prospects for the use of electric power storage devices in energy systems, *Energy Systems*, 2023, 3. 32–41 (in Russian)]
- [17] Третьяков Е. А., Мещеряков А. В. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения с резервированием от дизель-генераторных установок, *Вестник Югорского государственного университета*, 2023, 2(69). 133–143 [Tretyakov E. A., Meshcheryakov A. V. Improving the quality of electricity in power supply systems with redundancy from diesel generator sets, *Bulletin of Ugra State University*, 2023, 2(69). 133–143 (in Russian)]
- [18] Song G., Wu Z., Yan Q., Zhang J., Yang P., Zhang Z. Sensorless fault-tolerant control strategy of flywheel energy storage system based on improved model reference adaptive system, *Journal of Energy Storage*, 2025, 132.
- [19] Meng K., Wu H., Fan D., Zhou Z., Zhang Z., Liu Q. Research on the strategy for average consensus control of flywheel energy storage array system based on lifecycle, *Journal of Energy Storage*, 2024, 99.
- [20] Блинников М. Е., Пантелеев В.И. Обратимый преобразователь энергии с маховичным накопителем в системах электроснабжения, *Энергетические системы*, 2023, 2. 44–50 [Blinnikov M. E., Panteleev V. I. Reversible energy converter with flywheel storage in power supply systems, *Energy systems*, 2023, 2. 44–50 (in Russian)]
- [21] Блинников М. Е., Пантелеев В.И. Имитационная модель синхронной машины с маховичным накопителем энергии в среде Simintech, *Энергетические системы*, 2024, 2. С. 33–44 [Blinnikov, M. E., Panteleev, V. I. Simulation model of a synchronous machine with a flywheel energy storage in a Simintech environment, *Energy Systems*, 2024, 2. 33–44 (In Russian)]
- [22] Яковлев Г.С. Судовые электроэнергетические системы: учебник для судостроит. техникумов, Л.: Судостроение, 1980. 287 с. [Yakovlev G. S. *Marine electric power systems: a textbook for shipbuilding. technical schools*, Leningrad, Sudostroenie, 1980. 287 p. (In Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: ZAXWFW

УДК 621.357.12:661.961.1

**Analysis of Electrolyzer Designs for Hydrogen Production
in Industrial and Laboratory Environments**

**Antonina A. Filimonova, Lilia V. Sirotkina,
Andrey A. Chichirov and Artur M. Khairutdinov***
*Kazan State Power Engineering University
Russian Federation, Kazan*

Received 18.11.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 11.04.2026

Abstract. The development of hydrogen energy necessitates the improvement of water electrolysis technologies and optimization of electrolysis cells in order to increase energy efficiency and reduce operating costs. The aim of the work was to compare the performance characteristics of a diaphragm less alkaline electrolyze with monopolar inclusion of electrodes and a proton exchange membrane (PEM) electrolyze with a bipolar configuration, from the perspective of their applicability for laboratory research and potential scaling. Two experimental facilities have been developed and studied: an alkaline electrolyze based on a KOH solution and a PEM electrolyzer that provides separate measurement of hydrogen and oxygen volumes by varying current and pressure. The alkaline system demonstrated a linear dependence of the gas output on the current, but revealed limited suitability for the production of pure hydrogen due to mixing of products and reverse reactions. At the same time, the PEM design ensured an H₂ purity of over 99.9 %, compliance with Faraday's laws and stability of parameters under increased pressure. The results obtained confirmed the decisive influence of the design on the efficiency of electrolysis: a diaphragm less alkaline electrolyze is rational mainly for research tasks, while a bipolar PEM electrolyze demonstrates industrial prospects and optimal characteristics for environmentally friendly and scalable hydrogen production when integrated with renewable energy sources.

Keywords: hydrogen energy, PEM electrolyze, alkaline electrolyze, energy efficiency, water electrolysis.

Citation: Filimonova A. A., Sirotkina L. V., Chichirov A. A., Khairutdinov A. M. Analysis of Electrolyzer Designs for Hydrogen Production in Industrial and Laboratory Environments. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 489–501. EDN: ZAXWFW



Анализ конструкций электролизеров для производства водорода в промышленных и лабораторных условиях

А. А. Филимонова, Л. В. Сироткина,
А. А. Чичиров, А. М. Хайрутдинов

*Казанский государственный энергетический университет
Российская Федерация, Казань*

Аннотация. Развитие водородной энергетики обуславливает необходимость совершенствования технологий электролиза воды и оптимизации конструктивных решений электролизеров с целью повышения энергетической эффективности и снижения эксплуатационных затрат. Целью работы являлся сравнительный анализ эксплуатационных характеристик бездиафрагменного щелочного электролизера с монополярным включением электродов и протон обменного мембранного (РЕМ) электролизера с биполярной конфигурацией, с позиции их применимости для лабораторных исследований и потенциального масштабирования. Разработаны и исследованы две экспериментальные установки: щелочной электролизер на основе раствора КОН и РЕМ-электролизер, обеспечивающий раздельное измерение объемов водорода и кислорода при варьировании силы тока и давления. Щелочная система продемонстрировала линейную зависимость выхода газов от тока, однако выявила ограниченную пригодность для получения чистого водорода вследствие смешивания продуктов и обратных реакций. В то же время РЕМ-конструкция обеспечила чистоту H_2 свыше 99,9 %, соблюдение законов Фарадея и устойчивость параметров при повышенном давлении. Полученные результаты подтвердили определяющее влияние конструкции на эффективность электролиза: бездиафрагменный щелочной электролизер рационален преимущественно для исследовательских задач, тогда как биполярный РЕМ-электролизер демонстрирует промышленную перспективность и оптимальные характеристики для экологически безопасного и масштабируемого производства водорода при интеграции с возобновляемыми источниками энергии.

Ключевые слова: водородная энергетика, РЕМ-электролизер, щелочной электролизер, энергетическая эффективность, электролиз воды.

Цитирование: Филимонова А. А. Анализ конструкций электролизеров для производства водорода в промышленных и лабораторных условиях / А. А. Филимонова, Л. В. Сироткина, А. А. Чичиров, А. М. Хайрутдинов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 489–501. EDN: ZAXWFW

Введение

Декарбонизация экономики и альтернативная энергетика с 2020 г. являются актуальными направлениями в мировом сообществе. В связи с истощением запасов углеводородного сырья возникла необходимость поиска новых альтернативных источников энергии и энергоносителей, поэтому особое внимание уделяется развитию водородной энергетики [4]. Водород является ценным химическим реагентом и альтернативным экологически чистым топливом и находит широкое применение в различных отраслях производства (химическая, нефтехимическая, металлургическая), наземном транспорте, авиации. На рис. 1 показана структура мирового потребления и производства водорода [1].

Основными методами получения водорода остаются паровой риформинг метана и его парциальное окисление, газификация угля, пиролиз природного газа [2]. Однако все перечислен-

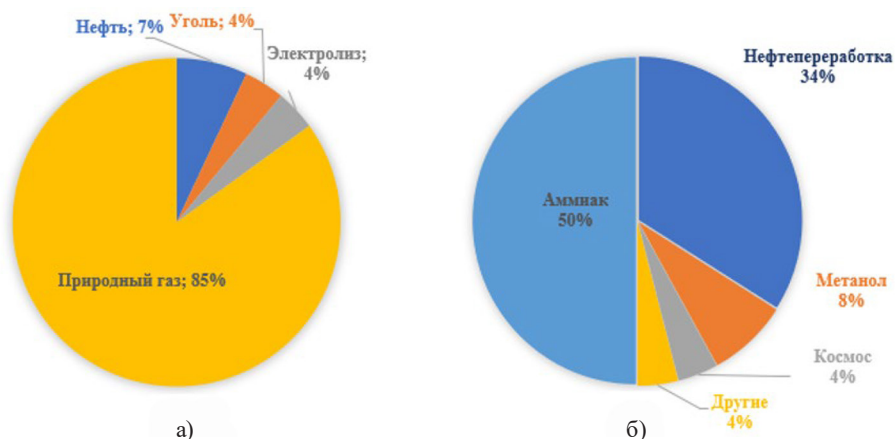


Рис. 1. Структура мирового производства а) и потребления б) водорода

Fig. 1. Structure of global production a) and consumption b) of hydrogen

ные выше методы не позволяют получать высокочистый водород, поэтому требуется глубокая очистка, которая приводит к увеличению затрат на его производство.

Поскольку в последние годы наблюдается тенденция потребления водорода, полученного без выбросов углекислого газа, электролизным технологиям и производству водорода из биомассы уделяется особое внимание [3].

В табл. 1 приведен сравнительный анализ основных способов производства водорода.

Хотя электрохимические методы получения водорода характеризуются высокими затратами, они обладают комплексом существенных преимуществ. Основным достоинством является получение водорода высокой чистоты (99,0–99,5 %) при технологической простоте и возможности глубокой автоматизации процесса. Используемое сырьё – вода – общедоступно, а процесс электролиза позволяет выделять ценные побочные продукты, такие как тяжелая вода и кислород. Критически важным технологическим преимуществом считается обеспечение физического разделения газов в ходе электролиза, что способствует повышению безопасности и чистоты продукции [5]. Данные факторы в совокупности компенсируют инвестиционные

Табл. 1. Сравнительный анализ методов производства водорода

Table. 1. Comparative analysis of hydrogen production methods

Метод	Сырьё	Выбросы парниковых газов, кг CO ₂ / кг H ₂	Себестоимость, € / кг H ₂
Газификация угля	Уголь	18–28	2
Паровой риформинг	Природный газ	9–13	1–1,5
Риформинг секвестрированием	Природный газ	1–7	1,5–2
Пиролиз метана	Природный газ	0–5	2,6–3,2
Электролиз с помощью ВИЭ	Вода	0–1	3–7
Электролиз с помощью атомной энергетики (ВВЭР, ВТГР)	Вода	0–1	3–5

издержки на внедрение технологии. Электролитический водород востребован для удалённых энергетических объектов, транспорта и различных отраслей промышленности, включая стекольную, металлургическую, нефтехимическую, пищевую и полупроводниковую сферы. Электролиз, интегрируемый с возобновляемыми источниками энергии, формирует перспективную платформу для экологически чистого производства водорода [6].

Электролиз воды представляет собой физико-химический процесс, при котором под действием постоянного электрического тока образуются кислород и водород. Водород и кислород отводятся раздельно. Концентрация щелочи КОН в воде (электролите) равна 30 % по массе. Расход электрической энергии на м^3 водорода равен 5,3 кВт·ч или на кг водорода содержание водорода в продукте 99,5 % [7].

Для реализации электролизной технологии производства водорода применяются водно-щелочные электролизеры (ЩЭВ), электролизеры с твердым полимерным электролитом (ТПЭ) и твердооксидные электролизеры. Наиболее разработанными являются ЩЭВ и ТПЭ, в то время как высокотемпературные электролизеры выходят из стадии лабораторных исследований [8].

Основные характеристики электролизеров приведены в табл. 2.

Наиболее распространённой технологией водородного электролиза остаётся щелочной электролиз, отличающийся низкой стоимостью материалов, экологичностью и использованием катализаторов на основе неблагородных металлов [9]. Он широко применяется на атомных станциях с расплавами солей и щелочей, представляя преимущество перед традиционными методами по экологическим параметрам. Недостатки щелочного процесса включают невысокие плотности тока, коррозионно-активный жидкий электролит и необходимость очистки водорода от побочных примесей [10].

Электролизеры с протонопроводящими мембранами (РЕМ) выделяются компактностью, производительностью и безопасностью, а их мембраны обладают высокой механической прочностью, химической стойкостью и электропроводностью. Передача заряда осуществляется гидратированным протоном [11]. Основным недостатком РЕМ-электролизеров является высокая стоимость из-за использования перфторированных мембран и благородных металлов в катализаторах. Преимуществом является возможность функционирования в перемен-

Табл. 2. Сравнительная характеристика электролизеров различных типов

Table. 2. Comparative characteristics of electrolyzers of different types

Параметр	Водно-щелочной электролизер	Электролизер с твердополимерным электролитом	Твердооксидный электролит
Рабочая температура, К	370–420	310–360	1000–1170
Энергозатраты, кВт·ч/ м^3 H_2	4,5 – 5,5	3,5–4,5	2,7–3,5
Производительность, м^3 /ч H_2	До 500	До 100	
Рабочее давление, Мпа	1,0 – 20	0,1–15	0,1–3
КПД по электрической энергии, %	50–65	65–85	85–95
Высокая чистота генерируемого водорода без вспомогательных систем очистки газа, %	99,9	99,9	99,8

ных режимах нагрузки, что актуально для интеграции с ветровыми и солнечными электростанциями [12].

Высокотемпературный электролиз с твердооксидными электролизерами на основе диоксида циркония, модифицированного оксидами редкоземельных элементов, характеризуется высокой электропроводностью. Электролиз воды с использованием возобновляемых источников энергии относится к экологически чистым методам, однако стоимость такого водорода сейчас в 2–4 раза превышает аналог из природного газа [13]. Эффективность высокотемпературного электролиза возрастает при использовании пара и дешёвых источников энергии, что особенно актуально для атомных станций. В промышленности используются два типа электролизеров: монополярные и биполярные [14].

Современные электролизеры для электролиза воды относятся к биполярному типу. В них главным образом используют выносные электроды с перфорированными пластинами или выносные сетчатые электроды, которые обеспечивают внутреннюю циркуляцию электролита [15]. Выделившийся на них газ частично отводится в пространство за ними; их поверхность достаточно развита. На выносных электродах возможна работа с плотностью тока 1500–2500 А/м². Электроды изготавливают из стали марки (Ст-3). Анодная сторона гальванически покрывается слоем никеля толщиной 100–200 мк. Покрытие должно быть беспористым.

Перед началом проектирования и выбора материалов были сформулированы следующие требования к конструкции:

- материал электродов должен быть устойчив к агрессивной среде и обеспечивать долговечность устройства;
- необходимо предусмотреть отдельные каналы для перемещения электролитов, чтобы избежать смешивания газов и обеспечить их чистоту;
- крайние электроды должны быть подключены к источнику тока;
- конструкция должна быть закрытой и герметичной для предотвращения утечки газов, обеспечения безопасности работы и упрощения получения водорода;
- должна быть предусмотрена возможность разборки устройства для ухода за ним, что позволит проводить регулярную очистку и обслуживание электролизера, продлевая его срок службы и поддерживая высокую эффективность работы;
- конструкция электролизера должна обеспечивать лёгкую разборку для удобства обслуживания.

Цена электролизного водорода определяется капиталовложениями и эксплуатационными расходами, которые зависят от срока службы, загрузки оборудования и удельной производительности установки. В рамках настоящих исследований ставилась задача интенсификации и повышения энергоэффективности процесса электролиза воды. Ключевые подходы включают разработку новых катодных материалов с высокой удельной поверхностью и низким перенапряжением выделения водорода, оптимизацию анодов с повышенным перенапряжением выделения кислорода, а также снижение омических потерь посредством новых конструкций электролизаторов и усовершенствование процесса в бездиафрагменных электролизерах с системой очистки водорода. Особый интерес представляет применение микробных электролизеров, где электрохимически активные бактерии окисляют органические вещества, позволяя получать водород при низкой разности потенциалов (до 0,2 В). Однако необходимость нейтрального pH

и низкой концентрации солей ограничивает электропроводность, что снижает эффективность их практического применения. Научная значимость работы заключается в получении новых данных о кинетике электрохимических процессов, что позволяет теоретически обосновать выбор конструкции электролизера. Установлены оптимальные температурные режимы (55–65 °С для РЕМ) и пределы эксплуатации, что углубляет понимание электрохимических процессов. Практическая значимость состоит в возможности оптимизации производства водорода за счет выбора эффективной конструкции. РЕМ-электролизеры с чистотой $H_2 > 99.9\%$ и низким энергопотреблением (5.88 кВт·ч/л) подтвердили свою эффективность.

Материалы и методы

В рамках исследования конструкций электролизеров для производства водорода были разработаны и собраны два типа устройств с принципиально разными характеристиками. Первый тип – щелочной монополярный электролизер фильтр-прессной конструкции, изготовленный из оргстекла (толщина 8 мм) с электродами из нержавеющей стали (марка 08X18N10) и герметизирующими прокладками из резины ТМКШ. Данная установка предназначена для совместного получения смеси водорода и кислорода без их разделения. В качестве электролита использовался 10 %-й водный раствор КОН.

На рис. 2 представлена трёхмерная модель щелочного монополярного электролизера, включая детализацию его ключевых компонентов (электроды, уплотнители, элементы крепления и газоотводящие каналы) и общий вид собранной конструкции.

Второй тип – биполярный электролизер с протонообменной мембраной (РЕМ), включающий электроды из нержавеющей стали, протонообменную мембрану, турбулизационные сетки и отдельные каналы для отвода газов. Для РЕМ-электролизера применялась дистиллированная вода, обеспечивающая высокую чистоту процесса.

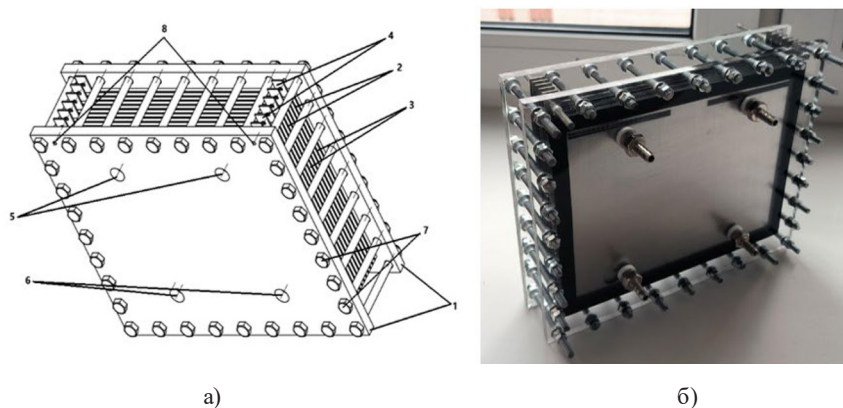


Рис. 2. Трёхмерная модель щелочного монополярного электролизера: а) 1 – наружные пластины из оргстекла; 2 – стальные электроды марки 08X18N10; 3 – прокладки из резины ТМКШ; 4 – контакты электродов; 5 – выходные отверстия; 6 – отверстия для подачи электролита; 7 – стяжные болты; 8 – связующее отверстие; б) вид собранной конструкции

Fig. 2. Three-dimensional model of an alkaline monopolar electrolyzer: a) 1 – outer plates made of organic glass; 2 – steel electrodes of grade 08Cr18N 10; 3 – rubber gaskets TMKShch; 4 – electrode contacts; 5 – outlet holes; 6 – holes for electrolyte supply; 7 – tie bolts; 8 – connecting hole; b) view of the assembled structure

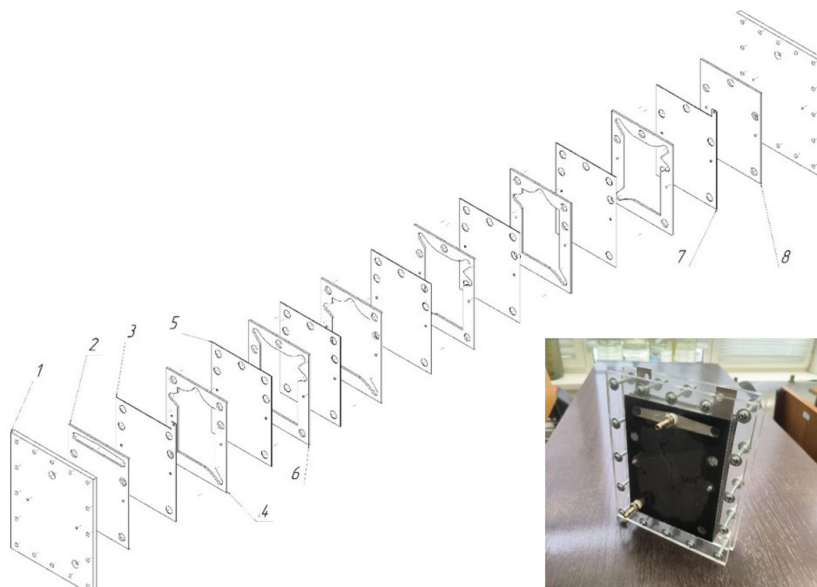


Рис. 3. Электролизер в разобранном состоянии и его общий вид: 1 – внешние стенки; 2 – первая концевая резиновая прокладка; 3 – первый концевой электрод; 4 – проставка первой электролитической зоны; 5 – промежуточный электрод; 6 – проставка второй электролитической зоны; 7 – второй концевой электрод; 8 – вторая концевая прокладка

Fig. 3. The electrolyzer in a disassembled state and its general appearance: 1 – outer walls; 2 – first end rubber gasket; 3 – first end electrode; 4 – spacer of the first electrolytic zone; 5 – intermediate electrode; 6 – spacer of the second electrolytic zone; 7 – second end electrode; 8 – second end gasket

На рис. 3 представлена 3D-модель биполярного РЕМ-электролизера в разобранном виде с детализацией компонентов (электроды, протонообменная мембрана, уплотнители, газовые/жидкостные каналы) и общий вид собранной конструкции.

Экспериментальная часть работы была сосредоточена на определении оптимальной температуры электролита для обоих типов электролизеров. Для щелочного устройства 10 %-й раствор КОН нагревали до четырех температурных диапазонов: 15–25 °С, 35–45 °С, 55–65 °С, и 75–85 °С. В РЕМ-электролизере аналогичные диапазоны применялись для дистиллированной воды. Производительность измерялась по объему выделенного газа (л/ч) при фиксированных электрических параметрах: для щелочного электролизера варьировалась сила тока (1–10 А), для РЕМ-устройства – напряжение (10–40 В). Каждый эксперимент повторялся трижды для статистической достоверности.

Для количественной оценки эффективности процессов были выполнены следующие расчеты.

Скорость электролиза определялась как количество молей вещества (n), претерпевшего электрохимическое превращение на единице площади электрода (S , см²) за единицу времени (t , с):

$$U_9 = \frac{n}{S \cdot t} (\text{моль}/(\text{см}^2 \times \text{с})). \quad (1)$$

Удельное энергопотребление вычислялось как:

$$W_{\text{уд.}} = \frac{I \cdot U}{V} (\text{Дж.}/\text{л.}), \quad (2)$$

где I – ток (А), U – напряжение (В), v – выделение газа (л./с.).

Данные методики позволили сопоставить эффективность конструкций в идентичных условиях и выявить ключевые параметры их оптимизации.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования обоих типов электролизеров выявили четкую зависимость их эффективности от температуры электролита. Для количественной оценки использовались ключевые метрики: объемная скорость выделения газа (л/ч), удельное энергопотребление (кВт·ч/м³), рассчитываемое как отношение электрической мощности к производительности, и скорость электролиза (моль/(см²·с)), отражающая интенсивность электрохимического превращения на единице площади электродов. Сравнение этих параметров для щелочного и PEM-устройств в идентичных условиях позволило не только подтвердить термооптимумы, но и объективно сопоставить их эксплуатационные преимущества и ограничения, что представлено в следующем анализе.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости объема выделяемых газов (водорода и кислорода) от температуры электролита при разной мощности.

Экспериментальные кривые на рис. 4 отражают зависимость производительности от температуры. Для водорода максимум 0.429 л/ч при 55–65 °С контрастирует с падением до 0.316 л/ч при 75–85 °С, что обусловлено деградацией транспортных свойств системы. Кислородное выделение при температуре электролита 55–65 °С достигает 0.247 л/ч, что демонстрирует аналогичную чувствительность, подтверждая синхронность электрохимических процессов.

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости объема выделяемого газа Брауна от температуры электролита при разной мощности.

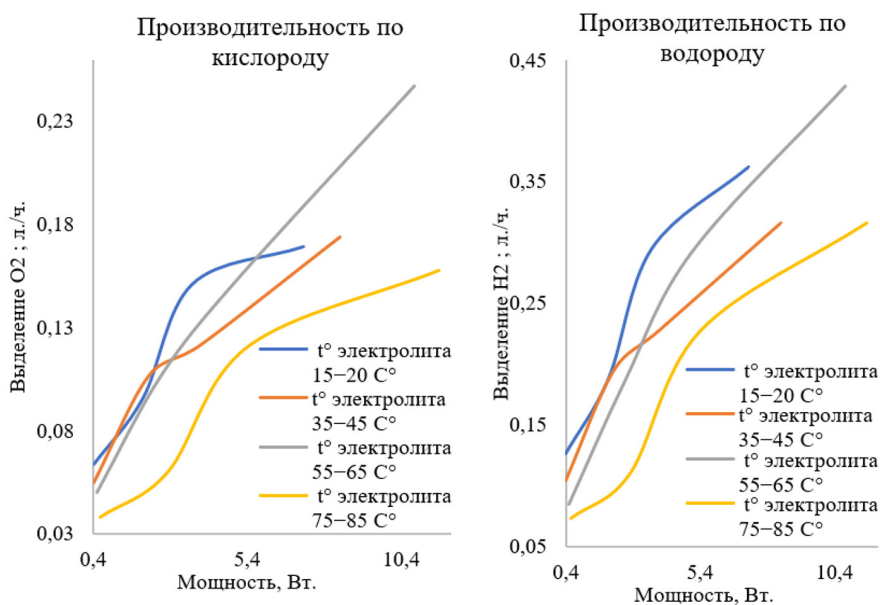


Рис. 4. Зависимость объема выделяемого газа PEM-электролизера от мощности

Fig. 4. Dependence of the volume of gas emitted by the PEM electrolyzer on the power

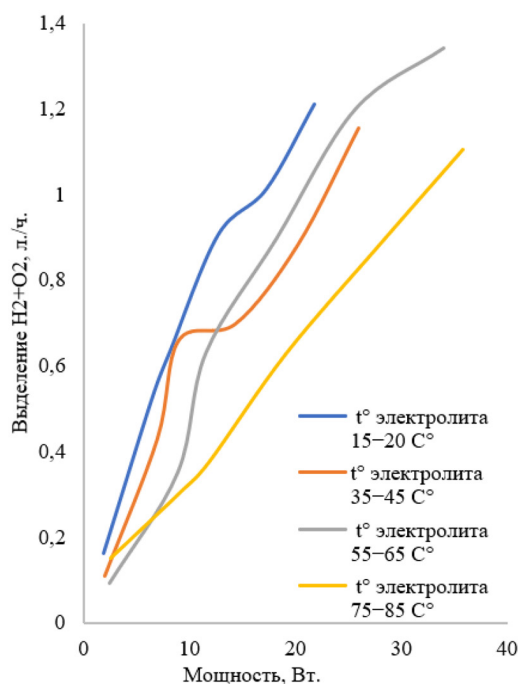


Рис. 5. Зависимость скорости выделения газа от подаваемой мощности на щелочной электролизер

Fig. 5. Dependence of the gas evolution rate on the power supplied to the alkaline electrolyzer

Экспериментальные данные демонстрируют, что максимальная производительность по газу Брауна, достигающая 1.872 л/ч, наблюдалась в температурном диапазоне 55–65 °С при подводимой мощности 34 Вт. В контрасте с этим минимальный выход смеси (1.106 л/ч) был зафиксирован при 75–85 °С, несмотря на более высокую мощность 35.8 Вт, что указывает на существенное снижение энергоэффективности процесса при перегреве электролита.

Для количественной оценки эффективности процессов электролиза были выполнены расчеты скорости электролиза по формуле (1) и удельного энергопотребления по формуле (2). Результаты расчетов скорости электролиза реакции выделения водорода PEM- и щелочного электролизеров представлены в табл. 3.

Для PEM-электролизера максимальная скорость реакции ($U_{\text{э}}=6.41 \cdot 10^{-9}$ моль/(см²·с)) наблюдается при 60 °С благодаря увеличению протонной проводимости мембраны на 25 % (в ди-

Табл. 3. Характеристика скорости электролиза при разных температурах электролита

Table. 3. Electrolysis rate characteristics at different electrolyte temperatures

Тип электролизера	Значение $U_{\text{э}}$ при разных температурах электролита			
	t° электролита 15–20 °С	t° электролита 35–45 °С	t° электролита 55–65 °С	t° электролита 75–85 °С
РЕМ-электролизер	2,14	4,97	6,41	4,43
Щелочной электролизер	3,15	3,14	3,45	2,66

апазоне 20–60 °С) и снижению перенапряжения активации на катоде. При 80 °С значение U_z падает на 31 % из-за дегидратации мембраны и роста омических потерь.

В щелочном электролизере скорость реакции демонстрирует слабую температурную зависимость ($U_z=2.66\text{--}3.51\cdot 10^{-9}$ моль/(см²·с)). Пиковое значение ($3.51\cdot 10^{-9}$) достигается при 20 °С, что обусловлено высокой стабильностью щелочного электролита. Снижение до $2.66\cdot 10^{-9}$ при 80 °С вызвано усилением коррозии электродов и уменьшением концентрации КОН вследствие испарения воды.

Результаты расчетов удельного энергопотребления для реакции выделения водорода РЕМ- и щелочного электролизеров представлены в табл. 4.

На рис. 6 представлены линии тренда зависимостей удельного энергопотребления от производительности по водороду для РЕМ- и щелочного электролизеров.

РЕМ-электролизер демонстрирует минимальные энергозатраты (5.882 кВт·ч/л) при низкой производительности (0.085 л/ч) в оптимальном диапазоне 55–65 °С, сохраняя высокую эффективность даже на пике выработки (25.175 кВт·ч/л при 0.429 л/ч). Щелочной электролизер показывает стабильно высокое энергопотребление (17–48 кВт·ч/л) на всех режимах, достигая максимума 48.553 кВт·ч/л при 0.895 л/ч и температурах выше 65 °С из-за испарения электролита и коррозии. РЕМ-электролизер значительно превосходит щелочной по энергоэффективности, особенно при 55–65 °С, что критично для промышленного внедрения.

Табл. 4. Удельное энергопотребление для реакции выделения водорода

Table 4. Specific energy consumption for the hydrogen evolution reaction

РЕМ-электролизер							
t° электролита 15–20 С°		t° электролита 35–45 С°		t° электролита 55–65 С°		t° электролита 75–85 С°	
Скорость выделения водорода л/ч	Энерго-емкость, кВт·ч/л.	Скорость выделения водорода л/ч	Энерго-емкость, кВт·ч/л	Скорость выделения водорода л/ч	Энерго-емкость, кВт·ч/л	Скорость выделения водорода л/ч	Энерго-емкость, кВт·ч/л
0,127	3,15	0,104	3,846	0,085	5,882	0,073	8,219
0,189	10,582	0,195	11,282	0,187	13,904	0,11	25,455
0,295	12,203	0,228	17,105	0,293	17,406	0,227	23,789
0,362	19,89	0,316	26,582	0,429	25,175	0,316	36,709
Щелочной электролизер							
t° электролита 15–20 С°		t° электролита 35–45 С°		t° электролита 55–65 С°		t° электролита 75–85 С°	
Скорость выделения водорода л/ч	Энерго-емкость, кВт·ч/л	Скорость выделения водорода л/ч.	Энерго-емкость, кВт·ч/л	Скорость выделения водорода л/ч	Энерго-емкость, кВт·ч/л	Скорость выделения водорода л/ч	Энерго-емкость, кВт·ч/л
0,108	17,778	0,074	27,027	0,062	38,434	0,1	25,387
0,349	18,603	0,287	24,271	0,235	37,689	0,201	44,765
0,426	19,437	0,441	20,424	0,421	27,342	0,249	47,25
0,603	21,083	0,467	30,857	0,599	30,367	0,42	45,571
0,675	25,613	0,589	34,383	0,799	32,027	0,589	47,411
0,807	27,025	0,771	33,737	0,895	37,975	0,737	48,553

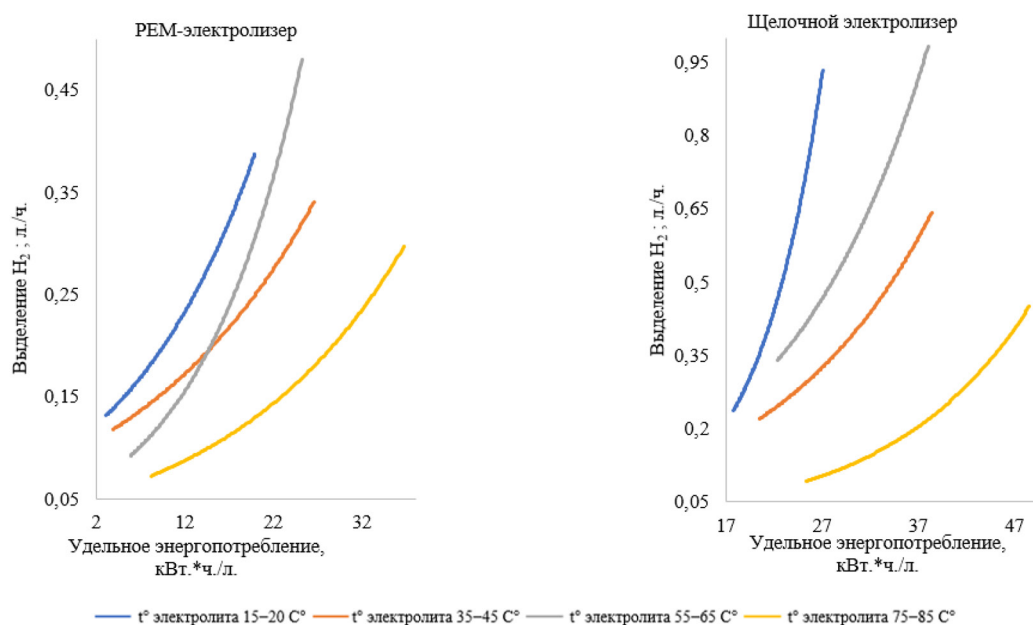


Рис. 6. Зависимость объема выделяемого газа РЕМ-электролизера от мощности

Fig. 6. Dependence of the volume of gas released by the PEM electrolyzer on the power

Закключение

Проведенный сравнительный анализ подтвердил, что эффективность электролизеров критически зависит от их конструкции и рабочих параметров. Эксперименты с бездиафрагменным щелочным (монополярным) электролизером выявили его принципиальные ограничения: установка генерирует смесь водорода и кислорода без возможности разделения, что снижает чистоту H_2 до $\leq 99.5\%$ из-за обратных реакций. Несмотря на линейный рост выхода газа с увеличением тока, система демонстрирует высокое энергопотребление (25–48 кВт·ч/л) и минимальную чувствительность к температуре. При этом перегрев свыше $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ усугубляет проблемы – усиливает коррозию электродов и испарение электролита, а максимальная скорость электролиза не превышает скромных $3.51 \cdot 10^{-9}$ моль/(см²·с).

В контрасте биполярный РЕМ-электролизер доказал промышленную перспективность. Благодаря протонообменной мембране, исключающей смешивание газов, он обеспечивает чистоту водорода $>99.9\%$. Особенно значимы его показатели в диапазоне $55\text{--}65\text{ }^{\circ}\text{C}$: здесь скорость электролиза достигает $6.41 \cdot 10^{-9}$ моль/(см²·с) (на 83% выше щелочного аналога), а удельное энергопотребление падает до 5.882 кВт·ч/л при производительности 0.429 л/ч H_2 . Эта технология также подтвердила соответствие законам Фарадея и устойчивость к перепадам давления, хотя дегидратация мембраны при $>75\text{ }^{\circ}\text{C}$ повышает омические потери.

Таким образом, щелочные системы пригодны лишь для исследовательских задач, тогда как РЕМ-электролизеры оптимальны для промышленного масштабирования. Их компактность, устойчивость к нагрузкам и экологичность делают их идеальными для интеграции с ВИЭ. Для развития «зелёной» водородной энергетики целесообразно сфокусироваться на снижении стоимости РЕМ-систем (через замену дорогих катализаторов), исследовании гибридных решений

(например, твердооксидных электролизеров для АЭС) и разработке отраслевых стандартов безопасности. В итоге PEM-технология демонстрирует все признаки экологичного и масштабируемого решения, соответствующего глобальным целям декарбонизации.

Список литературы / References

- [1] Тарасов Б. П., Лотоцкий М. В. Водород для производства энергии: проблемы и перспективы, *АЭЭ*, 2006, № 8.[1] [Tarasov B. P., Lototskii M. V. Hydrogen for Energy Production: Problems and Prospects, *AEE*, 2006, No. 8 (in Russian)]
- [2] Hae-Gu P., Sang-Young H., Ki-Won J., Yesol W., Myung-June P., Seok K. K. Bench-Scale Steam Reforming of Methane for Hydrogen Production, *Catalyst*, 2019, 9, 615, pp. 2–14.
- [3] Филимонова А. А., Чичиров А. А., Чичирова Н. Д., Филимонов А. Г., Печенкин А. В. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане, *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2020, 22(6), 79–91.[Filimonova A. A., Chichirov A. A., Chichirova N. D., Filimonov A. G., Pechenkin A. V. Prospects for the Development of Hydrogen Energy in Tatarstan, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki*, 2020, 22(6), 79–91 (in Russian)]
- [4] Шафиев Д. Р., Трапезников А. Н., Хохонов А. А., Агарков Д. А., Бредихин С. И., Чичиров А. А., Субчева Е. Н. Методы получения водорода в промышленном масштабе. Сравнительный анализ, *Успехи в химии и химической технологии*, 2020, № 12 (235). [Shafiev D. R., Trapeznikov A. N., Khokhonov A. A., Agarkov D. A., Bredikhin S. I., Chichirov A. A., Subcheva E. N. Methods of Hydrogen Production on an Industrial Scale. Comparative Analysis, *Uspekhi v Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2020, no. 12 (235) (in Russian)]
- [5] Kwasi-Effah C. C., Obanor A. I., Aisien F. A. A review on electrolytic method of hydrogen production from water, *American Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2015, 1(2), 51–57.
- [6] Zeng K., Zhang D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(3), 307–326.
- [7] Kundu A. et al. An overview of cathode material and catalysts suitable for generating hydrogen in microbial electrolysis cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(4), 1745–1757.
- [8] Григорьев С. А., Порембский В. И., Фатеев В. Н., Самсонов Р. О., Козлов С. И. Получение водорода электролизом воды: современное состояние, проблемы и перспективы, *Транспорт на альтернативном топливе*, 2008, 3(3). [Grigoriev S. A., Porembskii V. I., Fateev V. N., Samsonov R. O., Kozlov S. I. Hydrogen Production by Water Electrolysis: Current Status, Problems and Prospects, *Transport na Alternativnom Toplive*, 2008, 3(3) (in Russian)]
- [9] Кулешов В. Н., Курочкин С. В., Кулешов Н. В., Гаврилюк А. А., Пушкарева И. В., Климова М. А., Григорьева О. Ю. Щелочной электролиз воды с анионообменными мембранами и катализаторами на основе никеля, *Электрохимия*, 2023, 59(11), 735–750. [Kuleshov V. N., Kurochkin S. V., Kuleshov N. V., Gavriluk A. A., Pushkareva I. V., Klimova M. A., Grigorieva O. Yu. Alkaline Water Electrolysis with Anion-Exchange Membranes and Nickel-based Catalysts, *Elektrokhimiya*, 2023, 59(11), 735–750 (in Russian)]
- [10] Zhou Y. et al. Advances in ionogels for proton-exchange membranes, *Science of the Total Environment*, 2024, 921, 171099.
- [11] Jiao K. et al. Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells, *Nature*, 2021, 595(7867), 361–369.

[12] Milewski J. et al. Hydrogen production in solid oxide electrolyzers coupled with nuclear reactors, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(72), 35765–35776.

[13] Белобородов С. С., Гашо Е. Г., Ненашев А. В. *Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества* [Электронный ресурс]. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2021. – 151 с. [Beloborodov S. S., Gasho E. G., Nenashev A. V. *Renewable Energy Sources and Hydrogen in the Energy System: Problems and Advantages* [Electronic resource]. Monograph. – St. Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii, 2021, 151 p. (in Russian)]

[14] Nechache A., Hody S. Alternative and innovative solid oxide electrolysis cell materials: A short review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 149, 111322.

[15] Rizwan M., Alstad V., Jäschke J. Design considerations for industrial water electrolyzer plants, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(75), 37120–37136.

**Math Modeling.
Numerical Experiment**

**Математическое
моделирование.
Численный
эксперимент**

EDN: ZEBTZN

УДК 621.039.74

Safety Analysis of Using the Container for Radioactive Graphite of RBMK-1000 Reactors

Aleksey V. Ivshin*, Aleksandr A. Kalyutik,
Victor S. Modestov and Filipp V. Shadelko

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russian Federation*

Received 18.11.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 11.04.2026

Abstract. Ensuring the safe handling of irradiated graphite moderators during the decommissioning of RBMK-1000 reactor nuclear power units is an important task. To achieve it, a design of a special container intended for the transportation of irradiated graphite moderators from nuclear power plant sites is proposed. The results of numerical simulations of the main accident tests of the container, as specified by the IAEA safety standards, are presented: free fall from a height of 9 meters onto a rigid surface and free fall from a height of 1 meter onto a steel rod. These tests allow for the evaluation of the container's safety, its ability to withstand impact loads and maintain its structural integrity. The calculations indicate that the proposed container design meets safety requirements and maintains its overall integrity and leak tightness.

Keywords: transport and packaging set, irradiated blocks of graphite moderator, radioactive material, design accident, safety, tightness, numerical modeling, ultimate deformation, residual deformation due to destruction.

Citation: Ivshin A. V., A. A. Kalyutik A. A., Modestov V. S. and Shadelko F. V. Safety Analysis of Using the Container for Radioactive Graphite of RBMK-1000 Reactors. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 504–514. EDN: ZEBTZN



Анализ обеспечения безопасности использования контейнера для радиоактивного графита реакторов РБМК-1000

А. В. Ившин, А. А. Калютник,
В. С. Модестов, Ф. В. Шаделко

*Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Российская Федерация, Санкт-Петербург*

Аннотация. Обеспечение безопасного обращения с облучённым графитовым замедлителем на этапе вывода из эксплуатации атомных энергоблоков с реакторами РБМК-1000 является важной задачей. Для этого предлагается вариант разработки специального контейнера, предназначенного для вывоза облученного графитового замедлителя с площадок АЭС. Представлены результаты численного моделирования аварийных ситуаций, позволяющие оценить безопасность использования контейнера. В результате расчетов получено, что рассматриваемая конструкция контейнера соответствует требованиям безопасности и сохраняются его общая целостность и герметичность.

Ключевые слова: транспортный упаковочный комплект, облученные блоки графитового замедлителя, радиоактивный материал, проектная авария, безопасность, герметичность, численное моделирование, предельная деформация, остаточная деформация разрушения.

Цитирование: Ившин А. В. Анализ обеспечения безопасности использования контейнера для радиоактивного графита реакторов РБМК-1000 / А. В. Ившин, А. А. Калютник, В. С. Модестов, Ф. В. Шаделко // Журн. сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 504–514. EDN: ZEBTZN

Введение

На сегодняшний день, после остановки первого и второго энергоблоков с реактором РБМК-1000 Ленинградской атомной станции, перед специалистами и инженерами встала важная задача, связанная с перевозкой и хранением облученных блоков графитового замедлителя [1–4]. Этот реактор, обладающий высокой электрической мощностью в 1000 МВт, имеет общую массу графита 1700 т, который используется в активной зоне (АЗ) и отражателе нейтронов. АЗ выполнена в форме цилиндра высотой 7 м и диаметром 12 м, состоит из графитовых блоков массой 1400 т, выполняющих роль замедлителя. АЗ окружена боковым отражателем нейтронов толщиной 1 м, верхним и нижним отражателями по 0,5 м, собранными из графитовых блоков массой 300 т.

В настоящий момент облученные блоки находятся на территории станции, и для их безопасного вывоза требуется разработка специализированных контейнеров – транспортно-упаковочных комплектов (ТУК), которые должны не только обеспечить защиту, но и соответствовать строгим требованиям безопасности для хранения и транспортировки радиоактивных материалов. В качестве решения этой проблемы предлагается реализовать проект конструкции ТУК-Графит с литым корпусом из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) [5, 6]. В данной статье приведены результаты исследования, которые ранее были апробированы и опубликованы в материалах международной научно-практической конференции «Современные технологии и экономика в энергетике» [7]. В работе выполнен анализ по обоснованию радиационной без-

опасности и экологической приемлемости этого контейнера, рассматривается соответствие проектируемого контейнера требованиям безопасности в условиях потенциальных аварийных сценариев.

Методы и материалы

На основе опыта проектирования контейнеров [8–15] и удобства их перевозки предлагаемая конструкция имеет прямоугольную форму с крышкой на шпильках. Внутренние размеры контейнера 1250x1250x864 мм, в нём можно разместить 35 графитовых блоков общей массой около 1,8 т. Схема размещения блоков и размеры контейнера представлены на рис. 1. Габаритные размеры и дополнительные сведения для ТУК-Графит приведены в табл. 1.

Способность выдерживать проектные аварийные условия является важной особенностью контейнеров, предназначенных для транспортировки радиоактивных материалов. Поэтому разрабатываемый ТУК-Графит должен успешно справляться с двумя основными сценариями возможных аварий, оговоренных в федеральных нормах и правилах в области использования

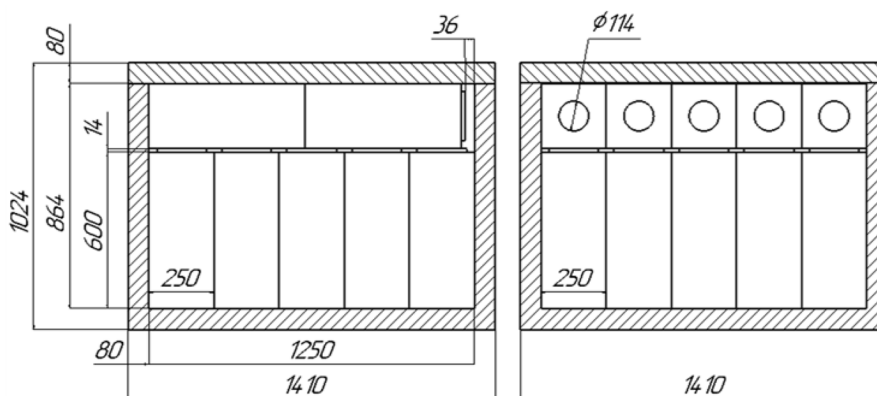


Рис. 1. Схема загрузки контейнера 35 графитовыми блоками, размеры в мм

Fig. 1. Loading scheme of the container with 35 graphite blocks, dimensions in mm

Таблица 1. Размеры и сведения транспортного упаковочного контейнера

Table 1. Dimensions and details of the transport packaging container

Характеристика	Размер, мм
Размер корпуса контейнера в поперечном сечении	1410x1410
Высота контейнера	1024
Толщина стенок корпуса (материал – ВЧШГ)	80
Воздушный зазор между корпусом и графитом	1–5
Размер корпуса графитового блока в поперечном сечении	250x250
Диаметр полости (отверстия) в центре блока	114
Толщина воздушных щелей между блоками	2

атомной энергии¹. Таким образом, требуется провести испытания, имитирующие свободное падение объекта с высоты 9 м на жесткое основание и с высоты 1 м на сплошной стержень, установленный вертикально на жестком основании. Такой стержень должен быть изготовлен из мягкой стали в форме цилиндра, иметь высоту 200 мм и диаметр сечения 150 мм.

Анализ обеспечения безопасности использования контейнера ТУК-Графит выполнен с помощью численного моделирования различных сценариев падения контейнера в программной среде SIMULIA Abaqus, реализующей метод конечно-элементного анализа.

Конечно-элементная модель ТУК-Графит и стержня имеет 29 484 элемента и 39 368 узлов, она представлена на рис. 2. Моделирование выполнено с помощью восьмиузловых линейных элементов, имеющих 3 степени свободы в каждом узле.

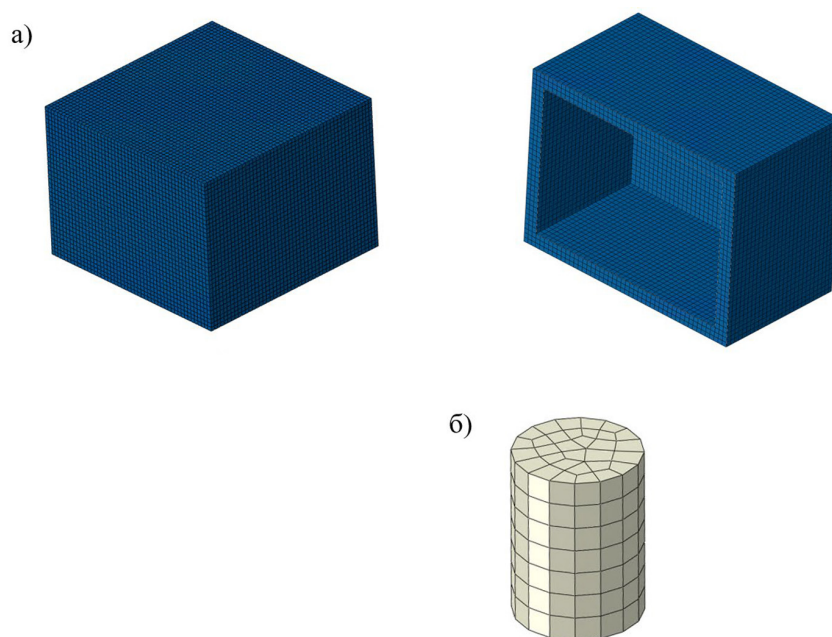


Рис. 2. Конечно-элементная модель ТУК-Графит (а) и стержня, на который падает контейнер (б)

Fig. 2. Finite element model of TPS-Graphite (a) and the pin on which the container falls (b)

Результаты проведенного моделирования существенно зависят от выбора пластических свойств материалов, интерпретаций поведения конструкции, что, в свою очередь, влияет на точность прогноза деформаций и возможных повреждений. Для этого были проанализированы и выбраны физико-механические характеристики материалов, из которых предполагается изготовить контейнер и стержень. В качестве материала корпуса приняты свойства ВЧШГ (EN-GJS-400–18-LT EN 1563). Материал стержня выбран в соответствии с международными рекомендациями по перевозке радиоактивных материалов, подробно изложенными в Прави-

¹ НП-053–16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов". М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2016. 174 с.

лах МАГАТЭ, где предлагается использовать мягкую сталь с пределами текучести в диапазоне от 150 МПа до 280 МПа, и отношение предела текучести к пределу прочности не должно превышать 0,6². При соблюдении этих рекомендаций была выбрана широко распространенная сталь – сталь 20, свойства которой приняты согласно ПНАЭ Г-7–002–86³. Свойства выбранных материалов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Свойства материалов контейнера и стержня

Table 2. Properties of container and pin materials

Объект	Контейнер	Стержень
Материал	ВЧШГ	сталь 20
Модуль упругости, ГПа	162	212
Коэффициент Пуассона	0,25	0,3
Плотность, кг/м ³	7100	7850
Относительное удлинение, %	12	19
Условный предел текучести, МПа	230	245
Временное сопротивление, МПа	330	470

Оценка целостности конструкции контейнера и его способность сохранять герметичность при различных механических воздействиях выполнена с помощью моделирования 7 сценариев его падения [7]:

- 1) на дно контейнера с высоты 9 м (рис. 3а);
- 2) на угол контейнера с высоты 9 м (рис. 3б);
- 3) на ребро контейнера с высоты 9 м (рис. 3в);
- 4) днищем контейнера на стержень с высоты 1 м (рис. 3г);
- 5) углом контейнера на стержень с высоты 1 м (рис. 3д);
- 6) под углом стенок контейнера на стержень с высоты 1 м (рис. 3е);
- 7) ребром контейнера на стержень с высоты 1 м (рис. 3ж).

Жесткое основание моделируется как аналитическая поверхность, а стержень жестко зафиксирован по нижней поверхности. Для расчета нагрузки была задана начальная скорость в зависимости от высоты падения (h) и ускорения свободного падения (g):

$$V_{initial} = \sqrt{2gh}. \quad (1)$$

В соответствии с формулой (1) при моделировании падения с высоты 9 м всем узлам конструкции задавалась скорость 13,29 м/с, а для падения с высоты 1 м – 4,43 м/с. Рассчитанные скорости характеризуют момент соударения ТУК-Графит с препятствием.

² Нормы безопасности МАГАТЭ. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов, 2019, 193 с.

³ ПНАЭ Г-7–002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М., Энергоатомиздат, 1989 г.

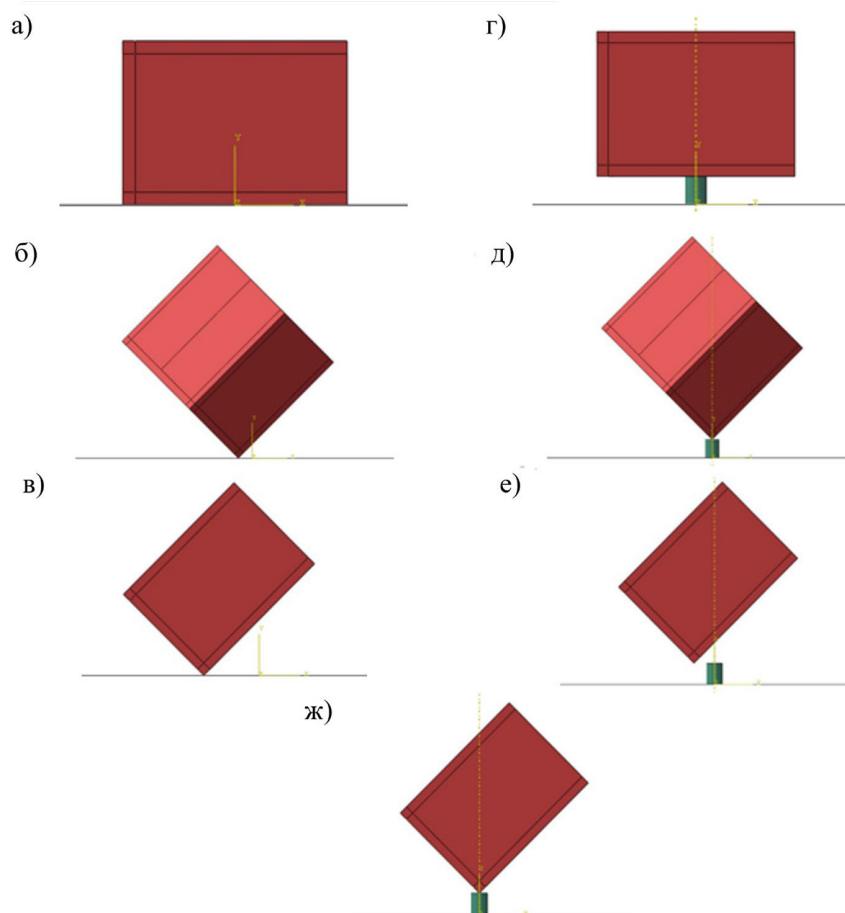


Рис. 3. Расчётные варианты удара: а) сценарий № 1, б) сценарий № 2, в) сценарий № 3, г) сценарий № 4, д) сценарий № 5, е) сценарий № 6, ж) сценарий № 7

Fig. 3. The calculated impact scenarios include: a) scenario № 1, b) scenario № 2, c) scenario № 3, d) scenario № 4, e) scenario № 5, f) scenario № 6, g) scenario № 7

Для оценки целостности конструкции в упругопластической области используется критерий оценки по остаточным деформациям растяжения⁴:

$$\varepsilon_{\text{пред}} = \ln \left(\frac{1}{1 - 0,01 \cdot \psi} \right), \quad (2)$$

где ψ – относительное сужение поперечного сечения образца после разрыва.

Предельная деформация разрушения для ВЧШГ в соответствии с формулой (2) составляет:

$$\varepsilon_{\text{пред}} = 6 \, \%.$$

В качестве условия обеспечения целостности элементов при значительных деформациях принимается:

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{пред}}.$$

⁴ Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Москва: Издательство иностранной литературы, 1954. 647 с.

Результаты и обсуждение

Численное моделирование деформаций контейнера при испытании его на проектные аварийные условия (7 сценариев падения), выполненное в упругопластической области работы конструкционных материалов, позволяет оценить повреждения конструкции.

Результаты расчетов и оценка сохранения герметичности корпуса представлены в табл. 3.

Особое внимание уделим сценариям, где остаточная деформация разрушения превышает предельную. Сценарий падения № 2, по результатам наших расчетов, оказался наиболее критичным для конструкции ТУК-Графит. В данном случае максимальные деформации локализованы в зоне сжатия на внешней границе контейнера и достигают уровня 50 %, что превышает предел разрушения для ВЧШГ, а на внутреннем сечении они не превышают 5 % (см. рис. 4), что свидетельствует о сохранении его целостности и герметичности.

В случае сценария падения № 5 также зафиксированы деформации, превышающие предельное значение ($\epsilon > 39\%$, $\epsilon_{\text{пред.}} = 6\%$), однако на остаточном сечении они не превышают 5 % (см. рис. 5), что указывает на то, что контейнер не подвергнется полному разрушению. В этом случае наблюдается лишь незначительное повреждение на внешнем углу, и контейнер по-прежнему способен предотвратить утечку или выброс радиоактивного содержимого после падения под углом. Аналогичная ситуация наблюдается для сценариев падения № 3 и № 7, где деформации, превышают предельное значение ($\epsilon > 20\%$, $\epsilon_{\text{пред.}} = 6\%$) на внешней границе, а внутреннее сечение контейнера сохраняется ($\epsilon < 5\%$).

Таблица 3. Оценка герметичности ТУК-Графит при падении

Table 3. Assessment of the tightness of the TPS-Graphite in case of a fall

Вариант падения	Скорость в момент удара V_{initial} , м/с	Остаточная деформация разрушения (ϵ), Max. eps, %	Герметичность
Сценарий № 1	13,29	$\epsilon < 1\%$	сохраняется
Сценарий № 2	13,29	на внешней границе: $\epsilon > 50\%$; на внутреннем сечении: $\epsilon < 5\%$	сохраняется
Сценарий № 3	13,29	на внешней границе: $\epsilon > 20\%$; на внутреннем сечении: $\epsilon < 5\%$	сохраняется
Сценарий № 4	4,43	$\epsilon < 2\%$	сохраняется
Сценарий № 5	4,43	на внешней границе: $\epsilon > 39\%$; на внутреннем сечении: $\epsilon < 5\%$	сохраняется
Сценарий № 6	4,43	$\epsilon < 1\%$	сохраняется
Сценарий № 7	4,43	на внешней границе: $\epsilon > 20\%$; на внутреннем сечении: $\epsilon < 5\%$	сохраняется
Допустимое значение $\epsilon_{\text{пред.}}$, %		6 %	—

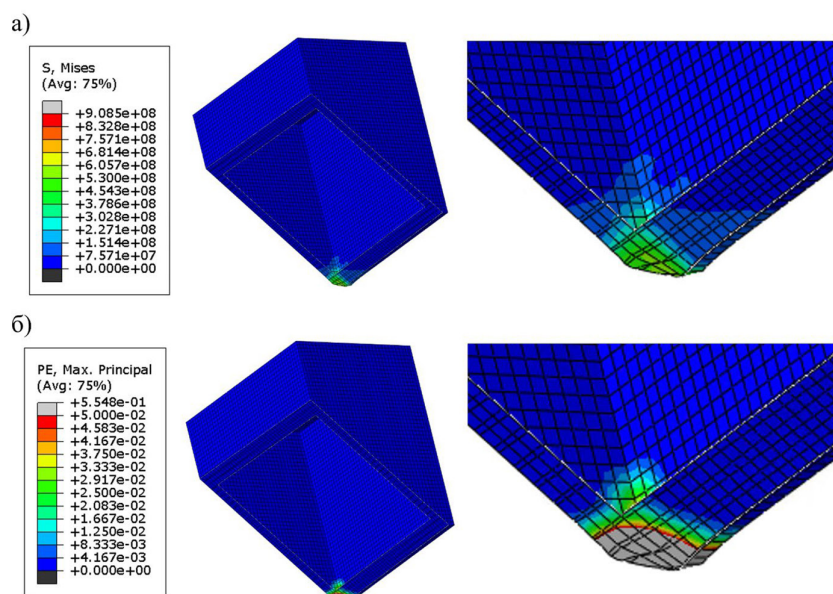


Рис. 4. Эквивалентные напряжения [Па] (а) и первые главные пластические деформации (б) для сценария № 2

Fig. 4. Equivalent stresses [Pa] (a) and first principal plastic deformations (b) for scenario № 2

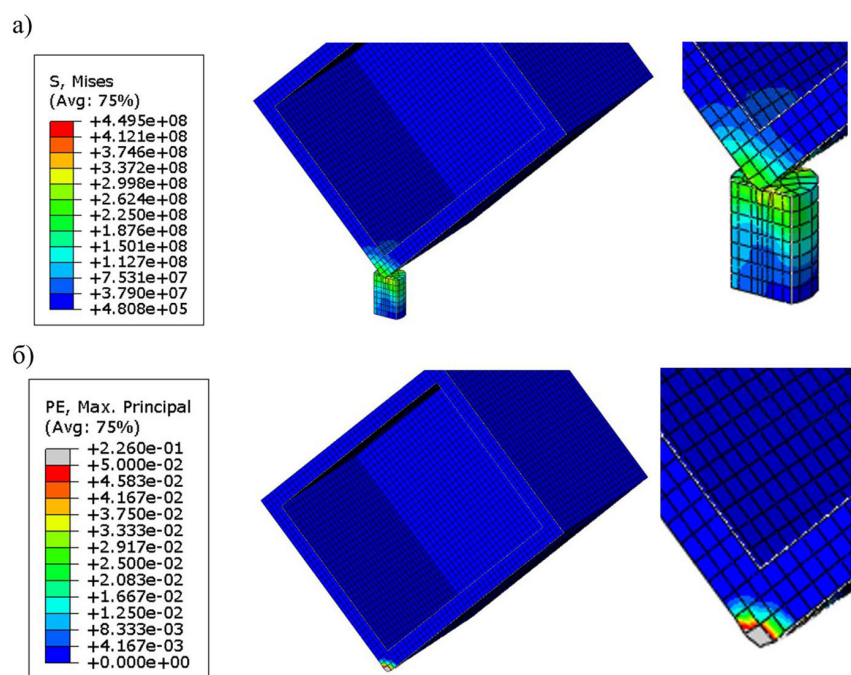


Рис. 5. Эквивалентные напряжения [Па] (а) и первые главные пластические деформации (б) для сценария № 5

Fig. 5. Equivalent stresses [Pa] (a) and first principal plastic deformations (b) for scenario № 5

В других рассмотренных сценариях падения также сохранены герметичность и целостность корпуса контейнера. В качестве дополнительной защиты рекомендуется разработка демпфирующего защитного устройства для снижения уровня максимальных перегрузок на поверхности.

Заключение

В ходе проведенного исследования было установлено, что в условиях аварийных ситуаций проектируемый ТУК-Графит, изготовленный из ВЧШГ, обеспечивает радиационную безопасность, сохраняя целостность и герметичность, удерживая радиоактивный материал внутри конструкции.

В моделируемых сценариях падения 1, 4 и 6 максимальные деформации не превышают допустимого значения. Возникшие в случаях 2, 3, 5 и 7 максимальные деформации на поверхности контейнера ($\epsilon > 20\text{--}50\%$) превышают предельный уровень разрушения ($\epsilon_{\text{пред}} = 6$), однако на остаточном сечении контейнера они не превышают 5 %, что свидетельствует о сохранении его целостности.

Рекомендуется проектирование демпфирующего защитного устройства для снижения уровня максимальных перегрузок.

Следующим этапом исследования планируется моделирование демпфирующего устройства и имитация заполнения контейнера графитовыми блоками.

Список литературы / References

- [1] Волков В. Г., Сафронова Н. Н., Морозов Ф. Т., Комаров Е. А., Зимин В. К., Былкин Б. К., Зверков Ю. А., Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Кан Р. И. О проблеме заключительного этапа обращения с облученным графитом блоков АЭС с водографитовыми реакторами. *Радиоактивные отходы*, 2021, 2(15), 10–20 [Volkov V. G., Safronova N. N., Morozov F. T., Komarov E. A., Zimin V. K., Bylkin B. K., Zverkov Yu., Pavlyuk A. O., Kotlyarevsky S. G., Kan R. I. On the Challenge Associated with the Final Stage of Irradiated Graphite Management from Water-Graphite NPP Reactor Units, *Radioactive Waste*, 2021, 2(15), 10–20 (in Russian)]
- [2] Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Кан Р. И., Волкова А. Г., Захарова Е. В., Комаров Е. А. Подходы к характеристике по гамма-излучающим радионуклидам графитовых блоков и их контейнеризации при демонтаже кладок УГР. *Радиоактивные отходы*, 2021, 3(16), 30–43 [Pavliuk A. O., Kotlyarevsky S. G., Kan R. I., Volkova A. G., Zakcharova E. V., Komarov E. A. Approaches to graphite block characterization by gamma radionuclides and their packaging during UGR stack dismantlement, *Radioactive Waste*, 2021, 3(16), 30–43 (in Russian)]
- [3] Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Риф А. Э., Кан Р. И., Загуменнов В. С., Падерин Е. С., Шешин А. А., Зеленецкая Е. П. Обзор отечественного опыта и подходов по извлечению графита из уран-графитовых реакторов. *Радиоактивные отходы*, 2023, 4(25), 35–54 [Pavliuk A. O., Kotlyarevsky S. G., Rif A. E., Kan R. I., Zagumennov V. S., Paderin E. S., Sheshin A. A., Zelenetskaya E. P. Overview of Russian experience and approaches providing graphite removal from uranium-graphite reactors, *Radioactive Waste*, 2023, 4(25), 35–54 (in Russian)]
- [4] Remeikis V., Grineviciute J., Duskesas G., Juodis L., Plukiene R., Plukis A. Review of modeling experience during operation and decommissioning of RBMK-1500 reactors. II. Radioactive waste management, *Nuclear Engineering and Design*, 2021, 380 (June), 111242.

[5] Сидоров Н.М., Ившин А.В., Федорович Е.Д. Расчет биологической защиты транспортного контейнера для облучённого графитового замедлителя ядерных реакторов типа РБМК-1000. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*, 2020, 1, 140–153 [Sidorov N.M., Ivshin A.V., Fedorovich E.D. Design of biological shield of a transport container for irradiated graphite moderator of nuclear reactor of RBMK-1000, *Problems of atomic science and technology. Series: nuclear and reactor constants*, 2020, 1, 140–153 (in Russian)]

[6] Федорович Е.Д., Калюттик А.А., Ившин А.В., Ананьев А.Н., Пашкевич Д.С., Плетнев А.А., Капустин В.В. Выбор конструкции транспортного контейнера для облученного графитового замедлителя ядерных реакторов типа РБМК-1000. *Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок*, 2019, 4 (18), 17–25 [Fedorovich E.D., Kalyutik A.A., Ivshin A.V., Ananyev A.N., Pashkevich D.S., Pletnev A.A., Kapustin V.V. The choice of structure of the transport container for irradiated graphite moderator of nuclear reactors RBMK-1000, *Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies*, 2019, 4 (18), 17–25 (in Russian)]

[7] Ившин А.В., Модестов В.С., Шаделко Ф.В. Моделирование аварийных ситуаций при транспортировке контейнера ТУК-Графит. *Современные технологии и экономика в энергетике: материалы Международной научно-практической конференции*, 2024, 129–131 [Ivshin A.V., Modestov V.S., Shadelko F.V. Modelirovaniye aviariynkh situatsiy pri transportirovke konteynera TUK-Grafit, *Sovremennyye tekhnologii i ekonomika v energetike: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 2024, 129–131 (in Russian)]

[8] Сорокин В.Т., Гатауллин Р.М., Бабкин А.Н., Корнюшкина О.В., Загородних А.А., Кан В.М., Грибанов И.И., Березников Ю.А. Контейнер защитный для хранения радиоактивных отходов 2 класса. *Радиоактивные отходы*, 2023, 4(25), 55–61 [Sorokin V.T., Gataullin R.M., Babkin A.N., Kornushkina O.V., Zagorodnikh A.A., Kan V.M., Gribanov I.I., Bereznikov Yu.N. Protective Storage Container for Radioactive Waste Class 2, *Radioactive Waste*, 2023, 4(25), 55–61 (in Russian)]

[9] Shen Y., Cheng K., Chou H. The structural and non-linear dynamic analysis for radioactive waste container, *Nuclear Engineering and Technology*, 2023, 8(55), 3010–3016.

[10] Jeong K., Choi M. Annals of Nuclear Energy Conceptual design of a container with drainage system for treating and transporting the radioactive wastes under water during decommissioning of nuclear facilities, *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 154, 108–110.

[11] Радченко М.В., Кормилицына Л.А., Моргулян В.Г., Матюшин Ю.И. Многоцелевые упаковки для радиоактивных отходов. *Радиоактивные отходы*, 2017, 1(114), 75–85 [Radchenko M.V., Kormilitsyna L.A., Matyunin Ju. I., Mogulyan V.G. Multi-purpose Packages for Radioactive Waste, *Radioactive Waste*, 2017, 1(114), 75–85 (in Russian)]

[12] Павлов Д.И., Сорокин В.Т., Гатауллин Р.М., Шарафутдинов Р.Б. Состояние и основные направления создания парка контейнеров для кондиционирования и захоронения радиоактивных отходов. *Ядерная и радиационная безопасность*, 2016, 3 (81), 18–29 [Pavlov D., Sorokin V., Gataullin R., Sharafutdinov R., The state and main directions of creating a fleet of containers for conditioning and disposal of radioactive waste, *Nuclear and radiation safety*, 2016, 3 (81), 18–29 (in Russian)]

[13] Сорокин В.Т., Демин А.В., Кашеев В.В., Ирошников В.В., Гатауллин Р.М., Медеяев И.А., Перегудов Н.Н., Шарафутдинов Р.Б. Контейнеры для радиоактивных отходов низ-

кого и среднего уровня активности. *Ядерная и радиационная безопасность*, 2013, 2 (38), 15–22 [Sorokin V.T, Demin A.V., Kascheyev V.V., Iroshnikov V.V., Gataullin R. M, Medeljaev I. A., Peregudov N.N., Sharafutdinov R. B. Containers for radioactive waste low and medium activity level, *Nuclear and radiation safety*, 2013, 2 (38), 15–22 (in Russian)]

[14] Штайнварц В. Контейнеры для окончательного удаления разных типов радиоактивных отходов. *Материалы Международного Форума «АТОМЭКСПО 2014»* – Режим доступа: http://2014.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Materials/6/V._SHtajnvarc.pdf[SHtajnvarc V. Containers for ultimate disposal of various types of radioactive waste, *ATOMEXPO 2014, Moscow* – Access: http://2014.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Materials/6/V._SHtajnvarc.pdf(in Russian)]

[15] Лушина Ю.Ю., Жабунина О.Ю., Паршукова Н.Ю. Обоснование соответствия транспортного упаковочного комплекта требованиям безопасности. *Глобальная ядерная безопасность*, 2019, 2(31), 7–14 [Lushina Yu. Yu., Zhabunina O. Yu., Parshukova N. Yu. Validation of the Transport Packing Set Compatibility to Safety Requirements, *Global nuclear safety*, 2019, 2(31), 7–14 (in Russian)]

Energy Systems and Complexes
Энергетические системы и комплексы

EDN: ZTSWYU

УДК 62–665.3

**Study of Thermal Characteristics and Elemental Composition
of Pulp Production By-Products and Municipal Solid Waste
for the Purpose of Their Energy Use**

**Victor K. Lyubov,
Ilya I. Tsypnyatov* and Viacheslav A. Yudin**
*Northern (Arctic) Federal University
named after M. V. Lomonosov
Arkhangelsk, Russian Federation*

Received 02.11.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 11.04.2026

Abstract. The thermal characteristics and elemental composition of pulp and paper industry by-products were studied: osprey, combustible materials from pulp and paper mill landfills, sewage sludge (SWS), various types of paper and their briquettes, bark and wood fuel (BWF), plastic, and ash generated during the combustion of BWF and plastic. The results of the study of the thermal characteristics of combustible materials from the landfills of two pulp and paper mills showed that they are distributed randomly and do not depend on the depth of the landfill. Therefore, when developing programs for their energy use, individual research is necessary to determine their thermal performance and the available total energy potential. A comprehensive analysis of personal protective masks was performed, demonstrating that three-layer masks made of non-woven polymeric materials have a very high specific heat of combustion and yield of volatile substances. The specific heat of combustion of two-layer cotton masks is almost three times lower, and the yield of volatile substances is also significantly lower. The results obtained for two-layer masks are close to those typical for paper materials made from wood pulp. It is shown that promising options for plastic recycling include its incorporation into wood and paper briquettes, as well as pellets. Recommendations are provided for the energy recovery of various types of waste, including a forecast of possible contamination of layered combustion chambers. **Keywords:** cellulose sludge, sewage sludge, municipal solid waste, energy recovery, landfill disposal, elemental composition, hazardous substances, combustion chamber.

Keywords: cellulose sludge, sewage sludge, municipal solid waste, energy recovery, landfill storage, elemental composition, harmful substances, combustion chamber.

Acknowledgements. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSRU-2024–0007.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: ilya.tsypniatov@list.ru

Citation: Lyubov V.K., Tsygnyatov I.I., Yudin V.A. Study of Thermal Characteristics and Elemental Composition of By-Products of Pulp Production and Municipal Solid Waste for the Purpose of Their Energy Use. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 515–529. EDN: ZTSWYU



Исследование теплотехнических характеристик и элементного состава побочных продуктов целлюлозных производств и твердых коммунальных отходов с целью их энергетического использования

В. К. Любов, И. И. Цыпнятов, В. А. Юдин
*Северный (Арктический) федеральный
университет имени М. В. Ломоносова
Российская Федерация, Архангельск*

Аннотация. Исследованы теплотехнические характеристики и элементный состав побочных продуктов ЦБП: скопа, горючих материалов со свалок ЦБК, осадка сточных вод (ОСВ), различных видов бумаги и брикетов из них, кородревесного топлива (КДТ), пластика и золы, образующейся при сжигании КДТ и пластика. Результаты исследования теплотехнических характеристик горючих материалов со свалок двух предприятий ЦБП показали, что они распределены хаотично и какой-либо зависимости от глубины свалки не обнаружено, поэтому при разработке программ их энергетического использования необходимо выполнение индивидуальных исследовательских работ по определению их теплотехнических показателей и располагаемого суммарного энергетического потенциала. Выполнен комплексный анализ для индивидуальных защитных масок, показано, что трехслойные маски из нетканых полимерных материалов имеют очень высокую удельную теплоту сгорания и выход летучих веществ. Удельная теплота сгорания двухслойных масок из хлопчатобумажных материалов почти в три раза меньше, существенно меньше и выход летучих веществ. Результаты, полученные для двухслойных масок, близки к значениям, характерным для бумажных материалов из древесной целлюлозы. Показано, что перспективным направлением утилизации пластика является его введение в качестве одного из компонентов в древесные и бумажные брикеты, а также гранулы. Даны рекомендации по энергетической утилизации различных видов отходов с прогнозом возможного загрязнения слоевых топочных камер.

Ключевые слова: целлюлозный скоп, осадок сточных вод, твёрдые коммунальные отходы, энергетическая утилизация, складирование на свалках, элементный состав, вредные вещества, топочная камера.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024–0007.

Цитирование: Любов В. К. Исследование теплотехнических характеристик и элементного состава побочных продуктов целлюлозных производств и твердых коммунальных отходов с целью их энергетического использования / В. К. Любов, И. И. Цыпнятов, В. А. Юдин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 515–529. EDN: ZTSWYU

Введение

В настоящее время одна из важнейших проблем, с которой сталкиваются многие производ-ства, в том числе целлюлозно-бумажные комбинаты и предприятия по переработке макулатуры,

является проблема загрязнения окружающей среды различными отходами. В технологическом цикле целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) и особенно предприятий по переработке макулатуры образуется значительное количество отходов.

Макулатура является важной сырьевой составляющей при производстве картона, одна тонна макулатуры заменяет 3,5 м³ древесины, экономит 300–800 кВт·ч электроэнергии и сокращает на 50 % объем потребляемой воды. Однако при её переработке образуется значительное количество отходов, которые в своём составе содержат полиэтиленовые пленки, пластик, упаковочные ленты и другие полимерные материалы. Данная смесь является характерным отходом различных современных производств. Кроме того, образуется значительное количество скопа в сточных водах данных предприятий.

Скоп образуется в результате технологической обработки макулатуры в воде для выделения из нее компонентов, пригодных к повторному использованию при изготовлении картона. Мелко-дисперсные включения, не способные участвовать в повторном использовании в технологическом процессе, попадают в сточные воды предприятия и в последующем улавливаются в очистных сооружениях, где после частичного обезвоживания на пресс-фильтрах направляются на утилизацию, как правило, на полигоны твёрдых бытовых отходов. Массовая доля скопа в суммарном количестве образующихся отходов для некоторых предприятий близка к 0,7. В скопе содержатся различные химические соединения, оставшиеся от технологического процесса и поступающие с бытовыми стоками.

Важной проблемой производств по переработке макулатуры является загрязнение окружающей среды отходами полимерных материалов – пластмасс на основе полиэтилена (ПЭ) и полипропилена (ПП). Массовая доля отходов с примесью различных видов пластика и полиэтилена для некоторых предприятий данной отрасли составляет около 0,17 в суммарном количестве образующихся побочных продуктов. Из всех отходов именно они становятся одним из основных загрязняющих факторов благодаря их значительному накоплению при переработке макулатуры, а также при реализации ряда других технологических процессов [1, 2, 3–6]. Согласно данным Программы ООН по окружающей среде, проблема пластикового загрязнения мира в последнее время резко обострилась.

Основным методом утилизации отходов в РФ является их складирование на полигонах, при этом предприятия ЦБП и предприятия по переработке макулатуры традиционно имеют свои площадки для складирования побочных продуктов производства. Обычно их называют короотвалами, или свалками. За длительный период эксплуатации данных предприятий толщина горячего слоя отходов в короотвалах может составлять до 35 м и более. Для разработки программ энергетического использования данных горючих материалов необходимо выполнение индивидуальных исследовательских работ по определению их теплотехнических показателей, элементного состава и определению располагаемого суммарного энергетического потенциала для каждого предприятия.

Материалы и методы исследования

Для определения элементного состава исследуемых материалов использовался спектрометр рентгенофлуоресцентный EDX-8000 и специализированный анализатор EuroVector EA-3000. Теплотехнические характеристики испытуемых материалов и золы определяли со-

гласно ГОСТ Р 54186–2010, ГОСТ Р 54211–2010, ГОСТ Р 54185–2010 и ГОСТ Р 54184–2010. Удельную теплоту сгорания измеряли с помощью калориметрической бомбы ИКА С 2000 Basic Version 2 с жидкостным криотермостатом LOIP FT-216–25 в соответствии с ГОСТ 147–95. Гранулометрический состав очаговых остатков исследовался с помощью ситового метода и анализатора Retzsch AS 200 Control в соответствии с требованиями ГОСТ 2093–82. Вся обработка экспериментальных данных проводилась с помощью многомодульного программно-методического комплекса [7], при этом КПД брутто определялся по уравнению обратного баланса [8].

Результаты и их обсуждение

Исследование теплотехнических характеристик скопа, выполненное для четырех предприятий РФ, позволило получить следующие данные: относительная влажность на рабочую массу $W^r = 68,30\text{--}87,45\%$; зольность $A^r = 2,10\text{--}0,23\%$; $S^r = 0,10\text{--}0,06\%$; низшая теплота сгорания $Q_i^r = 3,94\text{--}0,17$ МДж/кг и выход летучих веществ на горючую массу $V^{\text{daf}} = 90,49\text{--}81,10\%$. Таким образом, данный сопутствующий продукт имеет чрезвычайно большую влажность, однако при ее снижении до значений менее 60,0 % может быть использован в качестве топлива для получения тепловой и/или электрической энергии.

Теплотехнические показатели, полученные для отходов, состоящих из различных видов пластических материалов, при выполнении исследовательских работ для четырех промышленных предприятий приведены в табл. 1. Следует отметить, что данные отходы имеют высокую удельную теплоту сгорания на горючую массу, значения которой снижаются более чем в три раза для рабочей массы за счет высокой влажности. Однако необходимо отметить, что данная влага не является гигроскопичной, она сконцентрирована на поверхности полимерных материалов. Содержание серы в данных отходах мало, зольность незначительная, для них характерен очень высокий выход летучих веществ. Пластик характеризуется повышенным содержанием углерода и водорода. Таким образом, пластические материалы имеют достаточно

Таблица 1. Теплотехнические показатели отходов, состоящих из различных видов пластических материалов

Table 1. Thermal performance of waste consisting of various types of plastic materials

Величина	Условные обозначения единиц измерения	Рабочая масса	Сухая масса	Горючая масса
Влажность	$W, \%$	56,87–65,80		
Зольность	$A, \%$	0,79–1,51	2,16–3,50	
Теплота сгорания низшая	$Q, \text{МДж/кг}$	10,13–13,09		33,02–34,74
Теплота сгорания высшая	$Q, \text{МДж/кг}$			36,08–37,39
Сера	$S_{\text{общ}}, \%$	0,02–0,07	0,05–0,20	
Водород	$H, \%$	3,77–4,85	10,30–13,30	10,53–13,62
Выход летучих веществ	$V, \%$	34,32–40,64	94,04–94,74	96,29–97,64
Коксовый остаток		Порошкообразный		

приемлемые теплотехнические характеристики для их энергетического использования. Одним из возможных направлений является их сжигание в смеси с кородревесным топливом (КДТ) в котлоагрегатах, оборудованных топками с наклонно-переталкивающими решетками. Другим перспективным направлением является введение пластика в качестве одного из компонентов в древесные брикеты или пеллеты.

Для прогнозирования работы котлоагрегата при сжигании топливных смесей КДТ с пластиком были выполнены исследования элементного состава КДТ, пластика и золы, образующейся при его сжигании. Основные элементы, входящие в их состав, приведены в табл. 2. В соответствии с рекомендациями [8] топлива с содержанием в золе $\text{CaO} \geq 13,0\%$ относятся к сильно загрязняющим. Для пластика содержание в золе $\text{CaO} = 29,74\%$, т.е. более чем в два раза превышает пороговое значение. При этом суммарное содержание оксидов щелочноземельных металлов $\text{CaO} + \text{MgO} = 29,74 + 2,75 = 32,49\%$. В золе исследованных проб пластика наблюдается очень маленькое содержание оксида щелочного металла $\text{K}_2\text{O} = 0,70\%$ (табл. 2), температура испарения для которого $\sim 900^\circ\text{C}$. Что является положительным фактором, так как именно окислы щелочных металлов вызывают образование прочных

Таблица 2. Элементный состав КДТ, пластика и золы, образующейся при его сжигании

Table 2. Elemental composition of KDT, plastic and ash formed during its combustion

Показатели	КДТ	Пластик	Показатели	Зола пластика
S, %	0,028–0,048	0,050–0,100	CaO, %	29,74
Fe, %	0,02–0,069	0,030–0,200	SiO ₂ , %	19,92
Ca, %	0,553–0,806	0,331–2,42	Al ₂ O ₃ , %	7,29
Ni, %	0,000–0,069	-	Fe ₂ O ₃ , %	4,42
Zn, %	0,017–0,020	0,001–0,005	MgO, %	2,75
Mg, %	0,088–0,152	0,026–0,110	SO ₃ , %	2,50
Al, %	0,039–0,061	0,077–0,300	K ₂ O, %	0,70
Si, %	0,134–0,152	0,099–0,220	MnO, %	0,092
K, %	0,178–0,435	0,007–0,010	ZnO, %	0,117
Ti, %	0,000–0,004	0,029–0,040	TiO ₂ , %	7,15
Cr, %	0,000–0,006	0,000–0,001	BaO, %	0,032
Mn, %	0,009–0,063	0,001–0,010	SrO, %	0,036
Cu, %	0,004–0,073	0,000–0,002	CuO, %	0,057
Cl, %	0,000–0,004	0,000–0,485	PbO, %	0,006
V, %	-	0,000–0,021	Cr ₂ O ₃ , %	0,024
Na, %	0,001–0,060	0,000–0,259	Rb ₂ O, %	0,004
Pb, %	-	-	NiO, %	0,016
Rb, %	-	-	ZrO ₂ , %	0,026
O, %	41,05–43,3	17,0–17,4	O, %	18,31
C, %	46,1–47,8	67,1–77,4	C, %	6,8
N, %	0,100–0,435	0,100–0,435	N, %	-
H, %	8,30–8,43	10,3–13,3	H, %	-

отложений на элементах наклонно-переталкивающей решетки и обмуровки топочной камеры.

Таким образом, при сжигании топливных смесей с большим содержанием пластика возможно интенсивное загрязнение наклонно-переталкивающей решетки, обмуровки топочной камеры и других элементов. Однако расчетный анализ показал, что на котлах, оборудованных наклонно-переталкивающей решеткой, имеющих трехступенчатую схему сжигания, с подачей уходящих дымовых газов под колосниковую решетку и в объем камеры сгорания, с рассредоточенным сопловым вводом вторичного и третичного воздуха, оборудованных двухходовыми дымогарными теплообменниками с охлаждаемыми поворотными камерами и воздухоподогревателями, возможно сжигание КДТ с добавкой пластика не более 20 % по массе. При этом низшая удельная теплота сгорания топливной смеси повышается почти на 14 % при относительной влажности КДТ 50,0 %. Расчетный анализ проводился для водогрейных котлов мощностью 8,0 МВт (рис. 1), оборудованных пневматической системой очистки поверхностей нагрева сжатым воздухом. Однако данные выводы должны быть подтверждены результатами промышленно-эксплуатационных испытаний при сжигании топливной смеси КДТ и пластика.

Для многих предприятий ЦБП и других отраслей промышленности актуальным вопросом является вовлечение в энергетический цикл отходов со свалок и отвалов. Исследование теплотехнических характеристик проб горючего материала, отобранного с шагом 5 м с по-

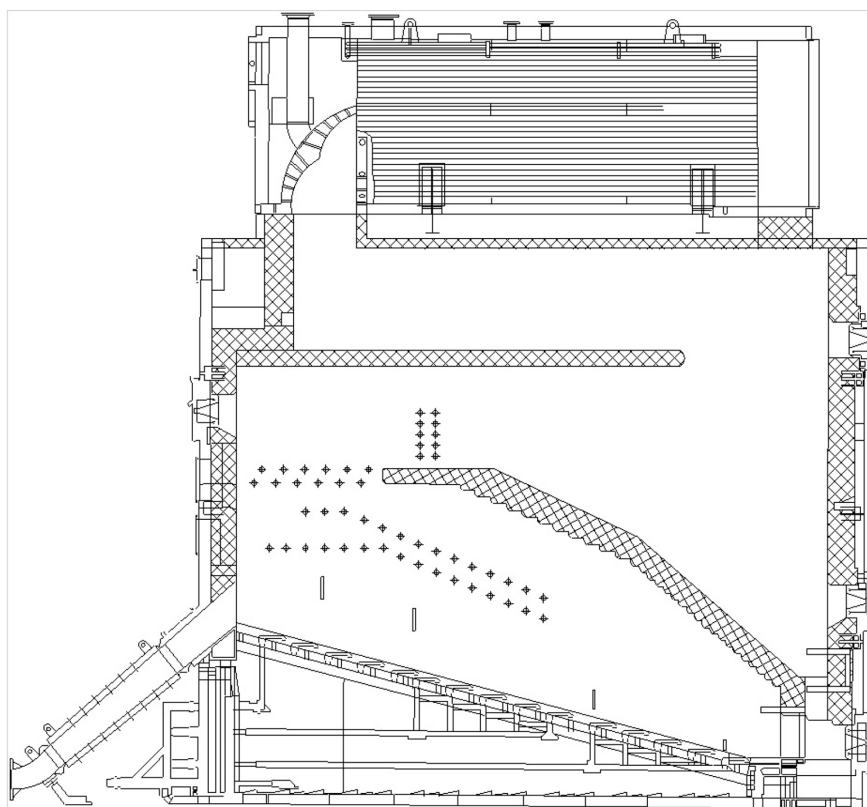


Рис. 1. Водогрейный котел PR-8000 (эскиз продольного разреза)

Fig. 1. Hot-water boiler PR-8000 (longitudinal section sketch)

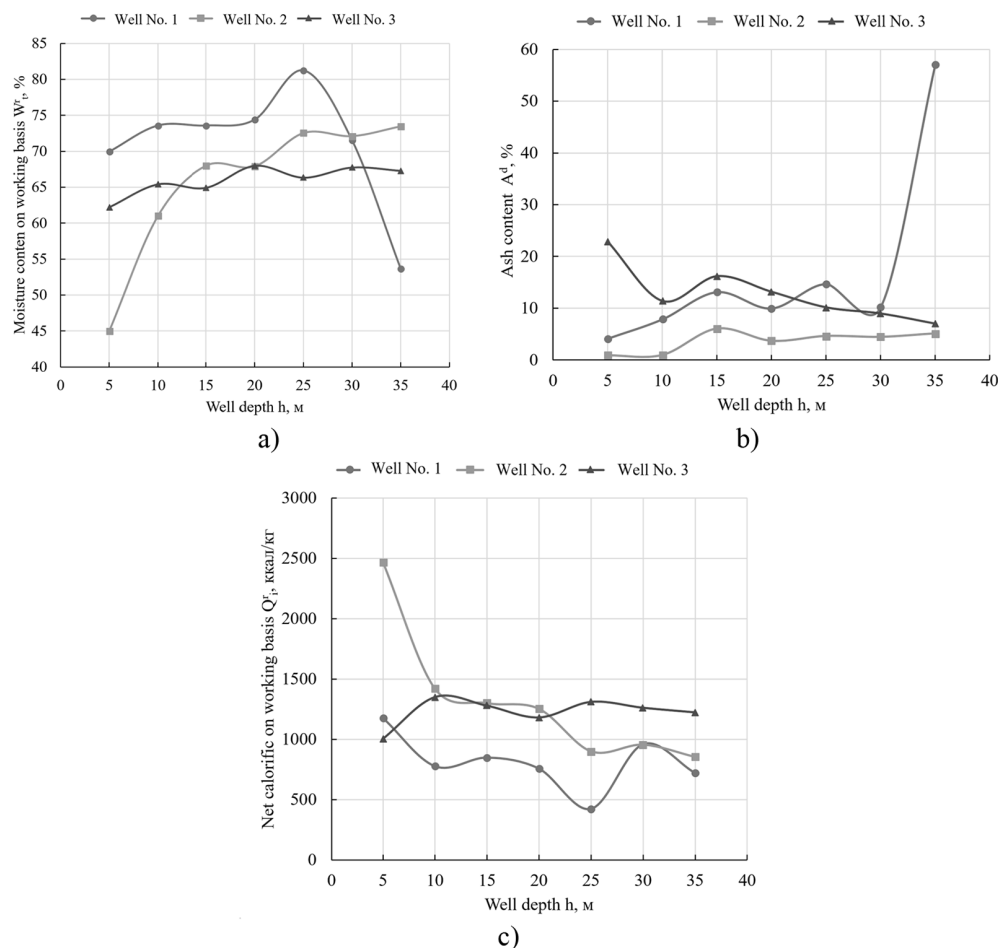


Рис. 2. Изменение общей влажности на рабочую массу (а), зольности на сухую массу (б) и низшей удельной теплоты сгорания на рабочую массу (с) по глубине короотвала

Fig. 2. Variation of total moisture content on working basis (a), ash content on dry basis(b), and net specific calorific value on working basis (c) with depth of the spoil bank

мощью трех скважин на глубину 35 м, показало отсутствие каких-либо общих закономерностей для Пермского ЦБК (рис. 2). Исходя из этого, для каждого предприятия ЦБП и предприятий по переработке макулатуры при разработке программы энергетического использования материалов свалок (МС) необходимо выполнение индивидуальных исследовательских работ по определению их теплотехнических показателей и определению располагаемого суммарного энергетического потенциала.

Ближние результаты были получены и для Архангельского ЦБК, где в пределах производственной площадки теоретически возможно извлечение и использование в качестве топлива отходов с двух свалок: со свалки (№ 1) площадью 10 га, которая эксплуатировалась в 1987–2003 гг., а затем была выведена из эксплуатации и рекультивирована, и со свалки (№ 2) площадью 22,5 га, которая эксплуатировалась с 2004 г., но в настоящее время выведена из эксплуатации.

Основные виды отходов, размещенные на свалках, которые можно использовать как топливо – кородревесные отходы, осадок сточных вод, целлюлозный скоп, непровар и другие.

Сбор образцов МС выполнялся сотрудниками АЦБК и автономной некоммерческой организации «Центр экологических инвестиций» (АНО «ЦЭИ»), а лабораторные исследования их теплотехнических характеристик (влажность, зольность, низшая теплота сгорания и др.) авторами данной статьи. На каждой свалке было пробурено по одной скважине, что позволило взять образцы отходов с глубины до 15 м. Кроме того, на каждой свалке в нескольких местах были отобраны пробы с поверхностного слоя толщиной 0–1,5 м.

Полученные результаты показали, что теплотехнические характеристики МС сильно меняются в зависимости от места взятия пробы, что свидетельствует о значительной неоднородности материала свалок. Так, для свалки № 1 минимальная относительная влажность (27,60 %) и максимальная (66,59 %) зафиксированы в разных точках поверхностного слоя. Близкое к наибольшему значению относительной влажности для этой свалки имеет проба с глубины 15 м – 64,38 %. Для свалки № 2 минимальное значение влажности (36,48 %) отмечено на глубине 3 м, максимальное (74,37 %) – в поверхностном слое. Похожая ситуация наблюдается и в отношении других теплотехнических характеристик рабочей массы МС.

В то же время было установлено, что низшая теплота сгорания горючей массы МС почти одинакова для всех исследованных проб – около 19,27 МДж/кг, что близко к значению данного параметра для ряда видов древесины. Это свидетельствует о том, что элементный состав горючей массы отходов за прошедший период хранения на свалке пока не претерпел значительных изменений, несмотря на протекающие процессы разложения органического вещества.

Таким образом, значения исследуемых характеристик МС (за исключением низшей теплоты сгорания на горючую массу) распределены хаотично, и какой-либо зависимости от глубины свалки не найдено. Оценка энергетического потенциала использования МС была выполнена АНО «ЦЭИ» с применением данных о количестве накопленных отходов и результатов лабораторных исследований. В расчетах с помощью математической модели распада первого порядка учитывалось, что количество горючего вещества на свалке с течением времени уменьшается в результате биологического разложения органических отходов. В соответствии с выполненными оценками энергетический потенциал находящихся на свалках отходов (по низшей теплоте сгорания на рабочую массу) к концу 2017 г. составил: 196 317 т у.т. для свалки № 1; 239 762 т у.т. для свалки № 2; 436 078 т у.т. суммарно для обеих свалок.

Следует отметить, что при исследовании теплотехнических характеристик лигнина с отвалов двух гидролизных заводов были сделаны похожие выводы [9].

Учитывая, что к настоящему моменту практика вывоза КДО, ОСВ, целлюлозного скопа, непровара и других отходов на свалки комбината прекращена, процессы разложения органического вещества на свалках не будут компенсироваться поступлением новой биомассы, энергетический потенциал складированных органических материалов будет снижаться с течением времени. Так, к концу 2035 г. расчетный энергетический потенциал на обеих свалках составит 343 670 т у.т.

Для определения путей и оптимальных методов энергетического использования ОСВ и целлюлозного скопа был исследован элементный состав для четырех предприятий РФ (табл. 3).

Традиционная утилизация твёрдых коммунальных отходов (ТКО), включая различные виды пластиковых материалов, путем их складирования на полигонах, бесспорно, приводит

Таблица 3. Элементный состав целлюлозного скопа и ОСВ на сухую массу

Table 3. Elemental composition of cellulose waste and OSB on a dry weight basis

Показатели	Скоп	ОСВ	Показатели	Скоп	ОСВ
S, %	0,060–0,170	0,530–0,674	Cr, %	0,001–0,002	0,000–0,002
Fe, %	0,123–0,420	0,283–0,630	Mn, %	0,005–0,020	0,046–0,140
Ca, %	1,740–3,100	6,020–8,46	Cu, %	0,000–0,005	0,000–0,011
Cr, %	0,000–0,002	0,000–0,002	Cl, %	0,000–0,070	0,001–0,060
Zn, %	0,004–0,005	0,017–0,100	V, %	0,000–0,003	0,009–0,010
Mg, %	0,083–0,100	0,120–0,267	Na, %	0,002–0,040	0,002–0,030
Al, %	0,120–0,284	0,240–0,300	O, %	43,60–48,20	31,80–44,60
Si, %	0,200–0,349	0,200–0,855	C, %	42,90–44,00	39,30–39,40
K, %	0,023–0,040	0,289–0,390	N, %	0,300–0,545	3,060–3,900
Ti, %	0,027–0,100	0,067–0,100	H, %	3,980–6,400	3,710–5,800

к загрязнению окружающей среды. Так как для большинства полимерных материалов просто не существует микроорганизмов, способных перерабатывать их в безопасные для окружающей среды вещества. Существует ряд методов вторичного применения ПЭ и ПП. Однако основным их недостатком является то, что механические свойства изделий из вторичных пластмасс ухудшаются на 15–20 % по сравнению с исходными изделиями. Кроме того, требуется предварительная сортировка таких отходов, что при значительном смешении различных сортов ПЭ и ПП трудно реализовать [10].

Существуют и другие методы утилизации или применения полимерных отходов, предполагающие их использование как готового продукта для других технологических процессов. К современным методам снижения накопления пластмасс относится и разработка ряда новых материалов, которые после истечения определенного времени эксплуатации начинают претерпевать физико-химические и биологические превращения, приводящие к их деструкции и разрушению [10, 11].

Одним из таких направлений является создание фоторазрушаемых полимеров. Другим способом сокращения накопления полимеров является создание биоразлагаемых полимеров, которые разлагаются с помощью специальных штаммов микроорганизмов, способных разрушать полимеры. Данные методы и способы борьбы с накоплением полимерных материалов имеют большую перспективу и уже достаточно активно реализуются, но, к сожалению, не могут быть массово использованы в настоящий период времени для решения существующей проблемы в условиях реальных производств [10, 11].

На состав ТКО повлияла и вспышка неизвестной пневмонии в городе Ухань в центральной части Китая (провинция Хубэй). Новая коронавирусная инфекция 2019-nCoV (COVID-19) очень быстро начала распространяться по всему миру. Уже в первой половине января 2020 г. стало известно, что она вышла за пределы Китая, случаи заболевания фиксировались в других странах [12, 13]. Глава ВОЗ заявил, что распространение нового коронавируса носит характер пандемии. Роспотребнадзор РФ рекомендовал носить маски в местах массового скопления людей, транспорте, на парковках и в лифтах. С 2 июля 2022 г. Главный государственный санитарный

врач РФ приостановил действие ряда антиковидных мер, в частности масочный режим. 5 мая 2023 г. ВОЗ объявила об окончании пандемии COVID-19. В настоящее время коронавирусная инфекция продолжает циркулировать среди людей, вызывая заболевание, которое не представляет высокой опасности и у большинства пациентов протекает в легкой форме ОРВИ.

Перечисленные события привели к существенному содержанию в ТКО защитных масок, что потребовало исследование их теплотехнических характеристик и элементного состава. Результаты, полученные для двух наиболее широко применяемых видов индивидуальных масок, – трехслойная маска (гармошка) из нетканых полимерных материалов и двухслойная маска (многоцветная) из хлопчатобумажных материалов с добавками (без учета резинки), приведены (табл. 4). Полученные результаты показали, что трехслойные маски из нетканых полимерных материалов имеют очень высокую удельную теплоту сгорания и выход летучих веществ за счет большого содержания углерода и водорода. Удельная теплота сгорания двухслойных масок из хлопчатобумажных материалов почти в три раза меньше, существенно меньше и выход летучих веществ на горючую массу. Результаты, полученные для двухслойных масок, близки к значениям, характерным для бумажных материалов из древесной целлюлозы. Необходимо отметить, что в составе индивидуальных защитных масок обнаружено небольшое содержание хлора.

Учитывая, что в составе ТКО массовая доля бумаги и картона составляет примерно 21,0 % [5, 6], были выполнены исследования и для данных материалов (табл. 4). Полученные результаты показали, что одним из возможных направлений энергетического использования отходов бумажного производства является изготовление бумажных брикетов (рис. 3), имеющих достаточно большую прочность и кажущуюся плотность до 1,0 г/см³ и более. Исследованный брикет получен из обрезков влагопрочной, оберточной, кондитерской упаковочной, пергаментной бумаги и основы для пергамента. При этом как для брикета, так и для его составляющих со-

Таблица 4. Основные характеристики некоторых компонентов ТКО на аналитическую (выход летучих на горючую) массу

Table 4. Main characteristics of some MSW components for analytical (volatile content per combustible) mass

Показатели	Трехслойная маска	Двухслойная маска	Бумажная основа для производства пергамента	Влагопрочная бумага	Пергамент	Бумажный брикет
Влажность, %	0,1	4,33	4,30	4,38	4,16	4,55
Зольность, %	0,08	0,38	0,58	0,49	0,44	1,97
Углерод, %	85,51	40,85	40,13	40,12	40,12	39,90
Водород, %	13,087	9,52	6,03	6,03	6,05	5,93
Кислород, %	0,64	44,87	48,86	48,88	49,13	48,39
Азот, %	0,55	0,17	0,08	0,08	0,08	0,08
Сера, %	0,007	0,007	0,021	0,020	0,021	0,020
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	42,74	14,54	15,35	15,41	15,39	14,94
Хлор, %	0,004	0,023	-	-	-	-
Выход летучих, %	97,83	92,21	88,82	90,87	86,10	89,22



Рис. 3. Бумажный брикет

Fig. 3. Paper briquette

держание в их золе СаО составило менее 8,0 %, т.е. в 1,65 раза меньше, чем пороговое значение [8] для сильно загрязняющих топлив. Содержание оксидов щелочных металлов ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) незначительное, менее 3,0 %. Таким образом, процесс сжигания бумаги и картона не будет сопровождаться загрязнением элементов топочной камеры и колосниковой решетки. Более того, перспективным направлением утилизации пластика может стать его введение в качестве одного из компонентов в бумажные брикеты.

Энергетическая утилизация ТКО. Наиболее распространенным способом утилизации твердых отходов различного происхождения является их термическая переработка. Однако в ЕС к термической переработке ТКО относится их утилизация только в том случае, если энергоэффективность предприятия, рассчитанная по методике [14], составляет не менее 0,65. В РФ критерии, определяющие термический способ переработки отходов, установлены [15]. Фактически современные предприятия, на которых реализована технология энергетической утилизации ТКО – это ТЭС, основным топливом которой, являются отходы. За рубежом такие ТЭС называют WtE (Waste-to-Energy Plant) [16]. В настоящее время количество предприятий по термической переработке ТКО приближается к трем тысячам, их общая производительность составляет около 590 млн тонн отходов в год. Планируется, что к 2033 г. их количество увеличится до 3100, а суммарная производительность превысит 700 млн тонн отходов [16]. Необходимо отметить, что около 500 WtE расположено в Европе. Кроме этого, ТЭС на ТКО широко распространены в США, Японии и Южной Корее [10, 16]. В России ТЭС на ТКО пока что не получили широкого развития. Доля термической утилизации отходов в РФ составляет менее 3,0 %.

К наиболее распространенным методам термической утилизации ТКО относятся: прямое сжигание в котлоагрегатах, оборудованных слоевыми топками с колосниковыми решетками или топками с кипящим слоем (КС); пиролиз – термическое разложение топлива в бескислородной среде или с низким содержанием кислорода, с последующим дожиганием горючих компонентов; газификация – высокотемпературный пиролиз, проводимый при температурах 1000–1200 °С с получением синтез-газа, используемого в энергетике, а также побочных соединений для химической промышленности.

Самой распространенной технологией на ТЭС является слоевое сжигание ТКО на механических колосниковых решетках, которая по сравнению с другими способами термической переработки имеет максимальную энергоэффективность при сопоставимом воздействии на окружающую среду [16, 17].

ТКО на 70–80 % состоят из горючих, биоразлагаемых компонентов, таких как биомасса, древесина, макулатура, картон, пластмасса, полимерные вещества и др. Благодаря содержанию этих компонентов ТКО рассматриваются как твердое топливо, по теплотворной способности сопоставимое с торфом и некоторыми марками бурых углей (5–7 МДж/кг). Однако ввиду содержания в ТКО таких элементов, как ртуть, марганец, цинк, свинец, сурьма, хлор, медь, барий и др., технологии их сжигания сопряжены со значительными эксплуатационными и капитальными затратами на очистку отходящих дымовых газов и сточных вод от загрязняющих токсичных веществ, образующихся в результате физико-химических процессов окисления компонентов ТКО и выделяющихся в атмосферу [10, 11, 14–18]. Тем не менее технологии энергетической утилизации позволяют сократить исходную массу ТКО в 5–10 раз, обеспечивают выработку тепловой и электрической энергии в промышленном масштабе и играют ключевую роль в решении проблемы санитарной очистки городов. Учитывая, что к настоящему времени разработаны и прошли длительную промышленную проверку технические и технологические решения, обеспечивающие эффективное энергетическое использование ТКО, это позволяет сформировать и обеспечить оптимальное решение проблемы переработки и утилизации ТКО.

Заключение

Определены теплотехнические характеристики и элементный состав побочных продуктов ЦБП: скопа, горючих материалов со свалок ЦБК, ОСВ, различных видов бумаги и смесей материалов на основе пластика. Показано, что скоп имеет относительную влажность до 87,5 %, а ОСВ до 79,1 %; для обеспечения их энергетического использования необходимо ее снижение до значений менее 60,0 %. Полученные результаты показали, что во всех исследованных образцах ОСВ и целлюлозного скопа присутствуют кальций, кремний и алюминий (табл. 3), поэтому нельзя исключать возможность шлакования элементов топочной камеры очаговыми остатками ввиду образования алюмосиликата кальция $3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$. В образцах целлюлозного скопа, особенно в ОСВ, обнаружено повышенное содержание кальция, что для скопа может являться следствием мелования бумажных изделий, а в случае ОСВ – еще и с использованием извести для нейтрализации биохимических процессов, протекающих при хранении, что приводит к образованию CaCO_3 . При анализе топочных процессов следует учитывать, что CaCO_3 и CaO способны связывать образующиеся при горении SO_2 и HCl с образованием соответственно хлорида и сульфата кальция. ОСВ характеризуются повышенным содержанием азота, что при высокотемпературном сжигании может приводить к дополнительной эмиссии NO_x .

Отходы, состоящие из различных видов пластических материалов, имеют высокую удельную теплоту сгорания на горючую массу, значения которой снижаются более чем в три раза для рабочей массы за счет высокой влажности. Влага пластических материалов не является гигроскопичной, она сконцентрирована на поверхности полимерных материалов. Содержание серы в данных отходах мало, зольность незначительна, для них характерен очень высокий вы-

ход летучих веществ, также они характеризуются повышенным содержанием углерода и водорода, атомное отношение C/H близко к углеводородам состава C_nH_{2n} .

Исследования теплотехнических характеристик горючих материалов со свалок ЦБК показало, что полученные результаты распределены хаотично и какой-либо зависимости от глубины свалки не обнаружено. Исходя из этого, для каждого предприятия при разработке программы энергетического использования МС необходимо выполнение индивидуальных исследовательских работ по определению их теплотехнических показателей и определению располагаемого суммарного энергетического потенциала.

Исследован элементный состав кородревесного топлива, пластика и золы, образующейся при его сжигании, ОСВ, целлюлозного скопа и различных видов бумаги. Показано, что содержание СаО в золе пластика более чем в два раза превышает пороговое значение, исходя из этого, пластик относится к сильно загрязняющим топливам. Однако учитывая его низкую зольность, возможно его сжигание в смеси с КДТ, при содержании пластика не более 20 % по массе, в котлах, оборудованных наклонно-переталкивающей решеткой, имеющих трехступенчатую схему сжигания, с подачей уходящих дымовых газов под колосниковую решетку и в объем камеры сгорания, с рассредоточенным сопловым вводом вторичного и третичного воздуха, оборудованных двухходовыми дымогарными теплообменниками с охлаждаемыми поворотными камерами и воздухоподогревателями. В золе брикета, полученного из пяти видов бумаги, и в золе его составляющих содержание СаО составило менее 8,0 %, т.е. в 1,65 раза меньше, чем пороговое значение для сильно загрязняющих топлив. Содержание оксидов щелочных металлов незначительное (менее 3,0 %). Что позволяет сделать вывод – сжигание бумаги и картона не будет вызывать загрязнение элементов топочной камеры и колосниковой решетки. Брикетирование обрезков бумаги позволяет получить энергетическое топливо, имеющее достаточно большую прочность, кажущуюся плотность до 1,0 г/см³ и более и по удельной теплоте сгорания незначительно уступающее древесным гранулам и брикетам. Кроме того, перспективным направлением является введение пластика в качестве одного из компонентов в древесные и бумажные брикеты, а также гранулы.

Исследования теплотехнических характеристик и элементного состава наиболее распространенных видов индивидуальных защитных масок показали, что трехслойные маски из нетканых полимерных материалов имеют очень высокую удельную теплоту сгорания и выход летучих веществ за счет большого содержания углерода и водорода. Удельная теплота сгорания двухслойных масок из хлопчатобумажных материалов почти в три раза меньше, существенно меньше и выход летучих веществ на горючую массу. Результаты, полученные для двухслойных масок, близки к значениям, характерным для бумажных материалов из древесной целлюлозы. Таким образом, индивидуальные маски могут сжигаться в слоевых топках котлоагрегатов в смеси с другими горючими материалами.

Список литературы /References

- [1] Любов В. К., Юдин В. А. Энергетическое использование твердых коммунальных отходов, *Золотухинские чтения. Нефть, газ и энергетика в Арктическом регионе*: Материалы III Международной научно-практической конференции (17–18 апреля 2025 г.). Архангельск, 2025 [Lyubov V. K., Yudin V. A. Energy Utilization of Municipal Solid Waste, in *Zolotukhin Readings. Oil,*

Gas, and Energy in the Arctic Region: Proc. III Int. Sci.-Pract. Conf. (April 17–18, 2025), Arkhangelsk, 2025, pp. (in Russian)]

[2] Гунич С.В., Янчуковская Е.В., Днепровская Н.И. Анализ современных методов переработки твердых бытовых отходов, *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2015, 2(13), 110–115 [Gunich S. V., Yanchukovskaya E. V., Dneprovskaya N. I. Analysis of Modern Methods for Municipal Solid Waste Processing, *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnolog*, 2015, 2 (13), 110–115 (in Russian)]

[3] Антоненко Л.П., Сас Д.П., Трембус И.В. Оценка пригодности разных марок макулатуры для переработки в бумажную продукцию, *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2007, 2, 39–43 [Antonenko L. P., Sas D. P., Trembus I. V. Assessment of the Suitability of Different Paper Recycling Grades for Production of Paper Products, *Ecotechnologies and Resource Conservation*, 2007, no. 2, pp. 39–43 (in Russian)]

[4] Гребенев Л.В., Демешкан Е.Ю. Состояние и проблемы использования макулатуры, *Лесной экономический вестник*. 2003, 4, 19–22. [Grebenev L. V., Demeshkan E. Yu. State and Problems of Waste Paper Utilization, *Forest Economic Bulletin*, 2003, 4, 19–22 (in Russian)]

[5] Демешкан Е.Ю. Эколого-экономические аспекты использования макулатуры в целлюлозно-бумажной промышленности, *Лесной экономический вестник*. 2009, 1, 30–36. [Demeshkan E. Yu. Ecological and Economic Aspects of Waste Paper Utilization in the Pulp and Paper Industry, *Forest Economic Bulletin*, 2009, 1, 30–36 (in Russian)]

[6] Дулькин Д.А., Южанинова Л.А., Миронова В.Г., Спиридонов В.А. Научные основы переработки макулатуры, *Известия вузов. Лесной журнал*. 2005, 1/2, 104–122. [Dulkin D. A., Yuzhaninova L. A., Mironova V. G., Spiridonov V. A. Scientific Foundations of Waste Paper Processing, *Proceedings of Universities. Forest Journal*, 2005, 1/2, 104–122 (in Russian)]

[7] Любов В.К., Дьячков В.А. Программно-методический комплекс для обработки результатов испытаний теплоэнергетического оборудования и расчета вредных выбросов // *Тр. II Росс. нац. конф. по теплообмену. Т. 3. Свободная конвекция. Тепломассообмен при химических превращениях*. М.: Изд-во МЭИ, 1998. С. 225–228. [Lyubov V. K., Dyachkov V. A. Software and Methodological Complex for Processing Test Results of Heat and Power Equipment and Calculation of Harmful Emissions, in *Proc. 2nd Russ. Nat. Conf. on Heat Transfer, vol. 3: Free Convection. Heat and Mass Transfer under Chemical Transformations*, Moscow: Moscow Power Engineering Inst. Publ., 1998, pp. 225–228 (in Russian)]

[8] *Тепловой расчет котлов (нормативный метод)*, РАО «ЕЭС России», ВТИ, НПО ЦКТИ. СПб., 1998. 257 с. [Thermal Design of Boilers (Normative Method), RAO «UES of Russia», Saint Petersburg, 1998. 257 p. (in Russian)]

[9] Любов В.К., Дьячков В.А., Финкер Ф.З. Исследование теплотехнических характеристик гидролизного лигнина, *Известия вузов. Лесной журнал*. 1994, 2, 135–137. [Lyubov V. K., Dyachkov V. A., Finker F. Z. Study of Thermal Characteristics of Hydrolytic Lignin, *Proceedings of Universities. Forest Journal*, 1994, 2, 135–137 (in Russian)]

[10] Багрянцев Г.И. Переработка отходов: европейский опыт и российский подход, *Все-российский экономический журнал ЭКО*. 2016, 12, 36–40. [Bagryantsev G. I. Waste Processing: European Experience and Russian Approach, *All-Russian Economic Journal ECO*, 2016, no. 12, pp. 36–40 (in Russian)]

[11] Бернадинер М. Н. Диоксины при термическом обезвреживании органических отходов, *ЭКИП*. 2000, 2, 13–16. (12) [Bernadiner M. N. Dioxins in Thermal Neutralization of Organic Waste, *EKIP*, 2000, 2, 13–16 (in Russian)]

[12] Ring N, Ritchie K, Mandava L, Jepson R. A guide to synthesising qualitative research for researchers undertaking health technology assessments and systematic reviews. 2011. *NHS Quality Improvement Scotland (NHS QIS)*.

[13] Wolfel R, Corman VM, Guggemos W, Seilmaier M, Zange S, Muller MA, et al. Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. *Nature*. 2020;581(7809):465–9

[14] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives [Text with EEA relevance], *Official J. European Union*. 22 Nov. 2008

[15] Справочник НДТ ИТС 9–2020 “Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами”. Утв. приказом Росстандарта от 23.12.2020 № 2181) / Фед. агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Бюро НДТ, 2020. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https:// docs. cntd. ru/ document/ 573338441](https://docs.cntd.ru/document/573338441). Заглавие с экрана. [Best Available Techniques Reference Document ITS 9–2020 “Waste Utilization and Neutralization by Thermal Methods.” Approved by Rosstandart Order No. 2181 dated December 23, 2020 /Federal Agency on Technical Regulation and Metrology. Moscow: Bureau of Best Available Techniques, 2020. [Electronic resource] – Access: – <https:// docs. cntd. ru/ document/ 573338441>]

[16] Тугов А. Н. Энергетическая утилизация ТКО: мировой и отечественный опыт: обзор, *Теплоэнергетика*, 12, 5–22, 2022. [Tugov A. N. Energy Recovery of Municipal Solid Waste: Global and Russian Experience (Review), *Thermal Engineering*, 2022, no. 12, pp. 5–22 (in Russian)]

[17] Тугов А. Н. Современный уровень развития технологий энергетической утилизации ТКО, *Материалы Всероссийского форума «Енисейская теплофизика-2025» «XIV семинар вузов по теплофизике и энергетике»* СФУ, Красноярск С. 17–18, 2025. [Tugov A. N. Current Level of Development of Technologies for Energy Recovery of Municipal Solid Waste, in *Proc. All-Russian Forum “Yenisei Thermal Physics 2025”: 14th Seminar of Universities on Thermophysics and Energy*, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 2025, pp. 17–18 (in Russian)]

[18] Кириенко В. С., Тугов А. Н. Обоснование принятых решений по снижению выбросов NO_x на строящихся в Московской области заводах для энергетической утилизации ТКО, *Материалы Всероссийского форума «Енисейская теплофизика-2025» «XIV семинар вузов по теплофизике и энергетике»* СФУ, Красноярск С. 164–165, 2025. [Kirienko V. S., Tugov A. N. Justification of Adopted Solutions for NO_x Emissions Reduction at Municipal Solid Waste Energy Recovery Plants under Construction in the Moscow Region, in *Proc. All-Russian Forum “Yenisei Thermal Physics 2025”: 14th Seminar of Universities on Thermophysics and Energy*, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 2025, pp. 164–165 (in Russian)]

**Information and
Communication
Technologies**

**Информационно-
коммуникационные
технологии**



EDN: UJGWCC

УДК 004.722:531.7

Methodology for Assessing Quality of ATM Networks

Kirill A. Batenkov*

*MIREA – Russian Technological University
Moscow, Russian Federation*

Received 15.07.2025, received in revised form 30.04.2026, accepted 11.04.2026

Abstract. The study is devoted to assessing the quality of functioning of asynchronous data transmission (ATM) networks based on the analysis of key parameters, including time characteristics of transmission, loss and error rates during transmission of data cells. The problem of the research object is the need to describe a universal methodology for accurately classifying ATM networks by service quality, taking into account the differentiation of priorities of transmitted cells and the impact of significant transmission errors on the final quality indicators. The purpose of the study is to test a comprehensive approach to assessing the quality of ATM networks, which makes it possible to determine the compliance of a particular network with established service quality classes based on an analysis of time characteristics and data transmission reliability indicators. The main methods used are statistical analysis of the time characteristics of cell transmission, calculation of loss and error coefficients with differentiation by priority, the method of quantification of transmission time variations, exclusion of data distorted by significant errors from calculated indicators, comparative analysis of the obtained indicators with normative values for various quality classes. The main results of the study: the methodology for the comprehensive assessment of the quality of ATM networks is described, the application of the methodology is demonstrated using a practical example, it is established that the network under study meets the requirements of the third, fourth and fifth quality classes, specific parameters (cell loss coefficient) are identified, according to which the network does not meet higher quality classes, confirmed the effectiveness of the proposed approach for the classification of ATM networks. Main conclusions: the proposed methodology allows for an all-round assessment of the quality of ATM networks, a differentiated approach to analyzing cells of different priorities increases the accuracy of the assessment, the exclusion of data with significant errors from calculations provides more objective results, practical application of the methodology has confirmed its effectiveness for network classification tasks, the results obtained can be used for optimization of ATM service quality monitoring and management processes.

Keywords: ATM, quality of operation, time characteristics, data loss, network classification, traffic prioritization, assessment methodology.

Citation: Batenkov K. A. Methodology for Assessing Quality of ATM Networks. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 532–545. EDN: UJGWCC



© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: pustur@yandex.ru

Методика оценки качества функционирования сетей АТМ

К. А. Батенков

*МИРЭА – Российский технологический университет
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Исследование посвящено оценке качества функционирования сетей с асинхронным режимом передачи данных (АТМ) на основе анализа ключевых параметров, включая временные характеристики передачи, показатели потерь и ошибок при передаче ячеек данных. Проблема объекта исследования состоит в необходимости описания универсальной методики для точной классификации сетей АТМ по качеству обслуживания, учитывающей дифференциацию приоритетов передаваемых ячеек и влияние существенных ошибок передачи на итоговые показатели качества. Цель исследования состоит в апробации комплексного подхода к оценке качества функционирования сетей АТМ, позволяющего определить соответствие конкретной сети установленным классам качества обслуживания на основе анализа временных характеристик и показателей надежности передачи данных. Основные используемые методы: статистический анализ временных характеристик передачи ячеек, расчет коэффициентов потерь и ошибок с дифференциацией по приоритетам, метод квантильной оценки вариаций времени передачи, исключение данных, искаженных существенными ошибками, из расчетных показателей, сравнительный анализ полученных показателей с нормативными значениями для различных классов качества. Основные результаты исследования: описана методика комплексной оценки качества сетей АТМ, на практическом примере продемонстрировано применение методики, установлено, что исследуемая сеть соответствует требованиям третьего, четвертого и пятого классов качества, выявлены конкретные параметры (коэффициент потери ячеек), по которым сеть не соответствует более высоким классам качества, подтверждена эффективность предложенного подхода для классификации сетей АТМ. Главные выводы: предложенная методика позволяет проводить всестороннюю оценку качества функционирования сетей АТМ, дифференцированный подход к анализу ячеек разного приоритета повышает точность оценки, исключение данных с существенными ошибками из расчетов обеспечивает более объективные результаты, практическое применение методики подтвердило ее эффективность для задач классификации сетей, полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов мониторинга и управления качеством услуг АТМ.

Ключевые слова: АТМ, качество функционирования, временные характеристики, потеря данных, классификация сетей, приоритизация трафика, методика оценки.

Цитирование: Батенков К. А. Методика оценки качества функционирования сетей АТМ / К. А. Батенков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 532–545. EDN: UJGWCC

Введение

Современные сети передачи данных требуют комплексного подхода к оценке качества их функционирования. Особое значение это приобретает для технологий асинхронной передачи, где критически важными становятся показатели временных задержек и надежности доставки информации.

Сети с асинхронным режимом передачи (АТМ) играют ключевую роль в современных телекоммуникационных системах, обеспечивая высокоскоростную передачу данных с различными требованиями к качеству обслуживания. Одной из важнейших задач при эксплуатации таких сетей является объективная оценка их качества функционирования, включая анализ временных задержек, потерь данных и ошибок передачи.

Целью данного исследования является описание комплексной методики оценки качества сетей АТМ на основе анализа ключевых параметров передачи данных. В рамках работы решаются следующие задачи: систематизация показателей качества функционирования сетей АТМ, включая временные характеристики передачи, коэффициенты потерь и ошибок; классификация сетей по качеству обслуживания с учетом приоритетов передаваемых ячеек; практическая апробация предложенной методики на реальных статистических данных; выявление ограничений и несоответствий, препятствующих отнесению сети к более высоким классам качества.

Теоретическая значимость исследования заключается в уточнении методик оценки качества сетей АТМ. Практическая ценность работы состоит в возможности применения разработанных алгоритмов для мониторинга и оптимизации работы телекоммуникационных систем, а также для сертификации сетей по классам качества.

Оценка качества функционирования сетей является важной задачей в современных телекоммуникациях, включающей анализ надежности, пропускной способности, задержек и устойчивости к отказам. Постоянное развитие методов оценки и повышения качества функционирования сетей приводит как к теоретическим, так и практическим решениям. Большинство работ подчеркивают важность аналитических методов для оценки и оптимизации сетевых характеристик, особенно в условиях высокой нагрузки [1, 2, 3].

Важным направлением исследований является анализ надежности сетей с учетом механизмов защитного переключения и резервирования. Например, в [1, 4] рассмотрены методы повышения устойчивости сетей за счет защитного переключения и восстановления после отказов, отмечено их влияние на общую структурную надежность сети.

Вопросы производительности и задержек особенно актуальны в беспроводных сетях и сетях с высокой нагрузкой. Например, исследование [5] посвящено вероятностно-временным характеристикам беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA, показывая, как оптимизация параметров позволяет снизить задержки и увеличить пропускную способность. Аналогично в [6] рассмотрены механизмы управления трафиком в беспроводных АТМ-сетях, что позволяет снизить потери пакетов и улучшить производительность сети.

Важную роль в оценке функционирования сетей играет анализ специфики различных технологий передачи данных. В частности, в [7] исследуются особенности передачи данных в оптоволоконных FDDI-сетях, что критично для цифровых подстанций, требующих высокой надежности и минимальных задержек. В [3] рассматривается анализ АТМ-сетей, где отмечается их высокая эффективность в передаче мультимедийного трафика за счет использования виртуальных каналов и ячеек фиксированного размера.

Многие авторы используют математическое моделирование и компьютерные симуляции для оценки сетевых параметров. Например, в [6] применен инструмент OPNET для моделирования беспроводных АТМ-сетей, оценивая производительность различных режимов работы.

В [8] использованы вычислительные модели для расчета вероятности связности сети и влияния отказов на ее устойчивость.

Исследования показывают, что разные типы сетей требуют специфических подходов к обеспечению их качества. В АТМ-сетях применяется механизм управления полосой пропускания [9]. В беспроводных сетях важную роль играют методы доступа и управления нагрузкой [10], что позволяет адаптировать их к изменяющимся условиям эксплуатации.

Анализ работ показывает, что надежность, отказоустойчивость, пропускная способность и адаптивность АТМ-сетей являются основными критериями их функционирования [3, 9, 11]. Использование математического моделирования и симуляций позволяет глубже изучить влияние различных факторов на производительность сетей [4, 5, 7, 8].

Несмотря на значительный объем исследований, остаются нерешенные проблемы, связанные с учетом динамических изменений нагрузки при оценке качества сети [12], разработкой универсальных методов исключения статистических погрешностей при анализе существенных ошибок и созданием адаптивных алгоритмов классификации сетей для различных сценариев использования [13]. Кроме того, актуальными являются вопросы оптимизации параметров оценки для сетей со смешанным трафиком (голос, видео, данные), автоматизации процессов классификации сетей на основе машинного обучения [14] и разработки методов прогнозирования качества обслуживания при изменении конфигурации сети.

Данное исследование направлено на совершенствование методик оценки качества сетей АТМ с учетом современных требований к телекоммуникационным системам.

Временные параметры качества функционирования

Параметры качества функционирования сетей, использующих *протокол АТМ* (asynchronous transfer mode – асинхронный режим доставки), изложены в рекомендации I.356 [15]. Здесь мы также будем акцентировать внимание только на фазе обмена информацией, поскольку классы сетей вводятся, основываясь исключительно на параметрах этой фазы обслуживания.

Время переноса ячейки τ (CTD – cell transfer delay) информации пользователя определяется как разность между временами второго t_2 и первого t_1 эталонных событий переноса ячейки (например, поступление ячейки в коммутатор):

$$\tau = (t_2 - t_1),$$

где $t_2 > t_1$ и $(t_1 - t_2) \leq T_{\max}$ [15]. Применительно к качеству функционирования сети АТМ $T_{\max}$ является пределом времени, после которого ячейка считается потерянной. При этом значение $T_{\max}$ остается не точно определенным, но оно должно быть не больше практически наблюдаемого (измеряемого) времени переноса ячейки [15].

Среднее время переноса ячейки m_τ – арифметическое среднее задержек передачи ячеек для анализируемой совокупности:

$$m_\tau = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i,$$

где τ_i – задержка передачи i -й ячейки; n – объем исследуемой выборки (рассматриваются только доставленные ячейки).

Верхний квантиль времени переноса ячеек порядка h (upper lower h quantiles of CTD) – значение, при котором функция распределения времени переноса ячеек переходит от величин меньших $1 - h$ к величинам большим $1 - h \in (0, 1)$.

Нижний квантиль времени переноса ячеек порядка h (lower lower h quantiles of CTD) – значение, при котором функция распределения времени переноса ячеек переходит от величин меньших h к величинам большим $h \in (0, 1)$.

Вариация времени переноса ячейки v (CDV – cell delay variation) – разность между временем переноса ячейки τ и временем переноса эталонной (опорной) ячейки x_τ :

$$v = \tau - x_\tau,$$

где x_τ определяется для так называемой нулевой ячейки (cell 0), описание которой в существующих рекомендациях не приводится. При расчетах за эталонную ячейку принимают такую ячейку, время переноса которой соответствует квантилю времени переноса ячеек порядка 10^{-8} . Отметим, что распределение вариации времени переноса v идентично смещенному на время переноса эталонной ячейки x_τ распределению времени переноса ячеек τ . Кроме того, вариация задержки является двухточечной характеристикой и в отличие от одноточечной измеряется относительно двух точек регистрации ячеек.

Квантиль вариации времени переноса ячеек v_h порядка h (difference between upper and lower h quantiles of CTD) – разность между верхним и нижним квантилями времени переноса ячеек порядка h . При условии упорядоченности в порядке неубывания времен переноса ячеек τ_i , то есть если $\tau_{i+1} \geq \tau_i$, $i = 1, 2, \dots, n - 1$, квантиль вариации времени переноса ячеек определяется следующим образом:

$$v_h = \tau_{[(1-h) \cdot n]} - \tau_{[h \cdot n]}, \tau_{i+1} \geq \tau_i, i = 1, 2, \dots, n - 1,$$

где $[x]$ – округление в меньшую сторону числа x до ближайшего целого. В рекомендации [15] используется порядок квантиля $h = 10^{-8}$, что обеспечивает приближение квантиля вариации к значению разности между максимальным и минимальным временами переноса ячеек из выбранной совокупности, не беря в расчет ячейки, имеющие резкие отклонения во времени переноса и являющиеся, по сути, статистической погрешностью. Кроме того, такой порядок квантиля позволяет настраивать буферы устройств, гарантируя при этом вероятность потери ячеек не выше 10^{-8} .

Параметры потерь

Коэффициент потери ячеек p_l (cell loss ratio – CLR) – отношение числа потерянных ячеек n_l к общему числу переданных $n = n_l$ (объем исследуемой выборки определяется как сумма доставленных n и потерянных ячеек n_l):

$$p_l = \frac{n_l}{n + n_l}.$$

Отметим, что все передаваемые ячейки делятся на высокоприоритетные и низкоприоритетные. Высокоприоритетные ячейки помечаются нулевым битом приоритета отбрасывания ячейки (CLP – cell loss priority), а низкоприоритетные – единичным. Поэтому в рекомендации I.356 [15] используется обозначение для этого параметра CLR_{0+1} , хотя и так понятно, что при его расчете берутся во внимание все существующие ячейки.

Коэффициент потери высокоприоритетных ячеек $p_{l,0}$ (CLR_0) – отношение числа потерянных высокоприоритетных ячеек $n_{l,0}$ к общему числу переданных $n_0 + n_{l,0}$ (объем исследуемой выборки определяется как сумма доставленных n_0 и потерянных высокоприоритетных ячеек $n_{l,0}$):

$$p_{l,0} = \frac{n_{l,0}}{n_0 + n_{l,0}}.$$

Коэффициент потери низкоприоритетных ячеек $p_{l,1}$ (CLR_1) – отношение числа потерянных низкоприоритетных ячеек $n_{l,1}$ к общему числу переданных $n_1 + n_{l,1}$ (объем исследуемой выборки определяется как сумма доставленных n_1 и потерянных низкоприоритетных ячеек $n_{l,1}$):

$$p_{l,1} = \frac{n_{l,1}}{n_1 + n_{l,1}}.$$

Естественно, что в случае отсутствия приоритизации (все ячейки по умолчанию имеют единичный бит приоритета) коэффициенты потери низкоприоритетных и всех ячеек являются идентичными, то есть $p_{l,1} = p_l$. Также отметим, что при расчете коэффициентов потери ячеек ни потерянные, ни принятые ячейки, входящие в состав блоков с существенными ошибками, не учитываются.

Коэффициент ошибок в ячейках p_e (cell error ratio – CER) – отношение числа ячеек с ошибками n_e к общему числу принятых ячеек n (объем исследуемой выборки n определяется как сумма успешно доставленных, помеченных и ошибочных ячеек):

$$p_e = \frac{n_e}{n}.$$

Отметим, что при расчете коэффициента ошибок в ячейках принятые ячейки, входящие в состав блоков с существенными ошибками, не учитываются.

Интенсивность ложных ячеек a_m (cell misinsertion rate – CMR) – отношение числа ложных ячеек n_m , наблюдаемых на некотором временном интервале, к длительности этого интервала t_m :

$$a_m = \frac{n_m}{t_m}.$$

Ложными ячейками являются принятые ячейки, для которых в рамках данного соединения отсутствуют события передачи этих ячеек, то есть данные ячейки не передавались в этом соединении. Возникновение ложных ячеек может быть обусловлено ошибками ассоциации ячеек с определенным соединением на физическом уровне. Также отметим, что при расчете интенсивности ложных ячеек ячейки, относящиеся к интервалам измерения, соответствующим блокам с существенными ошибками, не учитываются.

Блок ячеек (cell block) – последовательность заданного числа ячеек n_a в рассматриваемом соединении.

Блок ячеек с существенными ошибками (severely errored cell block) – последовательность более чем n_o ячеек с ошибками, потерянных и ложных ячеек в рассматриваемом блоке ячеек.

Значение числа ячеек в блоке n_a определяется пиковой скоростью передачи (PCR – peak cell rate) агрегированного потока высоко- и низкоприоритетных ячеек. При этом предполагается, что за секунду должно передаваться от 12,5 до 25 блоков ячеек на пиковой скорости, то есть

$$n_a = 2^{\lceil \log_2 \frac{v_{PCR}}{25} \rceil},$$

где $1600 < v_{PCR} \leq 819200$ ячеек/с – пиковая скорость передачи ячеек.

Скорость передачи информации пользователя (байт/с) при этом составит

$$v_u = 48 \cdot v_{PCR}.$$

Граница существенности числа ошибок в блоке:

$$n_o = \frac{n_a}{32}.$$

Коэффициент существенных ошибок в блоках ячеек p_b (*severely errored cell block ratio* – *SECBR*) – отношение числа блоков ячеек с существенными ошибками $n_{b,e}$ к общему числу переданных блоков n_b :

$$p_b = \frac{n_{b,e}}{n_b}.$$

Данный коэффициент количественно характеризует всплески неуспешно переданных ячеек и позволяет не учитывать влияние данных всплесков на коэффициенты потери ячеек, ошибок в ячейках и интенсивность ложных ячеек.

Основываясь на данных показателях, в [15] определены пять классов качества функционирования сетей АТМ (табл. 1). Отметим, что для всех классов, за исключением четвертого, задаются граничные показатели, в связи с чем этот класс иногда называют неопределенным.

Таблица 1. Классы качества функционирования сетей АТМ

Table 1. ATM network quality classes

Параметр			CTD	CDV	CLR ₀₊₁	CLR ₀	CER	CMR	SECBR
Граница			Верхняя для среднего m_t , мс	Верхняя для квантиля $v_{10^{-8}}$, мс	Верхняя для коэффициента p_1	Верхняя для коэффициента $p_{1,0}$	Верхняя для коэффициента p_e	Верхняя для интенсивности a_m , сут. ⁻¹	Верхняя для коэффициента p_b
Классы	строгий	1	400	3	$3 \cdot 10^{-7}$	–	$4 \cdot 10^{-6}$	1	10^{-4}
	допустимый	2	–	–	10^{-5}	–	$4 \cdot 10^{-6}$	1	10^{-4}
	двухуровневый	3	–	–	–	10^{-5}	$4 \cdot 10^{-6}$	1	10^{-4}
	неопределенный	4	–	–	–	–	–	–	–
	строгий двухуровневый	5	400	6	–	$3 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-6}$	1	10^{-4}

Анализ качества функционирования сети

Рассмотрим пример: измеренные статистические данные непрерывно передаваемой пользовательской информации с пиковой скоростью 105 ячеек/с для исследуемой сети АТМ приведены в табл. 2. Определить, к какому классу сетей АТМ принадлежит рассматриваемая сеть.

Дано: $v_{PCR} = 10^5$ ячеек/с, $n_{b,0,i}$, $n_{b,1,i}$, $n_{1,0,i}$, $n_{1,1,i}$, $n_{e,0,i}$, $n_{e,1,i}$, $\tau_{0,i}$, $\tau_{1,i}$, $n_{m,i}$, $i = 1, 2, \dots, n_g = 6$ (соответствующие столбцы табл. 2).

Таблица 2. Статистические данные исследуемой сети ATM

Table 2. Statistical data of the ATM network under study

Номер интервала измерений i	Число переданных блоков высокоприоритетных ячеек $n_{b,0,i}$	Число переданных блоков низкоприоритетных ячеек $n_{b,1,i}$	Число потерянных высокоприоритетных ячеек в каждом блоке $n_{l,0,i}$	Число потерянных низкоприоритетных ячеек в каждом блоке $n_{l,1,i}$	Число высокоприоритетных ячеек с ошибками в каждом блоке $n_{e,0,i}$	Число низкоприоритетных ячеек с ошибками в каждом блоке $n_{e,1,i}$	Время переноса высокоприоритетных ячеек $\tau_{0,i}$	Время переноса низкоприоритетных ячеек $\tau_{1,i}$	Число ложных ячеек на интервале измерения блока $n_{m,i}$
1	$5,9 \cdot 10^6$	$5,7 \cdot 10^6$	0	47	0	0	396,6	400,3	1
2	$7,6 \cdot 10^6$	$7,1 \cdot 10^6$	0	14	0	0	395	399,2	2
3	1	1	$2,6 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	0	0	393	403,7	5
4	$6,3 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^6$	0	44	0	0	400,1	395,5	8
5	$1,9 \cdot 10^5$	$5,3 \cdot 10^6$	0	7	0	0	397	395,3	0
6	$3,1 \cdot 10^3$	$8,7 \cdot 10^3$	1	4	0	1	399,9	400,6	2

Найти: класс сети ATM.

Число ячеек в блоке определяется на основе пиковой скорости $n_a = 2^{\lceil \log_2 \frac{v_{PCR}}{25} \rceil} = 2^{\lceil \log_2 \frac{10^5}{25} \rceil} = 4096$.

Первоначально определим блоки ячеек с существенными ошибками. Граница существенности числа ошибок в блоке: $n_o = \frac{n_a}{32} = \frac{4096}{32} = 128$.

Следовательно, на третьем интервале измерения ($i = 3$) присутствуют блоки ячеек с существенными ошибками, поскольку $n_{o,3} = n_{l,0,3} + n_{l,1,3} + n_{e,0,3} + n_{e,1,3} + n_{m,3} = 2,6 \cdot 10^3 + 3,5 \cdot 10^3 + 0 + 0 + 8 = 6,1 \cdot 10^3 > n_o = 128$.

Число блоков с существенными ошибками $n_{b,e} = n_{b,0,3} + n_{b,1,3} = 1 + 1 = 2$.

Общее число переданных блоков $n_b = \sum_{i=1}^{n_g} (n_{b,0,i} + n_{b,1,i}) = 5,9 \cdot 10^6 + 5,7 \cdot 10^6 + 7,6 \cdot 10^6 + 7,1 \cdot 10^6 + 1 + 1 + 6,3 \cdot 10^6 + 3,5 \cdot 10^6 + 1,9 \cdot 10^5 + 5,3 \cdot 10^6 + 3,1 \cdot 10^3 + 8,7 \cdot 10^3 = 4,2 \cdot 10^7$.

Тогда коэффициент существенных ошибок в блоках ячеек: $p_b = \frac{n_{b,e}}{n_b} = \frac{2}{4,2 \cdot 10^7} = 4,8 \cdot 10^{-8}$.

Отсюда следует, что исследуемая сеть удовлетворяет требованиям любого класса сетей.

Для определения интенсивности ложных ячеек необходимо знать интервал измерения.

Поскольку измерения, согласно исходным данным, проводились непрерывно, то интервал измерения вычисляется исходя из скорости и объема переданных ячеек за время, в котором не учтываются интервалы блоков с существенными ошибками: $t_m = \frac{[n_b - (n_{b,0,3} + n_{b,1,3})] \cdot n_a}{v_{PCR}}$

$= \frac{[4,2 \cdot 10^7 - (1 + 1)] \cdot 4096}{10^5} = 1,7 \cdot 10^6 \text{ с} = 19,7 \text{ сут.}$

В число ложных ячеек не включаются ячейки, полученные при наблюдении блоков с су-

щественными ошибками, то есть $n_m = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3}}^{n_g} n_{m,i} = 1 + 2 + 8 + 0 + 2 = 13$.

Таким образом, интенсивность ложных ячеек $a_m = \frac{n_m}{t_m} = \frac{13}{19,7} = 0,66 \text{ сут}^{-1}$.

Отсюда также следует, что рассматриваемая сеть удовлетворяет требованиям любого класса сетей.

Общее число ячеек, переданных не в интервале наблюдения существенных ошибок:

$$n + n_l = n_a \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3}}^{n_g} (n_{b,0,i} + n_{b,1,i}) = n_a (n_b - n_{b,e}) = 4096 \cdot (4,2 \cdot 10^7 - 2) = 1,7 \cdot 10^{11}.$$

Общее число потерянных ячеек, переданных не в интервале наблюдения существенных

$$\text{ошибок: } n_l = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3}}^{n_g} (n_{l,0,i} n_{b,0,i} + n_{l,1,i} n_{b,1,i}) = 0 \cdot 5,9 \cdot 10^6 + 47 \cdot 5,7 \cdot 10^6 + 0 \cdot 7,6 \cdot 10^6 + 14 \cdot 7,1 \cdot 10^6 + 0 \cdot 6,3 \cdot 10^6 + 44 \cdot 3,5 \cdot 10^6 + 0 \cdot 1,9 \cdot 10^5 + 7 \cdot 5,3 \cdot 10^6 + 1 \cdot 3,1 \cdot 10^3 + 4 \cdot 8,7 \cdot 10^3 = 5,6 \cdot 10^8.$$

$$\text{Коэффициент потери ячеек } p_l = \frac{n_l}{n + n_l} = \frac{5,6 \cdot 10^8}{1,7 \cdot 10^{11}} = 3,3 \cdot 10^{-3}.$$

Отсюда следует, что данная сеть не удовлетворяет требованиям для первого и второго класса сетей.

Общее число высокоприоритетных ячеек, переданных не в интервале наблюдения сущест-

$$\text{венных ошибок: } n_0 + n_{l,0} = n_a \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3}}^{n_g} n_{b,0,i} = 4096 \cdot (5,9 \cdot 10^6 + 7,6 \cdot 10^6 + 6,3 \cdot 10^6 + 1,9 \cdot 10^5 + 3,1 \cdot 10^3) = 8,2 \cdot 10^{10}.$$

Общее число потерянных высокоприоритетных ячеек, переданных не в интервале наблю-

$$\text{дения существенных ошибок: } n_{l,0} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3}}^{n_g} n_{l,0,i} n_{b,0,i} = 0 \cdot 5,9 \cdot 10^6 + 0 \cdot 7,6 \cdot 10^6 + 0 \cdot 6,3 \cdot 10^6 + 0 \cdot 1,9 \cdot 10^5 + 1 \cdot 3,1 \cdot 10^3 = 3,1 \cdot 10^3.$$

$$\text{Коэффициент потери высокоприоритетных ячеек } p_{l,0} = \frac{n_{l,0}}{n_0 + n_{l,0}} = \frac{3,1 \cdot 10^3}{8,2 \cdot 10^{10}} = 3,8 \cdot 10^{-8}.$$

Отсюда также следует, что исследуемая сеть удовлетворяет требованиям любого класса сетей.

Общее число принятых ячеек, переданных не в интервале наблюдения существенных

$$\text{ошибок: } n = (n + n_l) - n_l = 1,7 \cdot 10^{11} - 5,6 \cdot 10^8 = 1,7 \cdot 10^{11}.$$

Общее число принятых ячеек с ошибками, переданных не в интервале наблюдения суще-

$$\text{ственных ошибок: } n_e = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3}}^{n_g} (n_{e,0,i} n_{b,0,i} + n_{e,1,i} n_{b,1,i}) = 0 \cdot 5,9 \cdot 10^6 + 0 \cdot 5,7 \cdot 10^6 + 0 \cdot 7,6 \cdot 10^6 +$$

$$+ 0 \cdot 7,1 \cdot 10^6 + 0 \cdot 6,3 \cdot 10^6 + 0 \cdot 3,5 \cdot 10^6 + 0 \cdot 1,9 \cdot 10^5 + 0 \cdot 5,3 \cdot 10^6 + 0 \cdot 3,1 \cdot 10^3 + \\ + 1 \cdot 8,7 \cdot 10^3 = 8,7 \cdot 10^3.$$

$$\text{Коэффициент ошибок в ячейках } p_e = \frac{n_e}{n} = \frac{8,7 \cdot 10^3}{1,7 \cdot 10^{11}} = 5,1 \cdot 10^{-8}.$$

Отсюда следует, что исследуемая сеть удовлетворяет требованиям любого класса сетей.

Общее число доставленных ячеек, включая полученные в блоках с существенными ошибками:

$$\text{ками: } n' = \sum_{i=1}^{n_g} [(n_a - n_{l,0,i})n_{b,0,i} + (n_a - n_{l,1,i})n_{b,1,i}] = (4096 - 0) \cdot 5,9 \cdot 10^6 + (4096 - 47) \cdot \\ \cdot 5,7 \cdot 10^6 + (4096 - 0) \cdot 7,6 \cdot 10^6 + (4096 - 14) \cdot 7,1 \cdot 10^6 + (4096 - 2,6 \cdot 10^3) \cdot 1 + (4096 - \\ - 3,5 \cdot 10^3) \cdot 1 + (4096 - 0) \cdot 6,3 \cdot 10^6 + (4096 - 44) \cdot 3,5 \cdot 10^6 + (4096 - 0) \cdot 1,9 \cdot 10^5 + \\ + (4096 - 7) \cdot 5,3 \cdot 10^6 + (4096 - 1) \cdot 3,1 \cdot 10^3 + (4096 - 4) \cdot 8,7 \cdot 10^3 = 1,7 \cdot 10^{11}.$$

Среднее значение времени переноса ячейки (заметим, что здесь учитываются все доставленные ячейки, включая полученные в блоках с существенными ошибками):

$$m_\tau = \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n_g} [(n_a - n_{l,0,i})n_{b,0,i}\tau_{0,i} + (n_a - n_{l,1,i})n_{b,1,i}\tau_{1,i}] = (4096 - 0) \cdot 5,9 \cdot 10^6 \cdot 396,6 + \\ + (4096 - 47) \cdot 5,7 \cdot 10^6 \cdot 400,3 + (4096 - 0) \cdot 7,6 \cdot 10^6 \cdot 395 + (4096 - 14) \cdot 7,1 \cdot 10^6 \cdot 399,2 + \\ + (4096 - 2,6 \cdot 10^3) \cdot 1 \cdot 393 + (4096 - 3,5 \cdot 10^3) \cdot 1 \cdot 403,7 + (4096 - 0) \cdot 6,3 \cdot 10^6 \cdot 400,1 + \\ + (4096 - 44) \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 395,5 + (4096 - 0) \cdot 1,9 \cdot 10^5 \cdot 397 + (4096 - 7) \cdot 5,3 \cdot 10^6 \cdot 395,3 + \\ + (4096 - 1) \cdot 3,1 \cdot 10^3 \cdot 399,9 + (4096 - 4) \cdot 8,7 \cdot 10^3 \cdot 400,6 = 397,5 \text{ мс.}$$

Отсюда понятно, что исследуемая сеть удовлетворяет требованиям любого класса сетей.

Время переноса ячеек дано в качестве исходных данных в табл. 2. Для получения функции распределения времени переноса достаточно упорядочить интервалы измерения и приоритетность ячеек в порядке невозрастания (тогда число ячеек на интервале анализа будет равно n_i , что соответствует либо группе высокоприоритетных ячеек $n_{0,i}$, либо низкоприоритетных $n_{1,i}$) и рассчитать соответствующие приросты функции распределения:

$$h_{2 \cdot n_g} = 1, h_j = 1 - \frac{1}{n'} \sum_{i=j+1}^{2 \cdot n_g} n_i, j = 1, 2, \dots, 2 \cdot n_g - 1.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Поскольку $h_1 < 10^{-8} < h_2$, то нижний квантиль времени переноса ячеек $\tau_{10^{-8}} = 395$ мс, а так

как $h_{11} < 1 - 10^{-8} < h_2$, то верхний $\tau_{1-10^{-8}} = 400,6$ мс (рис. 1). Следовательно, квантиль вариации

времени переноса ячеек $v_{10^{-8}} = \tau_{1-10^{-8}} - \tau_{10^{-8}} = 400,6 - 395 = 5,6$ мс.

Откуда ясно, что по этому показателю сеть первому классу не соответствует.

Таким образом, исследуемая сеть АТМ принадлежит к третьему, четвертому и пятому классам (табл. 4 – зеленые поля означают соответствие, красные – несоответствие).

Таблица 3. Квантили времени переноса ячеек исследуемой сети АТМ

Table 3. Quantiles of cell transfer time in the ATM network under study

Номер интервала измерений i	Приоритет ячеек	Число переданных блоков ячеек $n_{b,0,i}$ или $n_{b,1,i}$	Число потерянных ячеек в каждом блоке $n_{l,0,i}$ или $n_{l,1,i}$	Время переноса ячеек $\tau_{0,i}$ или $\tau_{1,i}$	Номер в порядке неубывания времени переноса ячеек j	Квантиль h_j
3	высокий – 0	1	$2,6 \cdot 10^3$	393	1	$8,8 \cdot 10^{-9}$
2	высокий – 0	$7,6 \cdot 10^6$	0	395	2	0,183
5	низкий – 1	$5,3 \cdot 10^6$	7	395,3	3	0,31
4	низкий – 1	$3,5 \cdot 10^6$	44	395,5	4	0,394
1	высокий – 0	$5,9 \cdot 10^6$	0	396,6	5	0,537
5	высокий – 0	$1,9 \cdot 10^5$	0	397	6	0,542
2	низкий – 1	$7,1 \cdot 10^6$	14	399,2	7	0,713
6	высокий – 0	$3,1 \cdot 10^3$	1	399,9	8	0,713
4	высокий – 0	$6,3 \cdot 10^6$	0	400,1	9	0,864
1	низкий – 1	$5,7 \cdot 10^6$	47	400,3	10	0,99979
6	низкий – 1	$8,7 \cdot 10^3$	4	400,6	11	$1-3,5 \cdot 10^{-9}$
3	низкий – 1	1	$3,5 \cdot 10^3$	403,7	12	1

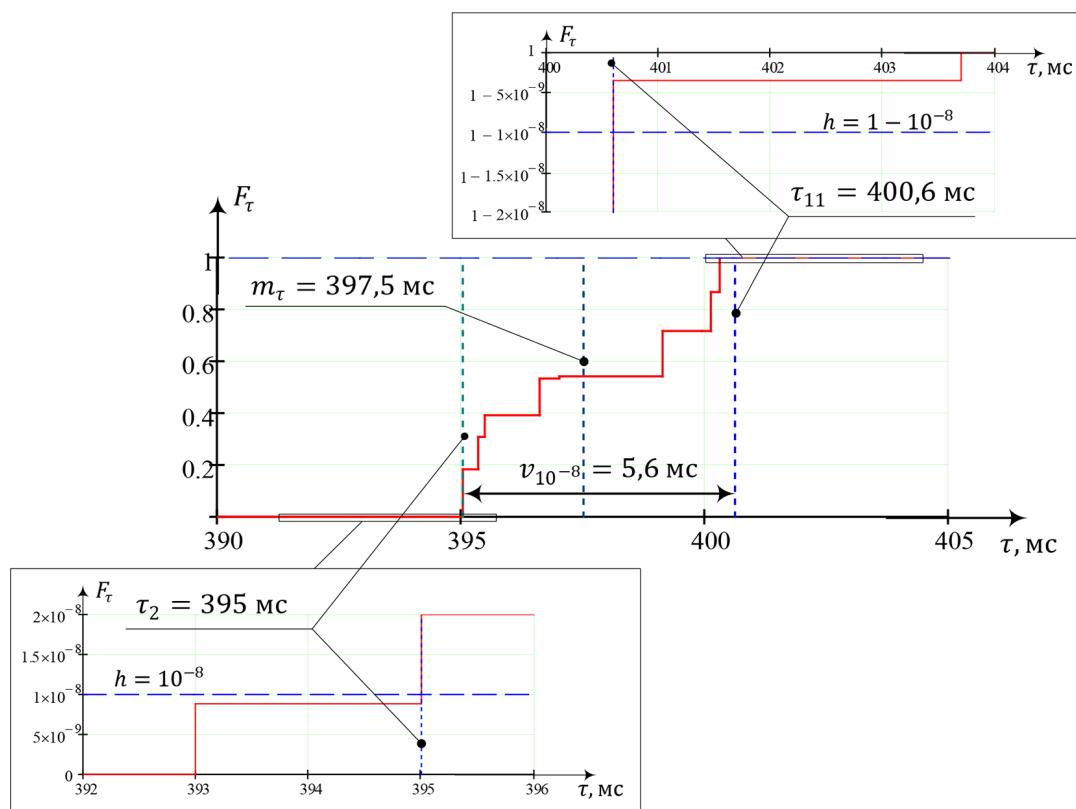
Рис. 1. Гистограмма функции распределения F_τ времени переноса ячеек τ Fig. 1. Histogram of the distribution function F_τ of the cell transfer time τ

Таблица 4. Соответствие показателей качества функционирования исследуемой сети ATM классам качества

Table 4. Compliance of the quality indicators of the ATM network under study with quality classes

Параметр			CTD	CDV	CLR ₀₊₁	CLR ₀	CER	CMR	CECBR	Соответствие классу
			Среднее <i>m_т</i> , мс	Кван- тиль <i>v</i> _{10⁻⁸} , мс	Коэффи- циент <i>p_l</i>	Коэф- фициент <i>p_{l,0}</i>	Коэффи- циент <i>p_e</i>	Интен- сивность <i>a_м</i> , сут. ⁻¹	Коэффи- циент <i>p_b</i>	
Показатель			397,5	5,6	3,3·10 ⁻³	3,8·10 ⁻⁸	5,1·10 ⁻⁸	0,66	4,8·10 ⁻⁸	
Классы	строгий	1	400	3	3·10 ⁻⁷	—	4·10 ⁻⁶	1	10 ⁻⁴	нет
	допустимый	2	—	—	10 ⁻⁵	—	4·10 ⁻⁶	1	10 ⁻⁴	нет
	двухуровне- вый	3	—	—	—	10 ⁻⁵	4·10 ⁻⁶	1	10 ⁻⁴	да
	неопреде- ленный	4	—	—	—	—	—	—	—	да
	строгий двухуровне- вый	5	400	6	—	3·10 ⁻⁷	4·10 ⁻⁶	1	10 ⁻⁴	да

Заключение

Проведенное исследование позволило рассмотреть комплексную методику оценки качества функционирования сетей с асинхронным режимом передачи данных (ATM). Основное внимание было уделено анализу ключевых параметров, включая временные характеристики передачи, показатели потерь и ошибок ячеек, а также дифференциацию приоритетов трафика.

Рассматриваемый универсальный подход включает статистический анализ временных задержек, расчет коэффициентов потерь и ошибок, а также квантильную оценку вариаций времени передачи. Учет приоритетов ячеек повышает точность оценки, а исключение данных с существенными ошибками минимизирует статистические погрешности.

На примере реальной сети ATM продемонстрирована методика классификации сетей по классам качества обслуживания. Установлено, что исследуемая сеть соответствует третьему, четвертому и пятому классам качества, но не удовлетворяет более строгим требованиям первого и второго классов из-за повышенного коэффициента потерь ячеек.

Основным препятствием для отнесения сети к более высоким классам качества является высокий уровень потерь низкоприоритетных ячеек. При этом сеть демонстрирует высокую надежность передачи высокоприоритетного трафика, что соответствует строгим требованиям. Для повышения класса качества сети необходимо оптимизировать механизмы управления трафиком, снижая потери низкоприоритетных ячеек. Внедрение адаптивных алгоритмов буферизации и приоритизации трафика позволит улучшить временные характеристики. Для повышения точности оценки рекомендуется расширенный мониторинг с учетом динамики нагрузки и внешних факторов.

В качестве перспективных направлений исследований можно выделить следующие: разработка адаптивных методов оценки качества с учетом динамических изменений нагрузки и трафика смешанного типа (голос, видео, данные), использование методов машинного обучения для автоматизации классификации сетей и прогнозирования качества обслуживания,

исследование влияния новых технологий (SDN, NFV) на параметры ATM-сетей и их соответствие классам качества, оптимизация алгоритмов исключения статистических погрешностей при анализе существенных ошибок передачи.

Список литературы /References

- [1] Петушков Г. В. Оценка и прогнозирование надежности для высоконадежных программно-аппаратных систем на примере центров обработки данных. *Russian Technological Journal*. 2020, 8(1):21–26. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-21-26> [Petushkov G. V. Evaluation and reliability prediction for highly reliable software and hardware systems: The case of data processing centers. *Russian Technological Journal*. 2020, 8(1):21–26 (in Russian)]
- [2] Oostenbrink J., van Adrichem N. L. M., Kuipers F. A. Fast failover of multicast sessions in software-defined networks [Electronic resource]. *arXiv.org*. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1701.08182> DOI: 10.48550/arXiv.1701.08182.
- [3] Manavi M. *A Comprehensive Evaluation of the Impact of ATM QoS Mechanisms on Network Performance for Multimedia and Data Applications* [Electronic resource]. University of Houston, Houston, USA.
- [4] Батенков К. А., Фокин А. Б. Анализ структурной надежности сетей связи с механизмами защитного переключения для одного защищаемого и одного резервного участков. *Russ. Technol. J.* 2024, 12(2):39–47. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-39-47> [Batenkov K. A., Fokin A. B. Analysis of the structural reliability of communication networks supporting protective switching mechanisms for one protected section and one backup section. *Russian Technological Journal*. 2024, 12(2):39–47 (in Russian)]
- [5] Леонтьев А. С., Жматов Д. В. Исследование вероятностно-временных характеристик беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA. *Russian Technological Journal*. 2024, 12(2):67–76. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-67-76> [Leontyev A. S., Zhmatov D. V. Analytical method for analyzing message transmission processes in FDDI networks for digital substations. *Russian Technological Journal*. 2024, 12(2):67–76 (in Russian)]
- [6] Shijer S. S., Sabry A. H. Analysis of performance parameters for wireless network using switching multiple access control method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021, Vol. 4, 9(112), 112. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.238457. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238457>.
- [7] Леонтьев А. С., Жматов Д. В. Аналитический метод анализа процессов передачи сообщений в оптоволоконных сетях с маркерным доступом для цифровых подстанций. *Russ. Technol. J.* 2024, 12(6):26–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-6-26-38> [Leontyev A. S., Zhmatov D. V. Analytical method for analyzing message transmission processes in FDDI networks for digital substations. *Russian Technological Journal*. 2024, 12(6):26–38 (in Russian)]
- [8] Батенков А. А., Батенков К. А., Фокин А. Б. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий. *Информационно-управляющие системы*. 2021, 6(115), 53–63. DOI 10.31799/1684-8853-2021-6-53-63. EDN AOUANJ [Batenkov A., Batenkov K., Fokin A. Analysis of the probability of connectivity of a telecommunications network based on the reduction of several non-connectivity events to a union of independent events. *Information and Control Systems*. 2021, 6, 53–63 (in Russian)]

[9] William P., Pawar A. B., Jawale M. A., Badholia A., Verma V. Energy efficient framework to implement next generation network protocol using ATM technology. *Measurement: Sensors*. 2022, 24, 100477. ISSN 2665–9174. DOI: 10.1016/j.measen.2022.100477. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665917422001118>.

[10] Ohwo S. O., Erihri J. O., Anya M. Mobile Agent-Based Network Administration System // *FUOYE Journal of Engineering and Technology*. 2024, 9(4), 565. DOI: 10.46792/fuoyejet.v9i4.2. – URL: <https://engineering.fuoye.edu.ng/journal> (accessed: DD.MM.YYYY).

[11] Liu R. Application of ATM Asynchronous Transfer Mode Intellectualization in Civil Aviation System. *Academic Journal of Science and Technology*. 2022, 2(1), 17. ISSN 2771–3032.

[12] Ali M. S., Pota H. R., Islam F. M., Roy N. K. Dynamic Load Variation and Stability Analysis in Distribution Networks with Distributed Generators. *Proceedings of the 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2012)*, 2012. 531–536. DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221434.

[13] Raff L., Komanduri R., Hagan M., Bukkapatnam S. Neural Network Methods for Data Analysis and Statistical Error Reduction [Electronic resource]. *Neural Networks in Chemical Reaction Dynamics*. New York, Oxford University Press, 2012. Chapter 13. Available at: <https://doi.org/10.1093/oso/9780199765652.003.0013> (accessed: 31.03.2025). – DOI: 10.1093/oso/9780199765652.003.0013. – ISBN 978–0–19–976565–2.

[14] Nuzzo R. Scientific Method: Statistical Errors. *Nature*, 2014, 506(7487), 150–152. DOI: 10.1038/506150a.

[15] *Rec. I.356. B-ISDN ATM layer cell transfer performance*. 2000–03. Geneva: ITU-T, 2001. 64 p.

EDN: UJSKPN

УДК 621.396.4:654.091(73)

Applications of Massive MIMO Technology in US Patents

Muhammed AL-Rawi*

*Bandung Institute of Technology
Indonesia*

Received 30.09.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 11.04.2026

Abstract. Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) is a crucial technology for 5G and beyond. It greatly increases coverage, data rates, and spectral efficiency by using a large number of antennas at the base station. By utilizing spatial multiplexing and diversity, directing narrow beams towards users, and facilitating reliable communication even in difficult-to-reach areas, it accomplishes these benefits. The most recent uses of the massive MIMO system in US patents are described in this paper. Additionally, a brief description of the massive MIMO system is provided.

Keywords: US Patents, massive MIMO, structure and applications.

Citation: M. AL-Rawi M. Applications of Massive MIMO Technology in US Patents. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 546–552. EDN: UJSKPN



Применение технологии Massive MIMO в патентах США

Мухаммед Аль-Раби

*Бандунгский технологический институт
Индонезия*

Аннотация. Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) — важная технология для 5G и последующих поколений. Она значительно увеличивает зону покрытия, скорость передачи данных и спектральную эффективность за счет использования большого количества антенн на базовой станции. Эти преимущества достигаются благодаря использованию пространственного

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: muhrawi@yahoo.com

мультиплексирования и разнесения, направлению узких лучей к пользователям и обеспечению надежной связи даже в труднодоступных местах. В данной статье описаны последние примеры применения системы Massive MIMO в патентах США. Кроме того, приводится краткое описание системы Massive MIMO.

Ключевые слова: патенты США, Massive MIMO, структура и области применения.

Цитирование: Аль-Рави М. Применение технологии Massive MIMO в патентах США / М. Аль-Рави // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 546–552. EDN: UJSKPN

Introduction

Because it can significantly increase the capacity and dependability of wireless systems, multiple-input multiple-output (MIMO) technology has been thoroughly studied and integrated into many wireless standards over the past 20 years. Point-to-point MIMO links, in which two devices, each with multiple antennas, communicate directly, were the focus of initial research. However, more realistic multi-user MIMO (MU-MIMO) systems have become the focus of recent research. A base station (BS) with multiple antennas serves multiple single-antenna users concurrently in these systems, distributing the multiplexing gain among all users. By using comparatively cheap single-antenna devices, this method lessens the need for costly equipment on the user's end. Furthermore, in contrast to point-to-point MIMO systems, MU-MIMO systems have the advantage of multi-user diversity, which reduces the dependence of their performance on the propagation environment. As a result, MU-MIMO is becoming more widely used globally and is a crucial part of communications standards like 802.11 (WiFi), 802.16 (WiMAX), and LTE. Base stations usually employ fewer than ten antennas in many MIMO implementations, which improves spectral efficiency but yields only modest gains.

Large-scale antenna systems (LSAS) are also being developed to achieve significant performance improvements and simplify signal processing requirements, as recent advances in wireless communication have led to the development of massive MIMO systems, or large-scale antenna systems (LSAS). Each BS in these systems has a much greater number of antennas, often 100 or more, than in traditional MIMO systems [1].

Massive MIMO Structure

Fig. 1 shows a large MU-MIMO network with numerous antennas at the base station (BS) serving several users at once. Random matrix theory provides the theoretical underpinnings for the advantages of massive MIMO, implying that the effects of uncorrelated noise and small-scale fading decrease with the number of antennas [2]. This indicates that in a perfect massive MIMO system, the energy needed to send each bit drops toward zero, the number of users per cell becomes independent of cell size, and the quality of communication increases as the number of antennas increases. Furthermore, matched-filter (MF) precoding and detection are two basic linear signal processing methods that can be used in massive MIMO systems and are adequate for efficiently utilizing these performance improvements.

Applications of Massive MIMO in US Patents

A method, device, and system for determining an array antenna's total radiated power were provided by the patent in [3]. The array antenna's Rayleigh resolution in an angle space is determined, and a stepping

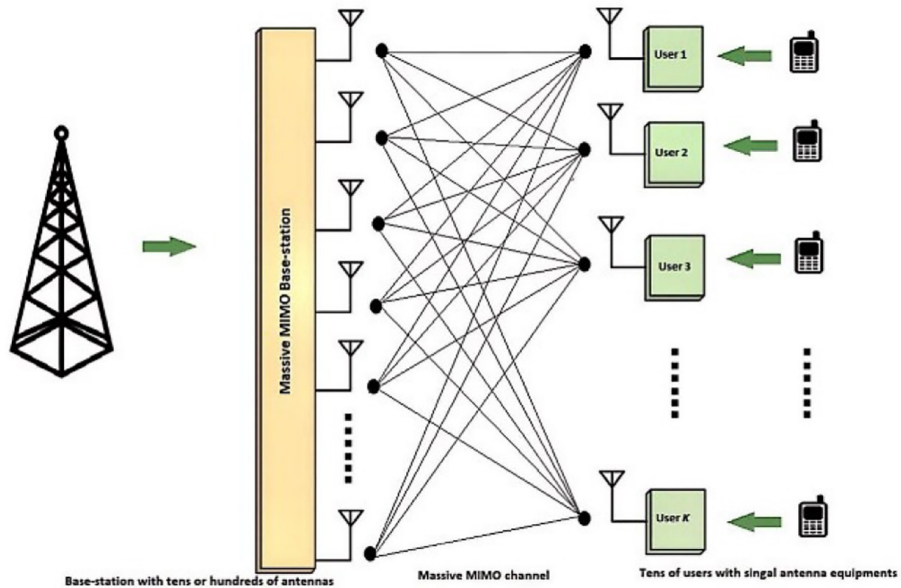


Fig. 1. Massive MIMO Structure

grid spacing of sampling points is set in accordance with the Rayleigh resolution. The sampling points are then determined in accordance with the stepping grid spacing, the equivalent isotropic radiated power (EIRP) is measured at the locations of the sampling points, and the TRP is calculated based on the EIRP. In addition to reducing measurement errors when compared to a traditional rest mode that uses an angle stepping grid with θ_{grid} and ϕ_{grid} of 15° , this also improves measurement efficiency by reducing the number of sampling points through a normalized wave vector space transformation.

The methods and devices for a user equipment (UE)-coordination set for a wireless network are described in [4]. A base station designates a group of UEs to create a UE-coordination set so that data meant for a target UE within the UE-coordination set can be transmitted and received jointly. One of the UEs in the UE-coordination set is chosen by the base station to serve as the coordinating UE for the UE-coordination set. The coordinating UE is then instructed to coordinate the joint transmission and reception of the data meant for the target UE by means of a request message. A downlink signal is then sent by the base station to every UE in the UE-coordination set. The downlink signal is demodulated and sampled by each UE in the UE-coordination set. The samples are then sent to the coordinating UE, which aggregates and processes the samples to produce decoded data.

A node first receives a first information block in [5], which is used to indicate K_1 reference signal resource groups, each of which contains at least one reference signal resource. Next, it measures a first reference signal resource group, which is one of the K_1 reference signal resource groups. Finally, it transmits a first measurement result, which is obtained by using a measurement for the first reference signal resource group. The reference signal resource includes at least one SSB or CSI-RS resource, and the first reference signal resource group is identified from the K_1 reference signal resource groups based on the location information of the first node. By introducing UAVs to lower the measurement overhead, the current application enhances the configuration and reporting method of measurements under a 5G NR system.

Techniques and equipment for adaptive phase-changing devices in multiple-input multiple-output transmissions are described in [6]. For multiple-input, multiple-output, or MIMO, transmissions, a base station chooses one or more adaptive phase-changing devices, or APDs, to employ in at least one communication path. Using at least one APD and one UE, the base station can carry out a channel characterization procedure for the minimum number of communication paths. The base station sets up at least one APD to enable single user-MIMO communication with a UE or multiple user-MIMO communication with multiple UEs based on the outcomes of the channel characterization process. By doing this, the base station can use APDs to implement MIMO transmissions, which can increase a wireless network's spectral efficiency by communicating with at least one UE using the same time and frequency resources..

Methods and apparatus in a fifth-generation wireless communications network, including an example method in a wireless device, are described in [7]. These include establishing a reporting quality threshold for a channel state information (CSI) parameter; measuring each of a plurality of beams from a first predetermined set of beams for evaluation; comparing the measurement for each of the plurality of beams to the reporting quality threshold; stopping the measurement and evaluation process when it is determined that the reporting quality threshold is met for one of the beams, so that one or more beams in the first predetermined set of beams are not measured and evaluated; and reporting, to the wireless communications network, CSI for one of the beams.

Implementations of an antenna structure are provided in [8]. The antenna structure in one implementation consists of a first stacked radiating structure with multiple radiators at each stack level, a second stacked radiating structure with multiple radiators at each stack level, and a feeding network that provides a signal to the radiators. The feeding network consists of a first branch that feeds a first radiator of each of the first and second stacked radiating structures, and a second branch that feeds a second radiator of each of the first and second stacked radiating structures.

A wireless communications method and device in a node are provided by the patent in [9]. A node first receives a first signaling in a first time-frequency resource set, and both the first signaling and the first reference signal resource are QCL. Next, it receives a MAC-layer control unit, which is used to indicate a second reference signal resource. Finally, it receives a second signaling in a second time-frequency resource set, and a second signal in a third time-frequency resource set. The first reference signal resource is linked to a first PCI, and the second reference signal resource is linked to a second PCI. Finally, the second signaling is used to indicate the third time-frequency resource set, and the second reference signal resource is QCL. To maximize system performance, the application enhances the device and procedure for updating TCI state under M-TRP..

The device, method, device, and computer-readable storage media of the beam-forming scheme in higher rank transmission for massive multiple input multiple output systems are examples of the current disclosure in [10]. The process entails identifying a target beam to carry a reference signal transmission from the base station to the user equipment, figuring out a target arrangement of the multiple ports formed at the base station's antenna array, and sending various parts of the target beam to the user equipment via a number of ports in accordance with the target arrangement. Thus, a novel beamforming technique is suggested for multi-port communication systems when Massive-MIMO selects higher rank transmission. To adhere to the QCL principles, the gNB would only choose the best beam with distinct halves in the same polarization.

In [11], a terminal device receives M pieces of sub-data from the first downlink channel, each of which represents a single data space in M data spaces. Based on a first dictionary corresponding to an i .sup.th data space, the terminal device determines the first information corresponding to the i .sup.th piece of first downlink channel sub-data for an i . sup. th piece of first downlink channel sub-data in the M pieces of first downlink channel sub-data. A total of M pieces of first information are determined. To indicate the M pieces of first information, the terminal device transmits the first indication information. Information about the channel environment can be represented by various data spaces. In order for an access network device to ascertain a correspondence between the first information and environment information, the terminal device feeds back first information corresponding to various data spaces. The accuracy of the initial data that the terminal device feeds back has increased.

At least one RE of a network node uses method 1400 in [12], which entails estimating the channel quality, calculating at least one BFW, and reducing the port in relation to input data and/or an input signal. Measurement data related to port reduction, at least one BFW computation, and channel quality estimation are sent from the RE to a REC.

In [13], a method for synchronized selection of user equipments (UEs) for both downlink (DL) Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO) operation and uplink (UL) MU-MIMO operation is presented. This method entails applying a common set of selection criteria for selecting a common pool of UE candidates for both DL and UL MU-MIMO operations. If the Stage-1 selection process using the common set of selection criteria is unable to find UE candidates for a list of available slots in the UE candidates list, the Stage-2 selection process is initiated, which entails 1) applying a first set of Stage-2 selection criteria to select DL-only traffic UEs as Stage-2 candidates for the UE candidates list, and 2) applying a second set of Stage-2 selection criteria to select UL-only traffic UEs as Stage-2 candidates for the UE candidates list.

Many elements of the current disclosure are generally related to wireless communication in [14]. According to certain aspects, a user equipment (UE) may be given configuration information that sets up resources related to an on-demand synchronization signal block (SSB). This information may occur twice, once during a cell's DTX inactive time and once during a cell's DTX active time. Whether the UE is allowed to request the on-demand SSB to be transmitted during the cell DTX inactive time may be indicated to the UE. Based at least partially on the indication, the UE can either transmit a request for the first instance of the on-demand SSB to be transmitted on the first occasion or choose not to transmit the request. Many other facets are explained.

A method and device for choosing a beam used in communication in a massive-MIMO beamforming environment is described in [15]. This includes a base station with a communication unit that can form multiple beams and communicate with a terminal apparatus, as well as a control unit that can send the first identification information of a group that communicates with the terminal apparatus to the terminal apparatus. The first identification information is distributed to groups, each of which includes multiple beams to be formed.

A technique for lowering the transmission's peak-to-average power ratio (PA-PR) through the use of multiple-input multiple-output (MIMO) from a transmitter is revealed in [16]. The process consists of defining a rank-extended MIMO transmission towards one or more intended receivers and one or more virtual receivers (where the one or more virtual receivers reside in a null space of a MIMO channel between the transmitter and the one or more intended receivers), creating a rank-extended MIMO

signal for the rank-extended MIMO transmission (where the rank-extended MIMO signal consists of an intended receiver signal portion and a virtual receiver signal portion), figuring out a clipping signal for the rank-extended MIMO signal, and combining the rank-extended MIMO signal with a projection of the clipping signal onto the null space of the MIMO channel to create a PAPR reduced MIMO signal. The technique also includes sending the PAPR reduced MIMO signal over the MIMO channel in certain implementations. Additionally disclosed are the corresponding computer program product, apparatus, user device, control node, radio access node, and system.

In [17], the application offers an uplink precoding indication method that includes: sending first indication information and third indication information when a terminal device's uplink transmission layer count is less than or equal to X ; or sending first indication information, second indication information, and third indication information when a terminal device's uplink transmission layer count is greater than X . In the former case, the first indication information shows the index of a first codeword in a first codebook and the number of uplink transmission layers of the first codeword; the second indication information shows the index of a second codeword in the first codebook and the number of uplink transmission layers of the second codeword; the third indication information shows that a terminal device's uplink transmission layer count is greater than X , and the second codeword and the first codeword have the same coherent capability.

Summary and Conclusion

Adding a large array of antennas to a base station (BS) is the fundamental concept behind massive MIMO, which has the potential to significantly improve energy and spectral efficiency. In this way, massive MIMO can support more users and provide faster data rates with lower power consumption, making it a promising technology for applications in future wireless networks. Therefore, this paper gave a brief explanation of how massive MIMO is used in US patents.

References

- [1] Kalra B., Sharma M. M., and Jaiverdhan. Comprehensive Review of Massive MIMO Systems: Key Technologies, Challenges, and Future Directions, *Innovation in MIMO Technologies, Systems, and Antennas. IntechOpen*, Feb. 11, 2025. doi: 10.5772/intechopen.1007750.
- [2] Marzetta T.L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas, in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11), 3590–3600, doi: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [3] Zhuang, Yanchun et al. *Method, apparatus and system for measuring total radiated power of array antenna*. US-12191920B 2, 2025.
- [4] Wang, Jibing et al. *User-Equipment-Coordination Set for a Wireless Network*. US-20250015839A1, 2025
- [5] JIANG, Qi et al. *Method and device in nodes used for wireless communication*. US-20250030521A1, 2025.
- [6] Wang, Jibing et al. *Multiple-Input, Multiple-Output Transmissions Using Adaptive Phase-Changing*, US-20250055507A1, 2025.
- [7] Parkvall, Stefan et al. *Network architecture, methods, and devices for a wireless communications network*. US-12231284B 2, 2025.

- [8] Gonzalez, Ignacio et al. *Antenna structure*. US-20250062535A1, 2025.
- [9] Jiang, Qi et al. *Method and device in nodes used for wireless communication*. US-20250071571A1, 2025.
- [10] Liu, Di et al. *Beamforming scheme in higher rank transmission*. US-12244376B 2, 2025.
- [11] Hang, Haicun et al. *Communication method and apparatus*. US-20250081205A1, 2025.
- [12] Karlsson, Jonas et al. *Massive Multiple Input Multiple Output Radio Unit Uplink Interface*. US-20250141509A1, 2025.
- [13] Ramalingam, Manoharan. *Synchronized downlink and uplink multi-user MIMO candidate selection in massive-MIMO system*. US-12294941B 2, 2025.
- [14] Abotabl, Ahmed Attia et al. *Techniques for selective transmission of an on-demand synchronization signal block during a cell discontinuous transmission inactive time*. US-20250203704A1 2025.
- [15] Nakayama, Takashi. *Base station, terminal apparatus, communication method and recording medium*. US-12341644B 2, 2025.
- [16] Laporte, Pierre-Andre et al. *Paprr reduction for MIMO transmission*. US-20250219884A1, 2025.
- [17] XU, Jun et al. *Uplink precoding indication method and communication apparatus*. US-20250219687A1, 2025.

EDN: XDSXBQ

УДК 681.3.07

A Risk-Based Model of a Data Transmission System in Credit and Financial Institutions Using Quantum Communications

Evgeny A. Parshin,
Alexander S. Zakharov*, Alexander V. Timoshenko,
Sergey S. Kulikov and Nikolay N. Fedorov
*Financial University under the Government
of the Russian Federation
Moscow, Russian Federation*

Received 12.01.2026, received in revised form 24.03.2026, accepted 18.04.2026

Abstract. The purpose of the study is to identify and substantiate rational options for improving the security of the data transmission network (DTS) of credit and financial institutions in the context of the emergence and development of so-called “quantum threats”. Special attention is paid to the possibilities of modernizing existing SPDs using quantum communication network technologies, as well as the development of a comprehensive indicator that allows assessing the effectiveness of proposed protection measures and their economic feasibility. The paper uses a formalized approach to describing the processes of modernization of the bank’s SPD, based on the theory of risk analysis and a graph model of the network structure representation. The key parameters of the SPD functioning are taken into account, including the volume and intensity of transactions, current requirements for their level of security, the cost of implementing and operating cryptographic information protection tools, as well as potential and foreseeable threats associated with the development of quantum technologies. An indicator for evaluating the effectiveness of SPD modernization based on an integrated risk assessment has been developed and substantiated. It is shown that this indicator makes it possible to take into account both the limitations of financial resources allocated for modernization and the possible damage caused by the implementation of quantum threats. The results obtained confirm the applicability of the proposed approach for choosing optimal modernization options. The proposed risk indicator provides a comprehensive assessment of the effectiveness of SPD modernization and can serve as a tool for making informed decisions in the field of information security. Its use makes it possible to take into account a combination of economic, technological and threatening factors, which is especially important in the context of the emergence of new risks caused by the development of quantum computing.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: zakharov.as17@physics.msu.ru

Keywords: quantum threat, risk analysis, cryptographic protection system, graph model, means of data transmission.

Acknowledgements. This article was prepared based on the results of research conducted with budgetary funds under a state assignment for the Financial University.

Citation: Parshin E. A., Zakharov A. S., Timoshenko A. V., Kulikov S. S., Fedorov N. N. A Risk-Based Model of a Data Transmission System in Credit and Financial Institutions Using Quantum Communications. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(4), 553–560. EDN: XDSXBQ



Риск-ориентированная модель системы передачи данных в кредитно-финансовых организациях с использованием квантовых коммуникаций

Е. А. Паршин, А. С. Захаров, А. В. Тимошенко,
С. С. Куликов, Н. Н. Федоров
*Финансовый университет при Правительстве РФ
Российская Федерация, Москва*

Аннотация. Целью исследования является определение и обоснование рациональных вариантов повышения защищенности сети передачи данных (СПД) кредитно-финансовых организаций в условиях возникновения и развития так называемых квантовых угроз. Особое внимание уделяется возможностям модернизации существующих СПД с использованием технологий квантовых коммуникационных сетей, а также разработке комплексного показателя, позволяющего оценивать эффективность предлагаемых мер защиты и их экономическую целесообразность. В работе применяется формализованный подход к описанию процессов модернизации СПД банка, основанный на теории риск-анализа и графовой модели представления структуры сети. Учитываются ключевые параметры функционирования СПД, включая объем и интенсивность транзакций, текущие требования к уровню их защищенности, стоимость внедрения и эксплуатации средств криптографической защиты информации, а также потенциальные и прогнозируемые угрозы, связанные с развитием квантовых технологий. Разработан и обоснован показатель оценки эффективности модернизации СПД, основанный на интегральной оценке риска. Показано, что данный показатель позволяет учитывать как ограничения финансовых ресурсов, выделяемых на модернизацию, так и возможный ущерб от реализации квантовых угроз. Полученные результаты подтверждают применимость предложенного подхода для выбора оптимальных вариантов модернизации. Предложенный показатель риска обеспечивает комплексную оценку эффективности модернизации СПД и может служить инструментом для принятия обоснованных решений в области защиты информации. Его использование позволяет учитывать совокупность экономических, технологических и угрозных факторов, что особенно важно в условиях появления новых рисков, обусловленных развитием квантовых вычислений.

Ключевые слова: квантовая угроза, риск-анализ, СКЗИ, графовая модель, СПД.

Благодарности. Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финуниверситета.

Цитирование: Паршин Е. А. Риск-ориентированная модель системы передачи данных в кредитно-финансовых организациях с использованием квантовых коммуникаций / Е. А. Паршин, А. С. Захаров, А. В. Тимошенко, С. С. Куликов, Н. Н. Федоров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(4). С. 553–560. EDN: XDSXBQ

Введение

Неуклонный рост числа проводимых транзакций в банковской среде ведет к повышению сложности решения актуальной задачи классификации угроз или похищения средств в транзакции, а оснащение нового поколения квантовых компьютеров алгоритмами поиска ключа, позволяющими оперативно изменять параметры шифрования, приводит к еще большему ужесточению требований к средствам обеспечения безопасности банковских систем [1–4].

В настоящее время классификация деструктивных воздействий угроз по взлому проводится на основе метода защиты транзакций на основе принципов ACID (аббревиатура с английского – атомарность, согласованность, изоляция и долговечность), которые не позволяют эффективно справляться с постквантовыми угрозами [5–8].

В этой связи актуальной задачей является модернизация системы информационного обеспечения (СИО) кредитно-финансовой сферы, работающей с большими объемами данных и различными вариантами с различной стоимостью [9, 10]. Одним из требований к СИО в настоящее время является постфактумный контроль и упреждающее риск-ориентированное управление, что обусловлено ростом сложности финансовых схем, потребностью в реальном времени оценивать платежеспособность и добросовестность контрагентов, а также квантовые угрозы.

Отсутствие методов комплексной оценки и оперативной компенсации негативного влияния квантовых угроз на характеристики инфокоммуникационных систем не позволяет найти рациональное оптимальное решение выделения ограниченных средств на модернизацию СПД для повышения эффективности защищенности и надежности систем передачи данных в кредитно-финансовой сфере. Все это обуславливает необходимость решения вопроса о модернизации существующих СПД о финансовых операциях. Данное обстоятельство обуславливает необходимость разработки риск-ориентированной модели технико-экономической оценки текущей защищенности и необходимости модернизации информационных систем кредитно-финансовой сферы, а также их компонентов в условиях широкого внедрения квантовых коммуникаций.

Проведенный анализ показал необходимость разработки модели, способной оценивать не только затраты и выгоды, но и учитывать при этом специфические риски, присущие как ИТ-проектам, так и квантовым коммуникациям.

Разработка таких моделей модернизации информационной сети с учетом финансовых ограничений потребовала соответствующей формализации модели.

1. Формализованная постановка задач модели

Результатом модели должна быть зависимость и показатель степени модернизации. Модель должна быть адекватной, точной и универсальной. Будем полагать, что процесс классификации с требуемым уровнем точности при заданных параметрах промежуточных узлов и характеристик абонентов представим как процесс влияния факторов на достоверность полученной информации.

Под риском в статье понимается изменение уровня защищенности при заданном финансировании и пропускной способности линии передачи транзакции в разные моменты времени. Тогда риск-ориентированная модель представима как формализация процесса выбора оптимального варианта модернизации информационных систем кредитно-финансовой сферы из множества

вариантов при ограничениях на стоимость, время модернизации и технических характеристиках. Оптимизационная задача выглядит следующим образом:

$$\lim_{\substack{P \rightarrow P_{\text{зад}} \\ C \rightarrow C_{\text{опт}} \\ TX \rightarrow TX_{\text{опт}}}} (R_{\text{var}} - R_{\text{var}}^*) = 0,$$

$$\{TX\}_{\text{опт}} = \operatorname{argmax} L(C, P, TX),$$

$$\{C\}_{\text{опт}} = \operatorname{argmin} L(C, P, TX),$$

где M – методика выбора оптимального облика модернизации; R_{var} – риск варианта, соответствующего оптимальным характеристикам; R_{var}^* – риск выбранного варианта; $P_{\text{зад}}$ – заданная вероятность обнаружения квантовой угрозы; $C_{\text{опт}}$ – оптимальная стоимость модернизации; $TX_{\text{опт}}$ – оптимальные технические характеристики модернизации; L – вектор параметров информационной системы. Такая формализация основана на оценке множества вариантов и выбора наиболее оптимального заданному, что позволяет оценить сгенерированные варианты без использования перебора [11].

В такой постановке целевой функцией является риск варианта модернизации или риск того, что данный вариант модернизации не сможет обнаружить угрозу при заданной вероятности и времени классификации. Время классификации определяется как:

$$T_{\text{class}} = \min t \text{ при } P(\mathcal{Y}(t)) \geq \theta,$$

где $\mathcal{Y}(t)$ – спрогнозированный класс угрозы; P – вероятность правильной классификации; θ – заданный порог доверия; t – время выполнения операций классификации, времени измерения и времени накопления. Вероятность классификации зависит от последовательности векторов характеристик отделений с центром обработки данных (ЦОД) с минимальным уровнем ошибок измерения.

Проведенный анализ модернизации информационной системы показал, что для разработки риск-ориентированной модели технико-экономической оценки модернизации информационных систем кредитно-финансовой сферы с использованием квантовых коммуникаций необходимо решить следующие задачи:

- описание оценки защищенности каналов сети на основе графоаналитического представления;
- формализованное описание влияния квантовых угроз через риск-анализ изменения характеристик отделения с ЦОД;
- формализованное описание информационного обеспечения банковской системы при переводе транзакции с учетом квантовых угроз.

Таким образом, проведена формализация задач модели. Для повышения адекватности модели необходимо определить приоритеты модернизации компонентов инфокоммуникационной сети.

2. Определение приоритета модернизации компонентов инфокоммуникационной сети на основе оценки ущерба компрометации линий связи

В интересах оценки защищенности каналов коммуникационную сеть можно представить в виде графовой модели, вершины которой представляют собой узлы связи, т.е. банковские отделения с ЦОД, а ребра – каналы между ними. Каждое ребро между двумя вычислительными узлами описывается количеством передаваемых за единицу времени сообщений и их рангами.

Перейдем к описанию банковских процессов, зависящих от средств криптографической защиты информации. Каждый из процессов займет свой уровень важности или критичности сообщений:

- первый – защита платежей и переводов денежных средств, поскольку Положение Банка России обязывает всех операторов по переводу денежных средств (банки, платежных агентов) использовать СКЗИ для защиты информации при осуществлении переводов;
- второй – аутентификация пользователей и клиентов в системе согласно Стандарту Банка России по безопасности финансовых операций;
- третий – электронная подпись документов;
- четвертый – обмен электронными сообщениями с Банком России;
- пятый – защита банкоматов и обеспечение безопасности с использованием пластиковых карт;
- шестой – управление ключевой информацией;
- седьмой – защита баз данных;
- восьмой – межбанковские расчеты и системы передачи финансовых сообщений;
- девятый – операции с цифровыми валютами.

Этот ущерб от перехвата сообщения определенного ранга можно выразить через параметр d_{ij} , где i – сообщение j -го уровня значимости, и описать степенной функцией по формуле:

$$d_{ij} = \exp(kj),$$

где j – уровень важности сообщения (1...9), k – коэффициент связности. Степенной вид функции выбран для нелинейного описания ущерба при возрастании ранга перехватываемого сообщения.

Получив распределение сообщений по уровням значимости для каждого ребра между двумя узлами связи (рис. 1), можно оценить суммарный ущерб их компрометации как интегральный ущерб для ребра, равный сумме рисков перехватов всех сообщений всех уровней, проходящих через определенный канал за единицу времени:

$$D_{ab} = \sum_{i,j} d_{ij}^{ab},$$

где a, b – узлы связи, между которыми проходит обмен сообщениями.

Указанный параметр представим в дифференциальной форме для промежутка времени dt и в интегральной форме для интервала времени ΔT , в дальнейшем он может быть использован в качестве веса дуги для ранжирования критичности каналов связи (рис. 2) при принятии решения о модернизации при фиксированном бюджете или переключении в режим повышенной защиты данных для противодействия угрозам.

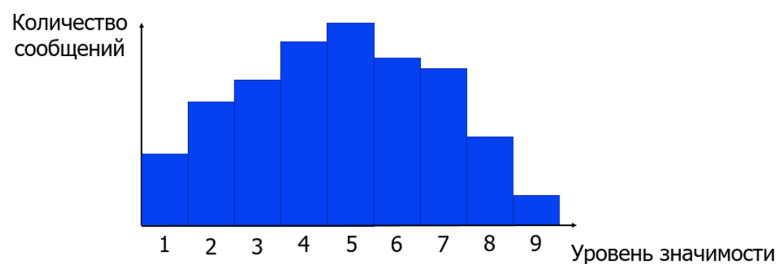


Рис. 1. Графическое представление распределения сообщений, проходящих через канал связи за определённое время, по значимости

Fig. 1. Graphical representation of the distribution of messages passing through a communication channel over a certain period of time, based on their significance

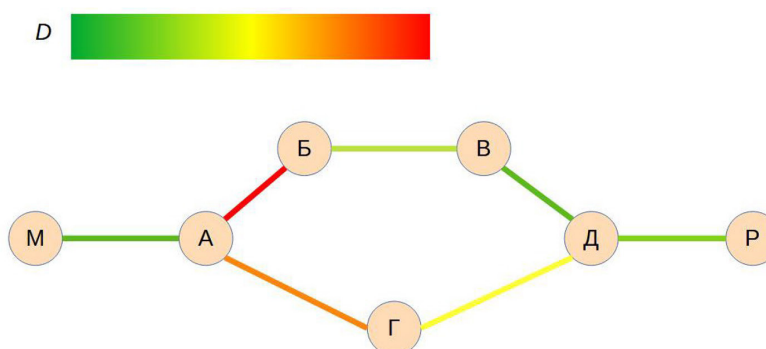


Рис. 2. Графическое представление ранжирования критичности возможной компрометации каналов связи сети в зависимости от числа и значимости передаваемых через него сообщений

Fig. 2. Graphical representation of the ranking of the criticality of possible network communication channel compromise, depending on the number and significance of messages transmitted through it

После определения критичности, т.е. ущерба, компрометации отдельных компонентов сети нужно также определить вероятность их компрометации как функцию риска $\alpha(R)$ для комплексной оценки возможного ущерба и устойчивости системы к угрозам, т.е. общей ее защищенности. Для этого может быть применена теория риск-анализа.

3. Математическая модель риск-анализа для оценки степени воздействия квантовых угроз

Риск-анализ представляет собой часть научной теории оценки работоспособности систем. Согласно концепции Ю. И. Шокина, риск является не статической, а динамической величиной, которая существенно зависит от объема и качества доступных знаний I . В указанных работах обоснована необходимость рассмотрения риска как функции $R = \{A, C, Q; I\}$, где A – сценарии, C – последствия, Q – мера неопределенности, а I – совокупность информации.

Любая задача оптимизации, связанная с оценкой потерь при вычислении точности в зависимости от принятого решения, должна учитывать не только ожидаемые потери, но и риски, обусловленные самим решением. При решении задачи оперативной классификации опасных

ситуаций под риском будем понимать число, характеризующее уровень воздействия деструктивных факторов на узел.

Исследования показали, что риск-анализ позволяет решать задачи оценивания потенциальных изменений характеристик отделения с ЦОД. Поэтому исходя из теории риск-анализа, процесс оценки характеристик отделения с ЦОД может быть представлен как риск потери средств, который определяется как функция средств Δ и плотности вероятности изменения w воздействий по каждому из деструктивных факторов:

$$R_{\Delta} = \sum_i \Delta_i \prod_j w_j.$$

Риск в данном случае является не вероятностной характеристикой, а его размерность определяется той характеристикой, изменение которой надо найти.

Для учета влияния негативных факторов на процесс классификации введем обобщенный функционал риска:

$$R_{\text{общ}} = \alpha R_{\text{внут}} + \beta R_{\text{внеш}} + \gamma R_{\text{взаим}},$$

где α , β , γ – весовые коэффициенты, учитывающие значимость факторов, определяемые эмпирически и изменяющиеся от 0 до 1 с условием $\alpha + \beta + \gamma = 1$. Данное представление дает основу для представления всех факторов в иерархию, где коэффициенты определяют уровень значимости. В данной работе не представлено исследование чувствительности риска от α , β и γ из-за необходимости дополнительной оценки риска взаимодействия.

Итоговый показатель приоритета модернизации компонента коммуникационной сети является функцией как от ущерба при возможной компрометации линии, так и риска компрометации:

$$Pr_{ab} = f(D_{ab}, R_{ab}).$$

В дальнейшем на основе модели формируется метод обоснования метода модернизации на основе генерации вариантов, преследующий цель минимизации суммарного показателя приоритета всей сети $\sum Pr_{ab} \rightarrow \min$.

Заключение

В статье представлена модель информационной системы кредитно-финансовой организации с использованием квантовых коммуникаций для технико-экономической оценки вариантов модернизации, отличающаяся от известных тем, что позволяет получить зависимость риска воздействия квантовой угрозы от финансовых средств, выделяемых на модернизацию с учетом ограничений.

Модель позволяет решить задачи описания оценки защищенности каналов сети на основе графоаналитического представления; формализованного описания влияния квантовых угроз через риск-анализ изменения характеристик отделения с ЦОД и формализованного описания информационного обеспечения банковской системы при переводе транзакции с учетом квантовых угроз. По результатам проведенных исследований обоснована эффективность формализации защищенности каналов коммуникационной сети в виде графа, который позволяет определить наиболее незащищенные участки на основе ранжирования по уровню важности.

Разработанная модель основывается на оригинальном представлении всех деструктивных факторов квантовой угрозы в иерархическую модель, где весовые коэффициенты обобщенного функционала риска определяют уровень значимости.

Список литературы / References

- [1] Sebastian D. Modernizing Credit Risk with Data Mesh: A Large Bank's Transformation to Real-Time Credit Intelligence, *Journal of Financial Transformation.*, 2024, 59, 45–58.
- [2] Lin X., Zhang S., Zachariadis M. The Effects of Bank API Adoption on Bank Efficiency and Credit Risk, *Proceedings of the 45th International Conference on Information Systems (ICIS).*, Bangkok, 2024, 112–128 p.
- [3] Lu Y., Zhan M. The Digital Transformation of Banks, Information Structure, and the Substitutability between Trade Credit and Bank Credit, *Journal of Financial Research.*, 2025, 48(2), 301–325. – DOI: 10.1111/jofi.12345
- [4] Rabari R. The Role of Information Technology in Loan Management: Impact on the Competitiveness of Indian Banks, *International Journal of Banking and Finance.*, 2024, 19(3), 78–95.
- [5] Lobko O., Bilyi M. Strategic aspects of ensuring digital transformation of the bank's credit management system, *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice.*, 2023, 5(52), 22–36.
- [6] Rahimli A. The Role of Modern Banking Technologies in Optimizing Active Operations, *Economic Forum.*, 2024, 14(1), 67–81.
- [7] De Castro F.L., Silva D.F.L. e. Financial Technologies in the Digital Transformation of Banks, *Journal of Banking and Finance.*, 2023, 150, Article 106845. – DOI: 10.1016/j.jbankfin.2023.106845
- [8] Walker M. Modernization of Core Banking Systems: Approaches and Best Practices, *Journal of Financial Transformation.*, 2024, 60, 92–108.
- [9] Gupta S., Sharma A. Application of Artificial Intelligence and Machine Learning in Credit Risk Management: A Systematic Review, *Expert Systems with Applications.*, 2025, 260, Article 125432. – DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125432
- [10] El Sawy O.A., Vassilakopoulou P. Digital Transformation in the Banking Industry: A Multi-stakeholder Perspective, *MIS Quarterly Executive.*, 2023, 22(4), 285–304.
- [11] Захаров А.С. Применение метода средне-дисперсионного анализа вариантов модернизации радиолокационной станции мониторинга космического пространства в нечетких множествах, *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*, 2024, 197, 14–19 [Zakharov A.S. Application of the Method of Medium Dispersion Analysis of Options for Modernization of the Radar Station for Monitoring Outer Space in Fuzzy Sets, *Issues of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism.*, 2024, 197, 14–19 (in Russian)]