



Ивановский государственный энергетический университет

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

2026 / Вып. 1

Учредитель: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Г.В. Ледуховский, д-р техн. наук (Иваново)
(главный редактор)
И.К. Муравьев, канд. техн. наук (Иваново)
(зам. главного редактора)
Е.Н. Бушуев, д-р техн. наук (Иваново)
А.Р. Гайдук, д-р техн. наук (Таганрог)
В.П. Жуков, д-р техн. наук (Иваново)
Ю.Б. Казаков, д-р техн. наук (Иваново)
А.Б. Капранова, д-р физ.-мат. наук (Ярославль)
С.В. Ключина, нач. УИУНЛ (Иваново)
А.Р. Колганов, д-р техн. наук (Иваново)
С.В. Косяков, д-р техн. наук (Иваново)
В.В. Курейчик, д-р техн. наук (Таганрог)
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук (Москва)
А.В. Митрофанов, д-р техн. наук (Иваново)
А.Ю. Мурзин, канд. техн. наук (Иваново)
В.Ф. Очков, д-р техн. наук (Москва)
С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук (Иваново)
М.Ю. Таршис, д-р техн. наук (Ярославль)
А.И. Тихонов, д-р техн. наук (Иваново)
В.А. Шуин, д-р техн. наук (Иваново)

Над номером работали:

Ответственные за выпуск: Е.Н. Бушуев, А.Ю. Мурзин,
А.И. Тихонов, А.Р. Колганов, С.В. Косяков

Начальник УИУНЛ
Технический редактор
Редактор

С.В. Ключина
Н.В. Королева
С.М. Коткова

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Т.А. Кулагина, И.В. Кириллова, Т.А. Соловьева. Повышение энергоэффективности комбинированных искусственных топлив....**5**

П.В. Белявская, П.А. Щинников. Модернизация котла КМ-75-40 путем установки предтопка с кипящим слоем при сжигании кородеревесных отходов.....**12**

А.Р. Хайруллин, А.И. Хайбуллина, Е.Р. Киржацких. Численное исследование интенсификации теплообмена шахматного пучка труб при различных режимных параметрах вынужденных пульсаций потока....**21**

Е.А. Шелгинский, Ю.В. Яворовский, А.А. Шелгинский. Выбор рабочих тел для органического цикла Ренкина на примере производства азотной кислоты.....**30**

В.В. Глазков, А.М. Зотов, И.А. Зубрицкий. Концепция использования теплового аккумулятора для исследовательской ядерной установки МБИР.....**40**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Д.Ю. Вихарев, А.Ю. Мурзин, Н.А. Родин. Аналитический расчет собственной индуктивности вторичной обмотки трансформатора тока с тороидальным магнитопроводом.....**49**

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Е.В. Конюшенко, И. Рахманов, О.Н. Молоканов, Д.А. Ромашкин, А.С. Иванов, Ю.М. Сафонов, О.И. Байдакова. Исследование топологии электродвигателя Xiaomi Super Motor V6.....**59**

Д.С. Тарицын, О.Н. Молоканов. Магнитная передача с магнитной системой Хальбаха для вспомогательных приводов.....**66**

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.В. Голубев, И.К. Муравьев, И.А. Пересыпкин, А.С. Обуваев. Интерактивный компьютерный тренажер – современное средство подготовки оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП.....**75**

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

В.П. Жуков, А.В. Огурцов, А.С. Шмелев, И.А. Кокулин. Моделирование разделения дисперсных сред в многоступенчатой установке с рециркуляцией нецелевых продуктов.....**84**

Журнал «Вестник Ивановского государственного энергетического университета» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям: 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования; 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы; 2.4.3. Электроэнергетика; 2.4.5. Энергетические системы и комплексы; 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника; 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Предоставляется информация об опубликованных статьях в систему РИНЦ согласно договору № 580-12/2012 ЛО от 13 декабря 2012 г. с ООО «Научная электронная библиотека».

Журнал зарегистрирован в базе данных Ulrich's (США).



Ivanovo State Power Engineering University

Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University (Bulletin ISPEU)

The Journal has been published since 2001

ISSN 2072-2672

2026 / Issue 1

Founder: Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

EDITORIAL BOARD:

G.V. Ledukhovskiy, Doctor of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor)
I.K. Muravyev, Candidate of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor Assistant)
E.N. Bushuyev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.R. Gaiduk, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.P. Zhukov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.B. Kapranova, Doctor of Physics and Mathematics
(Yaroslavl)
S.V. Klyunina (Ivanovo)
A.R. Kolganov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.V. Kureychik, Doctor of Engineering (Taganrog)
M.Sh. Misrikhanov, Doctor of Engineering (Moscow)
A.V. Mitrofanov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.Yu. Murzin, Candidate of Engineering (Ivanovo)
V.F. Ochkov, Doctor of Engineering (Moscow)
S.V. Tararykin, Doctor of Engineering (Ivanovo)
M.Yu. Tarshis, Doctor of Engineering (Yaroslavl)
A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.A. Shuin, Doctor of Engineering (Ivanovo)

The issue is prepared by:

Responsible people for the issue:

E.N. Bushuyev, A.Yu. Murzin, A.I. Tikhonov,
A.R. Kolganov, S.V. Kosyakov

Chief of Educational and Scientific
Literature Publishing Office
Technical Editor
Editor

S.V. Klyunina
N.V. Koroleva
S.M. Kotkova

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

T.A. Kulagina, I.V. Kirillova, T.A. Solovyova.
Increasing the energy efficiency of combined
artificial-processed fuel.....**5**

P.V. Belyavskaya, P.A. Shchinnikov.
Modernization of KM-75-40 boiler by installing a
fluidized bed furnace for bark and wood waste
combustion.....**12**

**A.R. Khayrullin, A.I. Khaibullina,
E.R. Kirzhatskikh.** Numerical study of heat
transfer enhancement in a staggered tube
bundle under various operating parameters of
forced flow pulsation.....**21**

**E.A. Shelginsky, Y.V. Yavorovsky,
A.Ya. Shelginsky.** Selection of working fluid for
organic Rankine cycle using nitric acid
production as an example.....**30**

V.V. Glazkov, A.M. Zotov, I.A. Zubritsky.
Concept of using a heat accumulator for MBIR
research reactor.....**40**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

D.Yu. Vikharev, A.Yu. Murzin, N.A. Rodin.
Analytical calculation of self-inductance of the
secondary winding of a current transformer with
a toroidal magnetic core.....**49**

ELECTROMECHANICS

**E.V. Konyushenko, I. Rakhmanov, O.N. Molo-
kanov, D.A. Romashkin, A.S. Ivanov,
Yu.M. Safonov, O.I. Baidakova.** Study of the
topology of Xiaomi Super Motor V6 electric motor...**59**

D.S. Taritsyn, O.N. Molokanov. A Halbach array magnetic gear for auxiliary drives.....66

AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

A.V. Golubev, I.K. Muraviev, I.A. Peresypkin, A.S. Obuvaev. Interactive computer simulator as a modern means of training operational personnel of thermal automation and measurement and automated process control systems shops.....75

MATHEMATICAL METHODS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY

V.P. Zhukov, A.V. Ogurtsov, A.S. Shmelev, I.A. Kokulin. Modeling the separation of dispersed media in a multistage unit with recirculation of non-target products.....84

The Journal «Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University» is included in the List of Leading Reviewed Scientific Journals and Publications, which are approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for publishing the main scientific results of the dissertations on the candidate and doctoral degrees for the following groups of specialties: 2.3.3. Automation and Control of Technological Processes and Production; 2.3.7. Computer Simulation and Computer-Aided Design; 2.4.2. Electrotechnical Complexes and Systems; 2.4.3. Electric Power Industry; 2.4.5. Energy Systems and Complexes; 2.4.6. Theoretical and Applied Heat Engineering; 2.6.13. Processes and Apparatuses of Chemical Technologies.

Information about published articles is sent to the Russian Science Citation Index by agreement with «Scientific Electronic Library» Ltd. No. 580-12/2012 LO of December 13, 2012.

The journal is registered in the foreign database Ulrich's Periodicals Directory.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 662.767:662.693

Татьяна Анатольевна Кулагина

Сибирский федеральный университет, доктор технических наук, заведующая кафедрой техносферной и экологической безопасности, Политехнический институт, Россия, Красноярск, телефон +7(391)206-21-95, e-mail: tak.sfu@gmail.com

Ирина Валерьевна Кириллова

Сибирский федеральный университет, старший преподаватель кафедры техносферной и экологической безопасности, Политехнический институт, Россия, Красноярск, телефон +7(391)206-21-95, e-mail: kirina.24@yandex.ru

Татьяна Алексеевна Соловьева

Дальневосточный федеральный университет, кандидат технических наук, доцент департамента энергетических систем, Политехнический институт, Россия, Владивосток, e-mail: mtasta@mail.ru

Повышение энергоэффективности комбинированных искусственных топлив

Авторское резюме

Состояние вопроса. Использование композиционных видов биотоплива, используемых для получения энергии на основе ископаемого топлива с добавлением отходов, имеющих существенную органическую составляющую, представляет собой своевременное решение задач ресурсосбережения и управления отходами. Важную роль в процессе их брикетирования играет лигнин, выступающий в качестве природного связующего. Исследования показывают, что комбинирование различных видов полуфабрикатов, например древесных опилок с агроотходами, возможно без использования первичных ресурсов и позволяет нивелировать их индивидуальные недостатки и улучшать характеристики конечного продукта.

Материалы и методы. Исследование проведено на основе лабораторного анализа топливных брикетов, состоящих из смеси опилок хвойных пород и органических отходов кролиководства. Биотопливные брикеты формировали методом прессования на экструзионном прессе. Древесную составляющую смеси подвергали первичной сушке, измельчению, термообработке, гомогенизации. Для оценки качества образцов с варьируемым содержанием биомассы от 0 до 40 % проведен комплексный анализ ключевых характеристик: влажности, насыпной плотности, прочности на сжатие, теплотворной способности и зольности. Статистическая обработка данных выполнена с использованием аналитической платформы Loginom Community.

Результаты. Проведен лабораторный анализ ключевых характеристик топливных брикетов из смеси опилок хвойных пород и органических отходов кролиководства. Экспериментально установлено, что содержание биомассы существенно влияет на свойства брикетов: теплотворная способность возрастает с увеличением ее доли до 25–30 %; прочность на сжатие достигает пикового значения при 20 % биомассы, после чего снижается из-за нарушения однородности структуры; зольность последовательно уменьшается с 4,5 % (0 % биомассы) до 1,8 % (40 % биомассы) благодаря низкому содержанию минеральных веществ в органических отходах; влажность сырья и насыпная плотность увеличивается с ростом доли биомассы, положительно влияя на уплотнение. В результате статистического анализа выявлена прямая корреляция между содержанием биомассы, влажностью и теплотворной способностью, а также обратная между содержанием биомассы и зольностью. Наилучший баланс между высокими энергетическими показателями и удовлетворительными прочностными характеристиками достигается в диапазоне 20–25 %.

Выводы. На основании проведенного исследования определено оптимальное содержание биомассы (органических отходов кролиководства) в комбинированном топливном брикете при значительном снижении зольности продукта.

Разработанная рецептура и технология позволяют производить твердое биотопливо с улучшенными эксплуатационными и экологическими свойствами, пригодное и удобное для практического использования.

Ключевые слова: комбинированное топливо, отходы деревообработки, топливный брикет, биомасса, органические отходы, энергетическая ценность, термообработка, прессование брикетов

Tatyana Anatolyevna Kulagina

Siberian Federal University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Head of Technosphere and Environmental Safety Department, Polytechnic Institute, Russia, Krasnoyarsk, telephone +7(391)206-21-95, e-mail: tak.sfu@gmail.com

Irina Valerievna Kirillova

Siberian Federal University, Senior Lecturer of Technosphere and Ecological Safety Department, Polytechnic Institute, Russia, Krasnoyarsk, telephone +7(391)206-21-95, e-mail: kirina.24@yandex.ru

Tatyana Alekseevna Solovyova

Far Eastern Federal University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Energy Systems Department, Polytechnic Institute, Russia, Vladivostok, e-mail: mtasta@mail.ru

Increasing the energy efficiency of combined artificial-processed fuel

Abstract

Background. Composite types of biofuels used to generate energy based on fossil fuels with the addition of waste that has a significant organic component are an important area of research in the context of resource conservation and waste management. Lignin plays an important role in the process of briquetting, acting as a natural binder. Research shows that it is possible to combine different types of semi-finished products, such as sawdust and agricultural waste, without using primary resources, which can help to eliminate their individual drawbacks and improve the characteristics of the final product.

Materials and methods. The study has been conducted on the basis of a laboratory analysis of fuel briquettes that consist of a mixture of coniferous sawdust and organic waste from rabbit farming. The biofuel briquettes have been formed using an extrusion press. The wood component of the mixture has been subjected to primary drying, grinding, heat treatment, and homogenization. A comprehensive analysis of key characteristics, including moisture content, bulk density, compressive strength, calorific value, and ash content, has been conducted to evaluate the quality of samples with varying biomass content ranging from 0 to 40 %. Statistical data processing has been performed using the Loginom Community analytical platform.

Results. A laboratory analysis of the key characteristics of fuel briquettes made from a mixture of coniferous sawdust and organic waste of rabbit farming has been carried out. It has been experimentally established that the content of biomass has a significant effect on the properties of briquettes. The calorific value increases with an increase in the proportion of biomass up to 25–30 %. The compressive strength reaches a peak value at 20 %, after which it decreases due to deformation of the homogeneity of the structure; the ash content decreases consistently from 4,5 % (0 % biomass) to 1,8 % (40 % biomass) due to the low content of minerals in organic waste. The moisture content of the raw material and the bulk density increase with the increase in the proportion of biomass, which has a positive effect on compaction. Statistical analysis has revealed a direct correlation between the biomass content, moisture content, and calorific value, as well as an inverse correlation between the biomass content and ash content. The best balance between high energy performance and satisfactory strength characteristics is achieved in the range of 20–25 %.

Conclusions. Based on the conducted research, the optimal content of biomass (organic waste from rabbit farming) in a combined fuel briquette has been determined in case of a significant reduction of the ash content of the product. The developed formulation and technology allow for the production of solid biofuel with improved operational and environmental properties, which is suitable and convenient for practical use.

Key words: combined fuel, wood processing waste, fuel briquettes, biomass, organic waste, calorific value, heat treatment, briquette pressing

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.005-011

Введение. Разработка рецептур комбинированных твердых биотоплив на основе энергетических отходов является перспективным направлением в решении задач энергосбережения и утилизации ценных органических остатков. Сочетание различных видов сырья позволяет уменьшить влияние их индивидуальных недостатков и делает возможным создание продукта с заданными физико-химическими свойствами. В настоящем исследовании системно исследован технологический процесс производства

топливных брикетов, включающий этапы подготовки, гомогенизации, сушки, прессования. Особое внимание уделено влиянию доли биомассы (кроличьих отходов) при формировании брикета и изменению ключевых характеристик готового продукта: теплотворной способности, зольности, механической прочности и устойчивости к воздействию влаги. Задача возможной переработки низкосортной биомассы и древесных отходов в высокоэнергетическое твердое топливо является актуальной и широко

освещается в научной литературе. Исследования сфокусированы на оптимизации технологических параметров, изучении влияния состава сырья на характеристики конечного продукта, экономической и экологической оценке используемых процессов.

Важную роль в формировании брикета, содержащего отходы лесопиления, играет лигнин. Влияние лигнина как природного связующего подробно описано в [1, 2, 3]. В исследованиях подчеркивается ключевая роль этого компонента, который при нагреве в процессе прессования пластифицируется и скрепляет составные частицы. В опубликованных работах показано, что добавление отходов с низким содержанием лигнина (солома, лузга подсолнечника) в топливную смесь требует корректировки температурно-влажностных режимов или введения дополнительных веществ, обладающих связующими свойствами.

В исследованиях [4, 5] проведен комплексный анализ различных соотношений опилок хвойных пород с отходами производства льна и рапса. Экспериментально доказано, что введение 20–30 % агробиомассы позволяет получить брикет с повышенной удельной теплотой сгорания без потери прочностных характеристик.

Важным является тот факт, что для брикетов, содержащих биомассу, актуальна проблема большой зольности и коррозионной активности дымовых газов. Исследователи [6, 7] акцентируют внимание на высоком содержании щелочных металлов в сельскохозяйственной биомассе. Это может приводить не только к повышению содержания золовых частиц и коррозии элементов котлов, но и к спеканию шлака. Решение этой проблемы возможно за счет предварительной промывки сырья, использования добавок-катализаторов или постоянного контроля за дозировкой всех компонентов в смеси.

Методы исследования. В лабораториях Сибирского федерального университета были запланированы и проведены эксперименты по определению оптимального состава брикета на основе полученных результатов исследований с последующим установлением основных характеристик топлива, таких как насыпная плотность исходной смеси, прочность, теплотворная способность, остаточная зольность, а также исследований по определению элементного состава золы, а именно процентного содержания углерода, водорода, кислорода, азота и серы. В качестве сырьевой базы использовались отходы лесопиления (опилки хвойных пород) и органические отходы кролиководческих хозяйств, при этом технологический процесс производства брикета исключал применение синтетических связующих агентов.

Промышленные образцы брикетов были получены на предприятии «Гуй-Жень-И», специализирующемся на изготовлении пеллет и брикетов из опилок.

Методика подготовки сырья к прессованию включает стадийную сушку кроличьего помета до достижения постоянной массы в соответствии с ГОСТ Р 54192-2010 с последующим его измельчением. Древесные отходы предварительно подвергаются термообработке в барабане роторного типа при температуре 400 °С для достижения влажности около 12 %. Гомогенизированная смесь компонентов направляется в экструзионный пресс, где под воздействием высокого давления происходит формирование топливных брикетов [8, 9, 10], имеющих удобную и эстетически современную форму (рис. 1).



Рис. 1. Промышленные образцы топливных брикетов

Для оценки качества полученных образцов с вариативным содержанием биомассы был проведен комплексный анализ их ключевых физико-механических свойств. Влажность исходного сырья, насыпная плотность и компонентный состав, определявшиеся в соответствии со стандартами ГОСТ Р 54192-2010 и ГОСТ 32987-2014, являются основными факторами качества биотоплива. Именно эти характеристики обуславливают эксплуатационную стойкость брикетов к механическим воздействиям (сжатие, удар) и впитыванию влаги в процессе транспортировки и хранения. Этим объясняется проведенная серия экспериментов по оценке прочности на сжатие композиционных образцов. На универсальной машине РГМ-600-А-1 (рис. 2) цилиндрические образцы диаметром и высотой 5 мм подвергались постепенно возрастающей нагрузке на гидравлическом прессе до момента их разрушения. При этом для определения прочности на сжатие образца фиксировали разрушающую нагрузку.



Рис. 2. Универсальная испытательная машина РГМ-600-А-1

Параллельно в лабораторных условиях определяли энергетическую ценность топлива (теплоту сгорания) с использованием калориметрической бомбы (рис. 3).



Рис. 3. Установка IKA C 6000

После обработки экспериментальных данных, анализа полученных характеристик была создана рецептура твердого биотоплива с оптимальным содержанием биомассы.

Результаты исследования. Качественные характеристики брикетов из биомассы определяются составом компонентов, содержанием влаги в исходном сырье, технологией брикетирования и насыпной плотностью брикета.

Влажность смеси для брикетирования образцов определялась по формуле

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где m_1 – вес тигля, г; m_2 – вес образца + вес тигля, г; m_3 – вес образца после сушки + вес тигля, г.

Насыпную плотность брикета рассчитывали путем деления массы брикета на объем по соответствующей методике, кг/м³:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (2)$$

где m_1 – масса тигля, кг; m_2 – вес образца, кг; V – объем тигля, м³.

Как известно, определенные таким образом характеристики брикетов отвечают за их устойчивость к сжатию, ударам и воздействию воды при транспортировке и хранении.

Прочность на сжатие определялась как отношение разрушающей нагрузки (усилие пресса) к площади образца, МПа или в кг/см²:

$$\sigma = \frac{P}{S}, \quad (3)$$

где P – разрушающая нагрузка, кН; S – площадь поперечного сечения образца, см².

Полученные результаты исследования образцов приведены в табл. 1.

Для корректной обработки полученных результатов исследований использовалась аналитическая платформа Loginom Community. Графические изображения изменения характерных показателей приведены на рис. 4–6.

На рис. 4 показана зависимость прочностных и теплотворных характеристик от содержания биомассы в брикете. При малом содержании биомассы (до 20 %) происходит уплотнение структуры брикета за счет связующих компонентов биомассы, но при превышении оптимального содержания (25 %) нарушается однородность структуры, частицы биомассы начинают создавать точки напряжения.

Исходя из того, что биомасса имеет более высокую удельную теплоту сгорания по сравнению с исходным материалом, при достижении определенной доли содержания кроличьих отходов (25–30 %) увеличение вклада агроотходов незначительно влияет на энергетическую ценность топливного брикета. Снижение зольности топлива объясняется низким содержанием минеральных веществ в биомассе, поэтому частичное замещение исходного материала отходами кроличьих ферм уменьшает общее содержание неорганических компонентов в комбинированных брикетах.

Таблица 1. Характеристики образцов, использованных для исследований

Разновидность отходов лесопиления	Содержание биомассы, %	Влажность сырья, %	Давление прессования, МПа	Прочность на сжатие брикета, МПа	Насыпная плотность, кг/м ³	Теплотворная способность, МДж/кг	Зольность, %
Хвойные	0	8	20	15,2	397	17,6	4,5
Хвойные	5	8,5	20	15,9	400	17,8	3,2
Хвойные	10	9,5	20	16,4	408	17,8	2,8
Хвойные	15	12	20	16,5	411	18	2,6
Хвойные	20	14	20	17,15	413	18,42	2,1
Хвойные	25	14,3	20	17,1	417	18,51	2,1
Хвойные	30	15,8	20	15,4	422	18,48	2
Хвойные	35	16,1	20	14,5	429	18,46	1,9
Хвойные	40	16,5	20	13,2	431	18,52	1,8

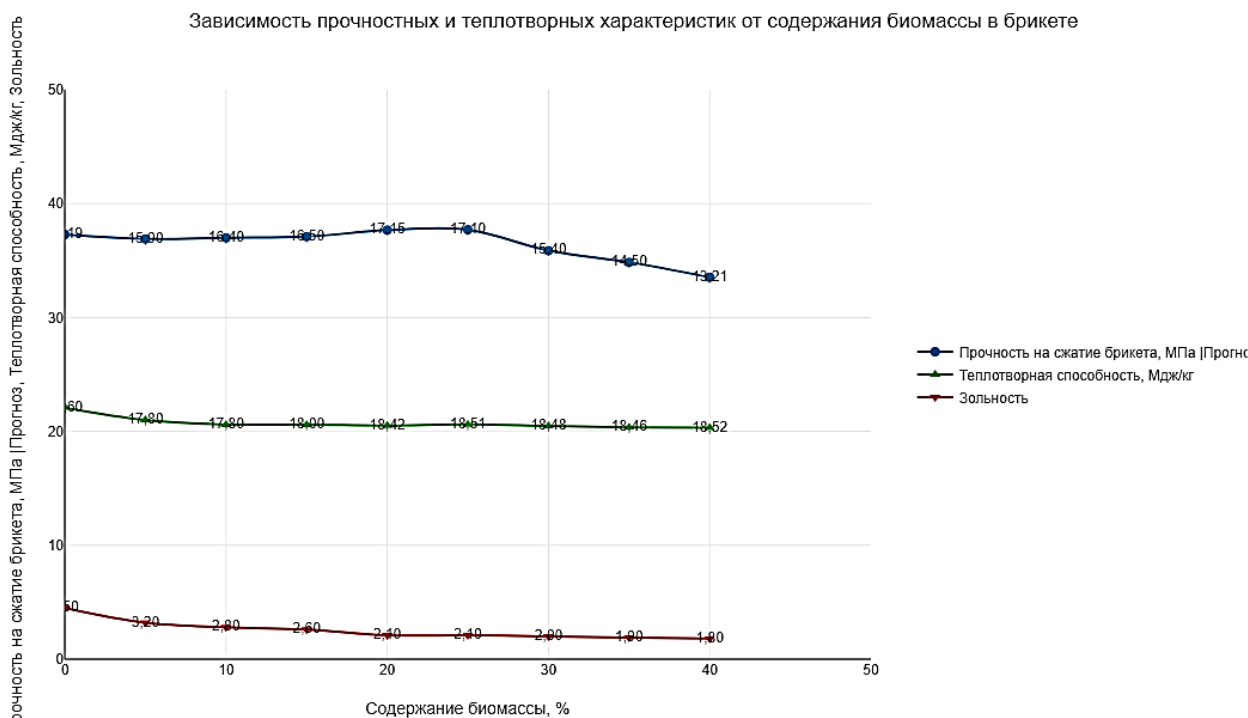


Рис. 4. Зависимость прочностных и теплотворных характеристик от содержания биомассы в брикете

На рис. 5 приведены показатели влажности сырья, участвующего в процессе брикетирования, и их теплотворные характеристики в зависимости от насыпной плотности. Увеличение влажности приводит к лучшей пластификации лигно-целлюлозных компонентов при прессовании. Вода выступает как временное связующее, облегчая уплотнение частиц, поэтому за счет снижения межчастичного трения увеличивается насыпная плотность и, как следствие, более эффективное уплотнение брикета. При достижении

влажности 15 % дальнейший рост плотности замедляется из-за вытеснения воздуха водой и снижения прочности связей, возникших после сушки.

Известно, что энергетическая ценность линейно связана с насыпной плотностью. Уменьшение содержания воздуха приводит к более компактному расположению горючих компонентов. Также стоит отметить, что увеличение плотности брикетов сверх оптимума может привести к ухудшению процесса горения за счет увеличения времени окислительных процессов.



Рис. 5. Показатели влажности сырья для брикетирования и теплотворных характеристик в зависимости от насыпной плотности

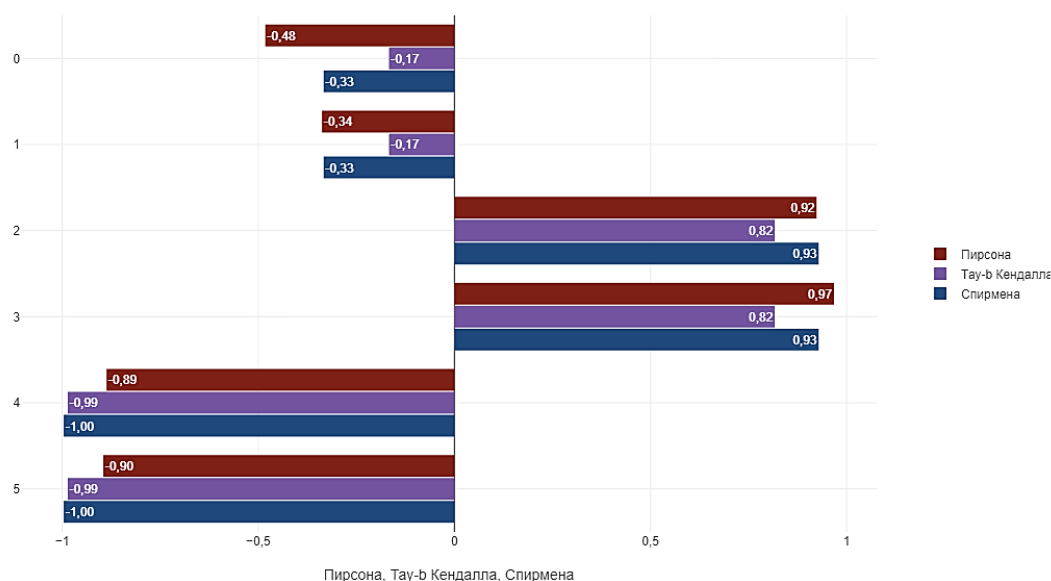


Рис. 6. Сравнение методов оценки корреляционных связей

В табл. 2 приведено сравнение методов оценки корреляционных связей с помощью различных коэффициентов корреляции: коэффициента корреляции Пирсона – статистическая мера, которая показывает силу и направление линейной связи между двумя переменными; коэффи-

циента корреляции Спирмена – непараметрическая мера, которая показывает силу и направление монотонной связи между двумя переменными; коэффициента корреляции Тау-б Кендалла – мера, которая показывает силу и направление монотонной связи на основе согласованности пар наблюдений.

Таблица 2. Полученные коэффициенты корреляции (Пирсона, Тау-б Кендалла, Спирмена)

Показатели		Коэффициенты корреляции		
Факторные (независимые) переменные	Результирующие (зависимые) переменные	Пирсона	Тау-б Кендалла	Спирмена
Влажность сырья, %	Теплотворная способность, МДж/кг	0,9676	0,8169	0,9288
Содержание биомассы, %	Теплотворная способность, МДж/кг	0,9235	0,8169	0,9288
Влажность сырья, %	Прочность на сжатие брикета, МПа	-0,3374	-0,1666	-0,3333
Содержание биомассы, %	Прочность на сжатие брикета, МПа	-0,4821	-0,1666	-0,3333
Содержание биомассы, %	Зольность, %	-0,8867	-0,9860	-0,9958
Влажность сырья, %	Зольность, %	-0,8950	-0,9860	-0,9958

Высокие значения коэффициентов указывают на стабильную прямую зависимость всех величин. Увеличение влажности коррелируется с ростом содержания биомассы, которая обладает высокой удельной теплотой сгорания (17–19 МДж/кг). Полученная влажность косвенно указывает на содержание гидрофильных органических компонентов, которые при сгорании дают дополнительную энергию. Значение коэффициента Пирсона $\approx 0,97$ указывает на идеальную линейную зависимость этих характеристик. Значение коэффициента Спирмена $\approx 0,93$ свидетельствует о наличии небольших отклонений от монотонности. Значение коэффициента Кендалла $\approx 0,82$ подтверждает общую направленность, но с меньшей чувствительностью.

Графическое представление методов оценки корреляционных связей показано на рис. 6.

Выводы. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Оптимальное содержание биомассы в составе комбинированного топливного брикета на основе хвойных опилок и органических отходов кролиководства составляет 20–25 %. В этом диапазоне достигается наилучшее сочетание прочностных и энергетических характеристик.

2. Теплотворная способность брикетов возрастает с увеличением доли биомассы до 25 %, достигая значений 18,51 МДж/кг, что объясняется высокой удельной теплотой сгорания биомассы.

Прочность на сжатие достигает максимума (17,15 МПа) при 20 % содержания биомассы, после чего начинает снижаться из-за нарушения однородности структуры и возникновения точек напряжения.

Зольность брикетов снижается с ростом доли биомассы (до 1,8 % при 40 %), что связано с низким содержанием минеральных веществ в органических отходах.

Влажность сырья оказывает значительное влияние на пластификацию лигноцеллюлозных компонентов и уплотнение брикета. Однако при влажности свыше 15–18 % рост плотности замедляется, а прочность снижается.

3. Статистический анализ подтверждает прямую зависимость между процентным содержанием биомассы, влажностью сырья и теплоотворной способностью, а также обратную – между содержанием биомассы и зольностью.

Практическая значимость исследования заключается в разработке рецептуры производства твердого биотоплива с улучшенными энергетическими и экологическими показателями, пригодного для использования в условиях реального производства и для частных домовладений.

Список литературы

1. Пекарец А.А., Аким Э.Л. Создание технологии получения топливных и угольных брикетов из опилок древесины лиственницы // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 23–24 мая 2018 г. – СПб., 2018. – Т. 2. – С. 117–119.
2. Утилизация отходов деревообрабатывающих предприятий Республики Саха (Якутия) в топливные брикеты / Л.А. Николаева, С.Н. Попов, О.Н. Буренина, Т.М. Соловьев // Интернет журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 45–51.
3. Гнидан Е.В. Лигнин древесины осины: особенности состава, строения, фракционирования и конверсии // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 4-2 (118). – С. 162–166.
4. Multi-purpose production with valorization of wood vinegar and briquette fuels from wood sawdust by hydrothermal process / C. Wang, S. Zhang, S. Wu et al. // Fuel. – 2020. – Vol. 282. – P. 3–9.
5. Эколого-технологические аспекты использования местных видов топлива на основе биомассы в энергетических целях / О.Н. Редькин, Е.В. Зеленуха, В.И. Глуховский, С.А. Лаптенко // Международный научный журнал «Научные горизонты». – 2024. – № 7(83). – С. 76–90.
6. Thygesen O., Johnsen T. Manure-based energy generation and fertiliser production: Determination of calorific value and ash characteristics // Biosystems Engineering. – 2012. – Vol. 113, Issue 2. – P. 166–172.
7. Евдокимов Н.В., Александров А.В. Разработка технологии брикетирования древесных отходов с использованием связующей композиции на основе механоактивированного гидролизного лигнина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 2-3 (7-3). – С. 65–68.
8. Кулагина Т.А., Кириллова И.В., Гурина Р.В. Композиционное твердое топливо на основе местных энергетических ресурсов // Справочник. Инженерный журнал. – 2025. – № 6(339). – С. 54–57.
9. Кулагина Т.А., Кириллова И.В. Усовершенствование состава топливных брикетов путем включения отходов кроличьих ферм // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2022): сб. ст. – Уфа, 2022. – С. 194–198.
10. Совершенствование производства круглых топливных брикетов из древесных опилок / А.Р. Бирман, Е.Г. Хитров, С.А. Угрюмов, Ю.Н. Власов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2020. – № 1. – С. 41–46.

References

1. Pekarets, A.A., Akim, E.L. Sozdanie tekhnologii polucheniya toplivnykh i ugol'nykh briketov iz opilok drevesiny listvennitsy [Creation of technology for producing fuel and coal briquettes from sawdust of larch wood]. *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie», Sankt-Peterburg, 23–24 maya 2018 g.* [Materials of the III International Scientific and Technical Conference “Forests of Russia: politics, industry, science, education”, Saint-Petersburg, May 23–24 2018]. Saint-Petersburg, 2018, vol. 2, pp. 117–119.
2. Nikolaeva, L.A., Popov, S.N., Burenina, O.N., Solov'ev, T.M. Utilizatsiya otkhodov derevoobrabatyvayushchikh predpriyatiy Respubliki Sakha (Yakutiya) v toplivnye briky [Waste disposal of woodworking enterprises of the Republic of Sakha (Yakutia) in fuel briquettes]. *Internet zhurnal «Naukovedenie»*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 45–51.
3. Gnidan, E.V. Lignin drevesiny osiny: osobennosti sostava, stroeniya, fraktsionirovaniya i konversii [Aspen wood lignin: features of composition, structure, fractionation and conversion]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2022, no. 4-2(118), pp. 162–166.
4. Wang, C., Zhang, S., Wu, S., Sun, M., Lyu, J. Multi-purpose production with valorization of wood vinegar and briquette fuels from wood sawdust by hydrothermal process. *Fuel*, 2020, vol. 282, pp. 3–9.
5. Red'kin, O.N., Zelenukho, E.V., Glukhovskiy, V.I., Laptenok, S.A. Ekologo-tekhnologicheskie aspekty ispol'zovaniya mestnykh vidov topliva na osnove biomassy v energeticheskikh tselyakh [Ecological and technological aspects of using local biomass-based fuels for energy purposes]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Nauchnye gorizonty»*, 2024, no. 7(83), pp. 76–90.
6. Thygesen, O., Johnsen, T. Manure-based energy generation and fertiliser production: Determination of calorific value and ash characteristics. *Biosystems Engineering*, 2012, vol. 113, issue 2, pp. 166–172.
7. Evdokimov, N.V., Aleksandrov, A.V. Razrabotka tekhnologii briketirovaniya drevesnykh otkhodov s ispol'zovaniem svyazuyushchey kompozitsii na osnove mekhanoaktivirovannogo gidroliznogo lignina [Development of technology for briquetting wood waste using a binding composition based on mechanoactivated hydrolysis lignin]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2014, vol. 2, no. 2-3(7-3), pp. 65–68.
8. Kulagina, T.A., Kirillova, I.V., Gurina, R.V. Kompozitsionnoe tverdoe toplivo na osnove mestnykh energeticheskikh resursov [Composite solid fuel based on local energy resources]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, 2025, no. 6(339), pp. 54–57.
9. Kulagina, T.A., Kirillova, I.V. Usovershenstvovanie sostava toplivnykh briketov putem vklyucheniya otkhodov krolich'ikh ferm [Improving the composition of fuel briquettes by including rabbit farm waste]. *Sbornik statey «Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v reshenii ekologicheskikh problem (Ekologiya-2022)»* [Collection of articles “Science, education, production in solving environmental problems (Ecology-2022)”]. Ufa, 2022, pp. 194–198.
10. Birman, A.R., Khitrov, E.G., Ugryumov, S.A., Vlasov, Yu.N. Sovershenstvovanie proizvodstva kruglykh toplivnykh briketov iz drevesnykh opilok [Improving the production of round fuel briquettes from sawdust]. *Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 1, pp. 41–46.

УДК 621.311

Полина Васильевна Белявская

Новосибирский государственный технический университет, аспирант, кафедра тепловых электрических станций, Россия, Новосибирск, e-mail: polina.belyawskaia@gmail.com

Павел Александрович Шинников

Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых электрических станций, Россия, Новосибирск, телефон +7(383)3461142, e-mail: shchinnikov@corp.nstu.ru

Модернизация котла КМ-75-40 путем установки предтопка с кипящим слоем при сжигании кородревесных отходов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Паровые котлы марки КМ-75-40 широко применяются на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности России для утилизации кородревесных отходов. Конструкция с наклонными колосниковыми и механическими решетками при сжигании топлива влажностью более 50 % вызывает снижение паропроизводительности, необходимость подсвета мазутом, интенсивное шлакование поверхностей и частые остановы. В условиях перехода к углеродно-нейтральным технологиям требуется повышение эффективности и экологичности оборудования для сжигания биомассы. В связи с этим актуальной задачей является модернизация котла КМ-75-40 путем замены предтопка с колосниковой решеткой на кипящий слой для устойчивого сжигания кородревесных отходов повышенной влажности с одновременным ростом паропроизводительности и снижением выбросов.

Материалы и методы. Работа выполнена с использованием нормативного метода теплотехнического расчета, компьютерной программы (комплекса) ТРАКТ и данных натурных испытаний. Проанализированы решения по замене цепного предтопка на кипящий слой с проработкой подачи воздуха, системы воздухораспределительной решетки и оборудования для удаления песка и крупных фракций с учетом влажности топлива, состава золы, температурных режимов газоходов и показателей паропроизводительности в различных режимах работы котла.

Результаты. Предложен вариант модернизации котла КМ-75-40. Осуществлен теплотехнический расчет основных параметров работы котла в различных режимах. Установлено, что модернизация котла обеспечила рост КПД с 58,6 до 86,3 %, достижение паропроизводительности 90 т/ч при влажности кородревесных отходов 30–55 %, снижение выбросов NO_x в 2,1 раза и SO_x в 3,8 раза, устойчивую работу при влажности до 70 %, снижение температуры в топочном пространстве более чем на 200 °С, что повысило ресурс элементов и сократило образование NO_x.

Выводы. Предложенный вариант модернизации котла КМ-75-40 повышает эффективность, надежность и экологичность оборудования. Подтверждена возможность устойчивого сжигания кородревесных отходов влажностью до 70 % при минимальном использовании дополнительного топлива. Решение может применяться для модернизации аналогичных котлов и других установок, работающих на биомассе. В перспективе предполагается оптимизация конструкции и автоматизация систем управления.

Ключевые слова: котел КМ-75-40, кородревесные отходы, кипящий слой, модернизация котла, паропроизводительность, выбросы оксидов азота

Polina Vasilievna Belyavskaya

Novosibirsk State Technical University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia Novosibirsk, e-mail: polina.belyawskaia@gmail.com

Pavel Alexandrovich Shchinnikov

Novosibirsk State Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of Thermal Power Plants Department, Russia, Novosibirsk, telephone +7 (383) 346 11 42, e-mail: shchinnikov@corp.nstu.ru

Modernization of KM-75-40 boiler by installing a fluidized bed furnace for bark and wood waste combustion

Abstract

Background. KM-75-40 boilers have been widely used at pulp and paper mills in Russia for the utilization of bark and wood waste (BWW). Their design with inclined grates and chain stoker furnaces, when firing fuel with moisture content above 50 %, leads to reduced steam-rated capacity, the need for constant oil support firing, intensive slagging of heating surfaces, and frequent outages. Under the current transition to carbon-neutral technologies, there is a demand for higher efficiency, and environmental performance of biomass combustion equipment. Thus, the vital task of the study is to develop and justify a retrofit option for KM-75-40 boiler by replacing the grate furnace with a bubbling fluidized bed (BFB) furnace to ensure stable combustion of high-moisture BWW with simultaneous increase in steam-rated capacity and reduction of emissions.

Materials and methods. The study has been carried out using the normative method of boiler heat balance, the ТРАКТ computer program, and field test data. The analysis has covered design solutions for replacing the chain stoker with a BFB

furnace, including the arrangement of air supply, the air-distribution grate, and equipment for sand and large particle removal. The evaluation has accounted for fuel moisture, ash chemistry, gas-path temperature profiles, and steam generation rates under various operating modes.

Results. A modernization option for KM-75-40 boiler is proposed. Thermal engineering calculations of the basic operating parameters of the boiler under various modes have been carried out. It has been established that the retrofit has increased boiler efficiency from 58,6 % to 86,3 %, achieved a steam-rated capacity of 90 t/h for BWW moisture levels of 30–55 %, and reduced NO_x and SO_x emissions by 2,1 and 3,8, respectively. Stable operation has been achieved at up to 70 % fuel moisture. Furnace temperature has decreased by more than 200 °C, improving component lifetime and reducing NO_x formation.

Conclusions. The modernization of KM-75-40 boilers has significantly improved efficiency, reliability, and environmental safety of the equipment. Stable combustion of BWW with up to 70 % moisture has been demonstrated with minimal use of auxiliary fuel. The proposed solution is recommended for retrofitting similar boilers and other biomass-fired plants. Future work should focus on design optimization and automation of BFB control systems.

Key words: KM-75-40 boiler, bark and wood waste, fluidized bed, boiler modernization, steam-rated capacity, nitrogen oxide emissions

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.012-020

Введение. Мировая энергетика переживает этап трансформации, связанный с необходимостью сокращения выбросов парниковых газов и перехода к углеродно-нейтральным технологиям, в основе которых лежат решения на основе возобновляемых источников (ВИЭ). Россия как участник Парижского соглашения¹ обязалась достичь углеродной нейтральности к 2060 году. Для этой цели предпринимаются шаги по развитию ВИЭ, среди которых особое место занимает биомасса².

Россия обладает значительными ресурсами биомассы, в первую очередь древесного происхождения. По данным Минэнерго РФ и аналитических агентств, до 18 % всех производимых в стране отходов потенциально пригодны для энергетического использования [1]. Из этого объема около 60–70 % составляют отходы древесины и лесопереработки, в том числе кора, опилки, древесная пыль и др. [2].

Однако фактическая доля использования биомассы в энергетике России остается низкой – менее 1,5 % от общего конечного энергопотребления, тогда как в странах ЕС этот показатель достигает 15–20 %, а в таких странах, как Швеция и Финляндия, – более 30 % [3].

Кроме отходов сельского хозяйства (солома, жмых, лузга и навоз), которые в отдельных аграрных регионах могут обеспечивать до 5–7 % регионального энергобаланса [4], значительным источником биоресурсов в России являются кородревесные отходы. Они составляют до 35 % всех отходов лесопромышленного комплекса страны [5], однако в энергетике используется лишь 10–12 % этого объема. В целом, ежегодно в России остается неутрализованными до 75 % лесных отходов, значительная часть которых сжигается на открытом воздухе, что сопровождается выбросами

загрязняющих веществ и увеличивает риск природных пожаров [6].

Сжигание биомассы условно считается углеродно-нейтральным, поскольку при ее сжигании высвобождается углерод, ранее полученный в процессе фотосинтеза растениями из атмосферы. При замещении традиционных углеродных видов топлива (уголь, мазут) биотопливом можно сократить валовые выбросы CO₂. В частности, замена угля биомассой на установке мощностью 10 МВт позволяет ежегодно сокращать выбросы парниковых газов на 75–90 % [7].

Применение биотоплива позволяет снизить энергетическую зависимость малых населенных пунктов, особенно в труднодоступных регионах. В частности, в более чем 30 % отдаленных поселений Сибири и Дальнего Востока отсутствует подключение к магистральным сетям, а поставки мазута дорогостоящи³. Перевод котельных с мазута на древесные отходы снижает себестоимость теплоснабжения на 25–35 % [8]. Даже частичное замещение угля биомассой может дать значительный эффект, например при добавлении биомассы на уровне 20–30 % в топливную смесь угольных котлов (co-firing) обеспечивает повышение углеродной нейтральности, при этом не требуется реконструкции котла [9]. При использовании биомассы получили распространение технологии кипящего слоя, которые позволяют использовать сырье с низшей теплотой сгорания и высокой влажностью (до 50 %) с КПД 80–85 % [10, 11]. Применяют когенерационные установки (СНП) на биотопливе, которые показывают высокие показатели эффективности (около 70–90 %) и могут обеспечивать значительную часть тепловой потребности поселков и небольших предприятий [12]. Применяют пеллетные котельные, особенно в европейской части России, где доля тепловой генерации на ВИЭ уже составляет около 3 %⁴.

¹ Парижское соглашение. ООН: меры по борьбе с изменением климата [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/hfrris-agreement> (дата обращения: 07.08.2025).

² Указ Президента РФ от 31.10.2023 № 666 «О достижении углеродной нейтральности».

³ Министерство энергетики Российской Федерации. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. – М.: Минэнерго РФ, 2020. – 112 с.

⁴ Системный оператор Единой энергетической системы. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 г. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.so-eps.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2024/ups_rep2023.pdf (дата обращения: 10.08.2025).

Наиболее широко в энергетике России биоресурсы вовлечены в региональные энергобалансы через энергетику промышленных предприятий, в первую очередь при лесопереработке [13, 14]. На них сжигают часть кородревесных отходов предприятия при генерации технологического пара, предназначенного для основного производства. Вместе с тем котельная техника таких предприятий эксплуатируется в тяжелых условиях быстрого шлакования конвективных поверхностей нагрева, снижения паропроизводительности, необходимости подсвета мазутом, низких коэффициентах готовности. Устранение таких технических недостатков является важной задачей.

Материалы и методы. Рассмотрим сжигание кородревесных отходов (КДО) в утилизационных котлах типа КМ-75-40, расположенных на корьевых котельных ТЭС. Данный тип котлов оснащен наклонными колосниковыми и механическими цепными решетками (рис. 1).

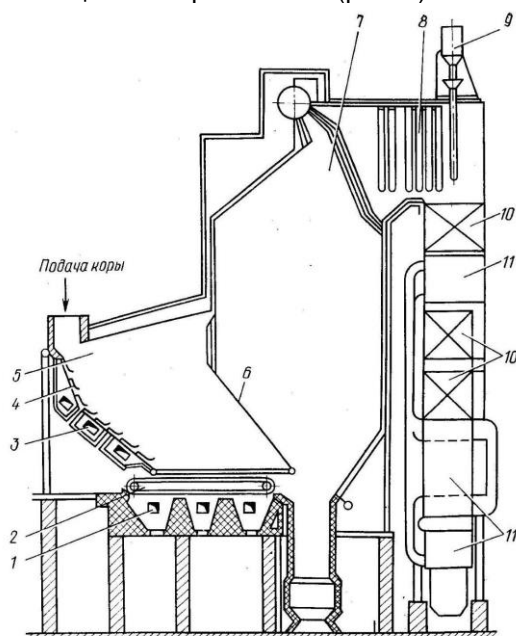


Рис. 1. Компоновка котлоагрегата КМ-75-40: 1 – подача воздуха под механическую решетку; 2 – цепная механическая решетка; 3 – подача воздуха под наклонную неподвижную решетку; 4 – наклонная колосниковая решетка; 5 – предтопок; 6 – экранные трубы, отделяющие предтопокот топки; 7 – топка; 8 – пароперегреватель; 9 – дробеочистка; 10 – водяной экономайзер; 11 – воздухоподогреватель

Корьевые котельные располагаются, как правило, на предприятиях лесопереработки с производством целлюлозы, где в качестве топлива используют кородревесные отходы с добавлением мазута, пека и талового масла (последние два, как побочный продукт производства целлюлозы) [15]. При работе на КДО фактическая производительность подобных котлов составляет, как правило, 50–80 % от проектной величины, что и требует добавления дорогого мазута или других добавок при сжигании. Кроме

того, котлы требуют частой остановки для проведения ремонтно-профилактических работ из-за низкой надежности цепной механической решетки.

В прежние годы производство котлоагрегатов марки КМ-75-40 позволило частично решить проблему утилизации влажных древесных отходов на многих российских предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности. Но в процессе их эксплуатации выявился ряд общих существенных недостатков:

- ограничение нагрузки котла в случаях уменьшения подсветки резервным топливом;
- низкая экономичность топочного процесса вследствие неравномерности горения топлива на колосниковых решетках, что вызывало рост избытка воздуха и потерь тепла от неполноты сгорания;
- низкая надежность цепной механической решетки, что обуславливало частые остановки котла;

– низкие экологические показатели.

Впоследствии конструкция котлоагрегатов была признана неудачной и они были сняты с производства, но до сих пор продолжают эксплуатироваться на многих предприятиях отрасли. Белгородский котлостроительный завод поставил целлюлозно-бумажным комбинатам более 40 котлов КМ-75-40, предназначенных для работы с кородревесными отходами. Устранение указанных недостатков предлагается путем замены предтопка с колосниковой решеткой на предтопок кипящего слоя (рис. 2).

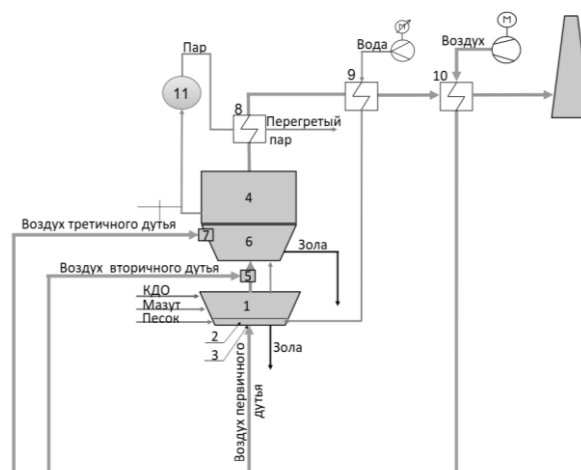


Рис. 2. Схема работы котла КМ-75-40 после его модернизации с установкой предтопка кипящего слоя: 1 – предтопок котла с кипящим слоем; 2 – кипящий слой; 3 – воздухораспределительная решетка; 4 – топка котла; 5 – сопла вторичного дутья; 6 – холодная воронка топки котла; 7 – сопла третичного дутья; 8 – пароперегреватель; 9 – экономайзер; 10 – воздухоподогреватель; 11 – барабан

В предтопке котла 1 при температуре 750–950 °С протекает процесс неполного горения топлива в кипящем слое 2 инертного наполнителя (кварцевый песок 0,5–2 мм) при его

взаимодействии с воздухом первичного дутья. Воздух первичного дутья подается на воздухо-распределительную решетку 3 с коэффициентом избытка воздуха 0,3–0,4 (при номинальной производительности котла), что обеспечивает бесшлаковый режим работы кипящего слоя. В ходе неполного горения топлива в кипящем слое, сопровождающегося процессами его пиролиза и газификации, образуется низкокалорийная парогазовая смесь, которая вместе с мелкофракционными частицами активного древесного полукокса поступает в надслоевой объем предтопка. Отсюда, смешиваясь с продуктами термической обработки отдуваемых мелкофракционных частиц топлива (парогазовая смесь и мелкофракционные частицы активного полукокса), продукты термической обработки топлива поступают в топку котла 4.

В топке происходит их смешение со струями вторичного воздушного дутья 5. Сопла

вторичного дутья сориентированы вниз, в сторону холодной воронки котла 6. Поэтому при смешении продуктов термической обработки топлива со струями вторичного воздушного дутья формируется факел, частично затягиваемый в холодную воронку. Не сгоревшие в факеле частицы древесного полукокса сепарируются вместе с мелкофракционным песком, выносимым из предтопка в холодную воронку котла, где дожигаются в узле донного дутья 7 в воздушных струях третичного дутья.

Представленный вариант модернизации котла позволяет сохранить существующую схему подготовки и подачи КДО в котельную на сжигание (рис. 3). Производительность существующих трактов подачи коры и древесных отходов достаточна для обеспечения подачи древесного топлива в котельную в необходимом объеме и после модернизации.

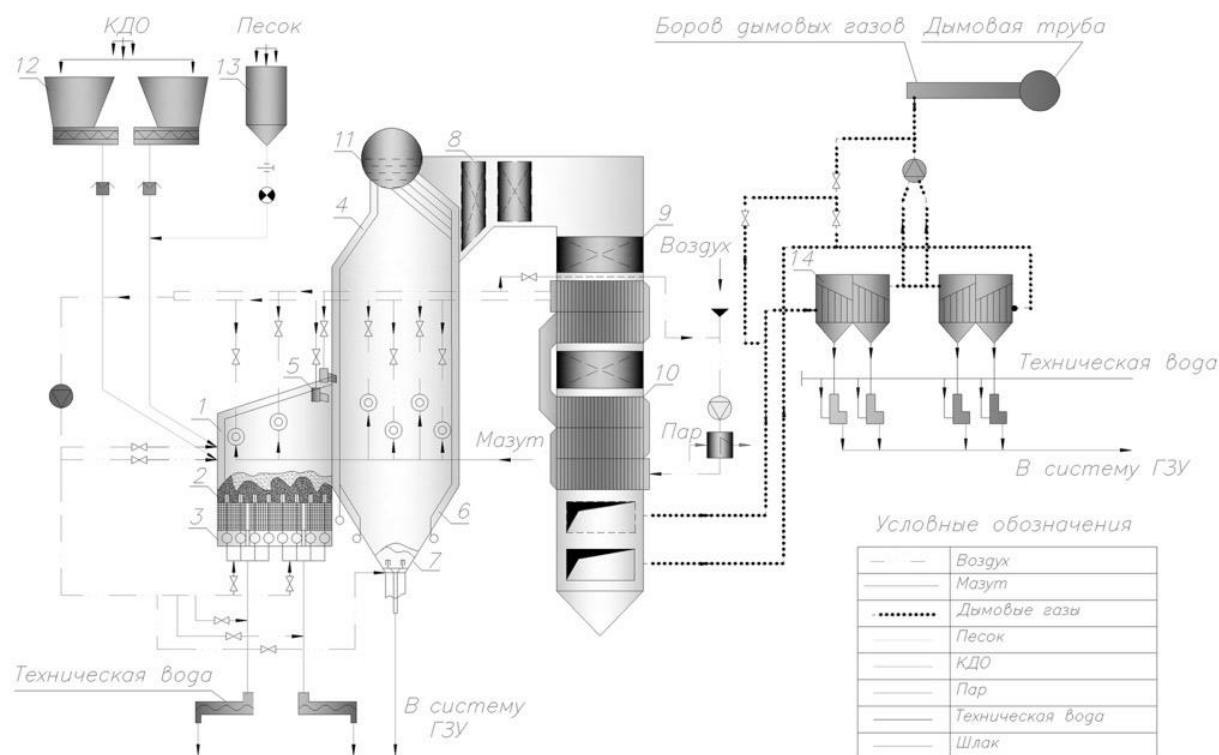


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема модернизации котла КМ-75-40: 1 – предтопок; 2 – кипящий слой; 3 – решетка воздухо-распределительная; 4 – топка; 5 – сопла вторичного дутья; 6 – холодная воронка; 7 – сопла третичного дутья; 8 – пароперегреватель; 9 – экономайзер; 10 – воздухоподогреватель; 11 – барабан; 12 – бункер КДО с «подвижным дном»; 13 – бункер песка; 14 – рукавный фильтр

Для модернизации котла следует демонтировать предтопок с колосниковыми и наклонной решетками, холодную воронку котла, существующие батарейные циклоны, дымосос, газопроводы и трубопроводы котла в границах реконструкции. Затем необходимо установить воздухо-распределительную решетку с системой коллекторов, газоплотные экранные поверхности и обшивку предтопка, горелки предтопка, элементы фронтного

экрана и элементы фестонной разводки, коллекторы вторичного дутья с соплами, оборудование системы удаления крупных фракций из предтопка и системы удаления песка из холодных воронок, высоконапорный вентилятор горячего дутья с коллекторами подачи воздуха и дымосос котла с газоходами, устройства подачи песка для топки кипящего слоя. Кроме того, необходимо обеспечить все необходимые монтажные соединения.

Подобная модернизация реализована на паровых котлах № 1 и № 2 на Усть-Илимском целлюлозно-бумажном комбинате в целях решения проблем низкой надежности цепной решетки при ее демонтаже, эффективности сжигания КДО с высокой влажностью из-за неустойчивости горения, следовательно, в целях обеспечения максимальных производительностей котлов без подсвета, улучшения экологических характеристик котлов [16].

Расчетная часть исследования выполнена с использованием нормативного метода теплотехнического расчета котлов, компьютерной программы (комплекса) TRAKT, а также данных натурных испытаний модернизированных котлов. В ходе работы проведен анализ конструктивных решений по замене предтопка с цепным устройством на предтопок с кипящим слоем, включающий проработку схем подачи первичного, вторичного и третичного воздуха, системы воздухораспределительной решетки, а также оборудования для удаления песка и крупных фракций из слоя. При оценке эксплуатационных характеристик учитывались влажность топлива, химический состав золы, температурные режимы газового тракта и показатели паропроизводительности в различных режимах работы котла.

Результаты исследования. При наладочных испытаниях основное внимание уделялось оценке надежности работы кипящего слоя, влиянию химического состава золы на стабильность псевдоожижения, т. е. способность слоя равномерно «кипеть» под действием воздуха без образования застойных зон, слипания частиц и нарушения теплообмена. Результаты испытаний показали, что надежность и эффективность работы котла напрямую связаны с устойчивостью процессов в топке и кипящем слое. Процессы горения топлива, взаимодействия золы с материалом слоя, теплообмена и аэродинамики в зоне псевдоожижения являются взаимосвязанными и сложными по своей природе. Практика эксплуатации подобных установок подтверждает, что при длительной работе в слое образуются агломераты – спекшиеся частицы, ухудшающие псевдоожижение и, как следствие, теплообмен в топке и в последующих конвективных поверхностях котла [17].

Сжигание кородревесных отходов с содержанием щелочей (соединений калия и натрия, что характерно для КДО) в золе свыше 5 % делает агломерацию неизбежной. В этих условиях требуется постоянное дренирование слоя – замещение его части свежим песком.

В ходе наладочных испытаний было установлено, что критическая концентрация соедине-

ний калия и натрия в золе, при которой наблюдается неустойчивое поведение кипящего слоя, составляет 1 %. При превышении этого уровня нарушается псевдоожижение и, как следствие, ухудшается общий тепловой режим котла. Для обеспечения устойчивой работы котла при номинальной нагрузке в таких условиях требуется подача свежего песка с расходом 2,6 т/ч, что соответствует соотношению песок/зола на уровне 0,31 [18].

Кроме химического состава, важным параметром, существенно влияющим на работу котла, является влажность КДО. Этот показатель оказывает влияние на теплонапряжение топки, расход топлива и паропроизводительность в широком диапазоне.

С использованием нормативного метода расчета котлов⁵ и компьютерной программы (комплекса) TRAKT⁶ получены температуры в слое, топке и далее по всему газовому тракту котла. Можно видеть, что наибольшие изменения температурного режима характерны для предтопка и топки, при этом модернизация ведет к заметному (более чем на 200°C) снижению температуры в топочном пространстве (рис. 4). Это, в свою очередь, способствует увеличению эффективности котла, повышению его надежности и экологичности.

Важной характеристикой работы котла является влажность КДО. Так, ее рост до 57% и выше ведет к резкому снижению паропроизводительности (рис. 5). Это связано с двумя факторами. Во-первых, увеличение влажности топлива ведет к росту затрат энергии на испарение влаги (сопровождается дополнительными затратами топлива) и, во-вторых, увеличение доли пара в продуктах сгорания «наталкивается» на ограничение по пропускной способности конвективных газоходов котла, что снижает тепловой поток, подводимый к этим поверхностям нагрева. Более того, рост влажности топлива сопровождается необходимостью «подсвета» основного факела мазутом, что еще более увеличивает объем продуктов сгорания и ведет к лавинообразному снижению паропроизводительности. На обычной наклонной колосниковой решетке кородревесные отходы можно сжигать только при влажности до 50 %, иначе снижается паропроизводительность и ухудшается горение. В котле с кипящим слоем допустимую влажность можно повысить до 60–70 % благодаря высокой интенсивности теплообмена и устойчивому режиму слоя. Подобные результаты получены и в компании Babcock [19]. Следует отметить, что подобные эксплуатационные режимы возможны, однако они сопровождаются увеличенными расходами топлива (рис. 5).

⁵ Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова [и др.]. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1973.

⁶ Компьютерная программа (комплекс) TRAKT: расчет тепловых схем котельных установок.

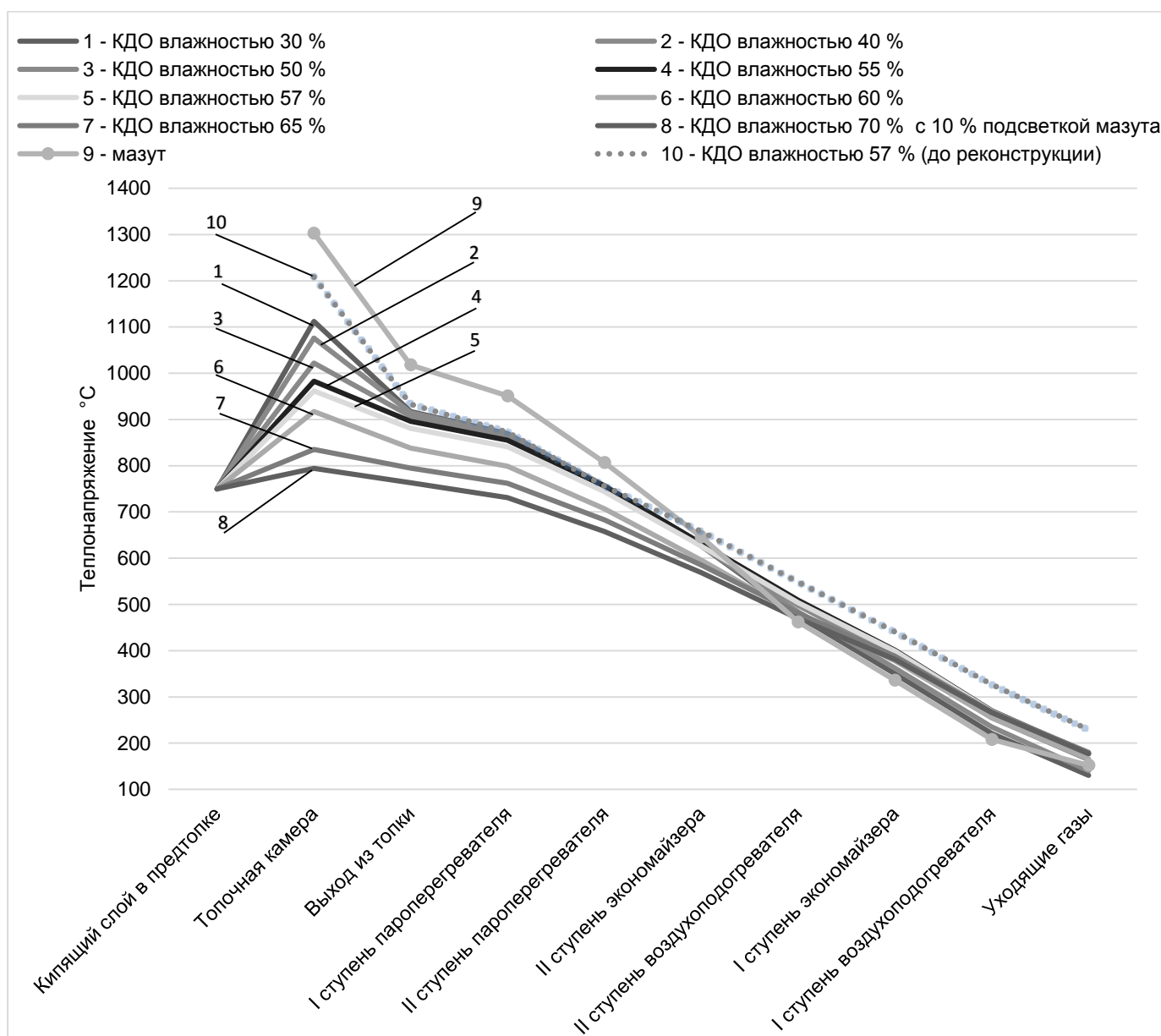


Рис. 4. Распределение температур по трактам котла КМ-75-40 до и после модернизации в зависимости от влажности КДО

Можно видеть, что с ростом влажности КДО с 30 до 57 % его расход возрастает почти вдвое – с 22,7 до 40,5 т/ч, что обусловлено снижением теплотворной способности топлива. При дальнейшем увеличении влажности до 70 % расход КДО достигает 48 т/ч, при этом паропроизводительность котла снижается до 60 т/ч. В таких условиях дополнительно требуется 0,54 т/ч мазута для стабилизации горения. При пересчете всех видов топлива в энергетическом эквиваленте доля мазута составляет 11,5 % от общего теплового баланса, несмотря на его небольшой массовый расход, что связано с высокой теплотой сгорания мазута по сравнению с КДО. При проведении испытаний котла при сжигании КДО с низшей теплотой сгорания 1594 ккал/кг и паропроизводительности 80 т/ч фактический расход топлива составил

39,8 т/ч. При этом был достигнут КПД на уровне 86,34 %, что значительно выше по сравнению с КПД 58,6 %, зафиксированным до модернизации котла. Значительный рост КПД котла (с 58,6 до 86,3 %) после модернизации обусловлен совокупным действием нескольких факторов, связанных с заменой колосниковой предтопки на предтопок с кипящим слоем. Во-первых, в кипящем слое обеспечивается интенсивный тепло- и массообмен, а также высокая степень выгорания топлива за счет длительного пребывания частиц в зоне горения и их многократной циркуляции. Это приводит к снижению потерь от химической и механической неполноты сгорания, характерных для колосниковых решеток при сжигании влажных кородревесных отходов. Во-вторых, организация ступенчатой подачи воздуха (первичного, вторичного и

третичного) позволяет снизить коэффициент избытка воздуха по сравнению с исходной схемой. Это уменьшает объем уходящих газов и, соответственно, потери теплоты с уходящими газами, которые в исходном варианте были значительными из-за необходимости повышенного дутья для стабилизации горения на решетке. В-третьих, модернизация приводит к снижению температуры в топочном пространстве более чем на 200 °С (к устранению локальных перегретых зон), что уменьшает лучистые тепловые потери, снижает тепловую нагрузку на экраны и способствует более равномерному распределению

тепловых потоков по газовому тракту котла. При этом температурный режим конвективных поверхностей нагрева становится более стабильным для теплообмена (без перегревов). В-четвертых, за счет устойчивого горения топлива с высокой влажностью существенно сокращается или практически исключается подсвет мазутом, обладающим высокой теплотой сгорания и формирующим дополнительный объем продуктов сгорания. Снижение доли вспомогательного топлива напрямую уменьшает энергетические и тепловые потери котла.

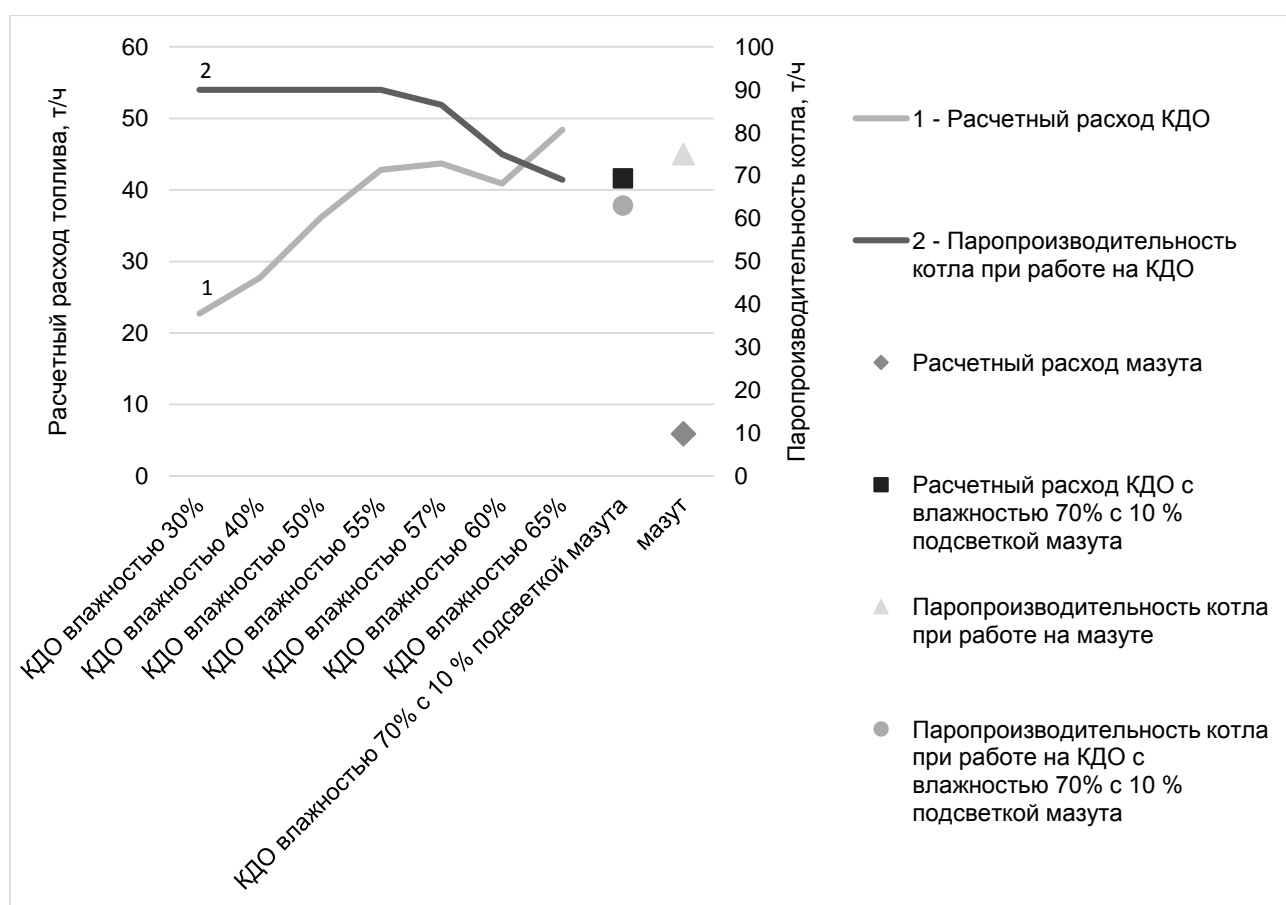


Рис. 5. Паропроизводительность и расход топлива котла КМ-75-40 в зависимости от влажности КДО после его модернизации

Проведенные расчеты показывают, что при модернизации котла его паропроизводительность может быть обеспечена на уровне 90 т/ч в широком диапазоне влажности КДО от 30 до 55 % при увеличении удельной выработки пара на 11 % (см. таблицу). Изменение влажности топлива при организации кипящего слоя мало влияет на температурный режим конвективных поверхностей опускной шахты газохода. Экологические показатели котла по выбросам NO_x и SO_x улучшаются в 2,11 и 3,8 раза соответственно, а выбросы пентоксида

ванадия присутствуют на уровне следов. Снижение выбросов оксидов серы обусловлено в первую очередь резким уменьшением доли мазута в тепловом балансе котла. До модернизации требовалась постоянная подсветка, сами же кородеревесные отходы содержат крайне низкие концентрации серы. Косвенным фактором снижения выбросов SO_x является также понижение температуры в топке, что ограничивает вторичные реакции окисления сернистых соединений в газовой фазе.

Показатели работы котла КМ-75-40

Показатель	До модернизации	После модернизации
Паропроизводительность, т/ч	50*	90
Расход КДО, т/ч	~24 ***	38,69**
Расход мазута***, т/ч	0,127	<0,001
Таловое масло***, т/ч	0,792	0
Пек***, т/ч	0,028	0
Удельная выработка пара на КДО, т пара/т КДО	2,083	2,326
Температуры, °С:		
– в слое	–	750
– в топке	1208	959
– на выходе из топки	933	873
– перед пароперегревателем 1-й ступени	873	835
– перед пароперегревателем 2-й ступени	756	737
– перед экономайзером 2-й ступени	658	621
– перед воздухоподогревателем 2-й ступени	548	490
– перед экономайзером 1-й ступени	441	393
– перед воздухоподогревателем 1-й ступени	327	241
Температура уходящих газов	229	161
КПД, %	58,6	86,5
Выброс NO _x , г/с	3,21	1,52
Выброс SO ₂ , г/с	0,2	0,03
Выброс SO _x , г/с	30,63	7,98
Выброс V ₂ O ₅ , г/с	~0,003****	Следы****

* Проектное значение 50 т/ч (не обеспечивается фактическими условиями эксплуатации).

**При влажности КДО 30 %.

*** Среднегодовое значение при 5000 часов использования.

**** Определено⁷.

Выводы. Проведенный анализ влияния влажности кородревесных отходов на работу котла показал, что при увеличении влажности КДО с 30 до 57 % их расход возрастает почти вдвое, с 22,7 до 40,5 т/ч, а при влажности 70 % расход достигает 48 т/ч при одновременном снижении паропроизводительности до 60 т/ч.

Для стабилизации горения при высокой влажности топлива требуется дополнительный расход мазута 0,54 т/ч, что в энергетическом эквиваленте составляет 11,5 % теплового баланса котла.

После модернизации топки котла (замена на кипящий слой) обеспечивается устойчивое сжигание КДО с низшей теплотой сгорания 1594 ккал/кг, достигается паропроизводительность 80 т/ч при суммарном расходе топлива 39,8 т/ч и повышается КПД до 86,34 % (по сравнению с 58,6 % до модернизации).

Установлено, что при содержании в золе соединений натрия и калия выше 1 % нарушается стабильность псевдоожиженного слоя. Для обеспечения устойчивой работы требуется дренирование слоя с подачей свежего песка в количестве 2,6 т/ч, что соответствует соотношению песок/зола 0,31.

Экологические показатели котла по выбросам NO_x и SO_x улучшаются в 2,11 и 3,8 раза соответственно, а выбросы пентоксида ванадия присутствуют на уровне следов.

Список литературы

1. **International** Renewable Energy Agency. Renewable Energy Prospects for the Russian Federation: REmap 2030. – Abu Dhabi: IRENA, 2017. – 108 p.
2. **Дорожная** карта развития биоэнергетики Технологической платформы «Биоэнергетика» до 2035 г. [Электронный ресурс]. – URL: https://tp-bioenergy.ru/upload/file/dorozhnaya_karta_tp_bioehnergetika.pdf (дата обращения: 21.07.2025).
3. **International** Energy Agency. Renewables 2024 – Analysis and Forecast to 2029 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024> (дата обращения: 20.06.2025).
4. **Энергетический** потенциал отходов растениеводства (на примере Крыма) / А.А. Исаков, Т.И. Андреев, С.В. Киселёва и др. // СОК. – 2022. – № 8. – С. 68–73.
5. **Колесников А.В.** Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России // СОК. – 2013. – № 8. – С. 68–73.
6. **Bioenergy** in Russia: potential and technologies / Z.B. Namsaraev, B.B. Namsaraev, S.A. Bychkov, et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 81, Part 1. – P. 1672–1689.
7. **IEA Bioenergy.** Biomass for heat and power: technology, environmental impacts, and market prospects // IEA Bioenergy: Task 32 Report. – Paris: International Energy Agency, 2009. – 44 p.
8. **Голубев В.А., Пузырев Е.М., Пузырев М.Е.** Перспективы применения котлов с топками циркуляционного кипящего слоя в коммунальной энергетике // Новости теплоснабжения. – 2016. – № 10. – С. 31–33.
9. **Liu W.** Co-firing coal with biomass: Effects on combustion performance and pollutant emissions // Cleaner Energy Systems. – 2023. – Vol. 3, 100040. – DOI: 10.1016/j.cles.2023.100040.
10. **IEA Bioenergy.** Fluidised bed combustion of biomass. – Paris: International Energy Agency, 2018. – 44 с.
11. **Рябов Г.А.** Научное обоснование использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01. – М.: ВТИ, 2016.
12. **IEA Bioenergy.** Combined Heat and Power from Biomass [Электронный ресурс]. – Paris: International Energy Agency, 2018. – URL: <https://www.ieabioenergy.com/publications/combined-heat-and-power-from-biomass/> (дата обращения: 10.08.2025)

⁷ Методика определения валовых и удельных выбросов в атмосферу от котельных установок ТЭС: РД 34.02.205-98. – М.: АООТ ВТИ, 1998. – 43 с.

13. **Pristupa A.O., Mol A.P.J.** The take off in solid bioenergy // *Energy Policy*. – 2015. – Vol. 83. – P. 24–36. – DOI: 10.1016/j.enpol.2015.03.019.

14. **Технология** целлюлозно-бумажного и картонного производства: Т. I. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 2. Производство полуфабрикатов. – СПб.: Политехника, 2003. – С. 513–528.

15. **Котлы** КМ-75-40: метод. пособие по энерготехнологическому оборудованию. – Белгород: Белгородский котлостроительный завод, 1975. – С. 12.

16. **Пузырев Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е.** Перспективы применения котлов с топками циркуляционного кипящего слоя в коммунальной энергетике // *Новости теплоснабжения*. – 2016. – № 10. – С. 31–33.

17. **Филиппов А.Н., Киселев С.Ю.** Исследование причин агломерации слоя при сжигании древесных отходов в котле ТЭЦ-3 Архангельского ЦБК // *Теплоэнергетика*. – 2019. – № 11. – С. 48–54.

18. **Obernberger I., Brunner T., Bärnthaler G.** Agglomeration in fluidized bed combustion of biomass: Operational experiences and laboratory investigations // *Fuel Processing Technology*. – 2006. – Vol. 87, No. 10. – P. 993–1007.

19. **Babcock Power.** Efficient – low emission stoker-fired biomass systems // *Babcock Power White Paper*. – 2018.

References

1. International Renewable Energy Agency. *Renewable Energy Prospects for the Russian Federation: REmap 2030*. Abu Dhabi: IRENA, 2017. 108 p.

2. **Dorozhnaya karta razvitiya bioenergetiki Tekhnologicheskoy platformy «Bioenergetika» do 2035 g.** [Roadmap for the Development of the Bioenergy Technological Platform until 2035]. Available at: https://tp-bioenergy.ru/upload/file/dorozhnaya_karta_tp_bioenergetika.pdf (accessed 21 July 2025).

3. International Energy Agency. *Renewables 2024 – Analysis and Forecast to 2029*. Available at: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024> (accessed 20 June 2025).

4. Isakov, A.A., Andreenko, T.I., Kiseleva, S.V., Rafikova, Yu.Yu., Trofimova, I.L. Energeticheskiy potentsial otkhodov rastenievodstva (na primere Kryma) [Energy potential of crop production waste (on the example of Crimea)]. *SOK*, 2022, no. 8, pp. 68–73.

5. Kolesnikov, A.V. Analiz obrazovaniya i ispol'zovaniya drevesnykh otkhodov na predpriyatiyakh lesopromyshlennogo kompleksa Rossii [Analysis of the generation and utilization of wood waste at enterprises of the Russian forest industry]. *SOK*, 2013, no. 8, pp. 68–73.

6. Namsaraev, Z.B., Namsaraev, B.B., Bychkov, S.A., Zueva, S.B., Nozhevnikova, A.N. Bioenergy in Russia: potential and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 81, part 1, pp. 1672–1689.

7. IEA Bioenergy. Biomass for heat and power: technology, environmental impacts, and market prospects. *IEA*

Bioenergy: Task 32 Report. Paris: International Energy Agency, 2009. 44 p.

8. Golubev, V.A., Puzyrev, E.M., Puzyrev, M.E. Perspektivy primeneniya kotlov s topkami tsirkulyatsionnogo kipyashchego sloya v kommunal'noy energetike [Prospects for the use of boilers with circulating fluidized bed furnaces in municipal energy supply]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2016, no. 10, pp. 31–33.

9. Liu, W. Co-firing coal with biomass: Effects on combustion performance and pollutant emissions. *Cleaner Energy Systems*, 2023, vol. 3, 100040. DOI: 10.1016/j.cles.2023.100040.

10. IEA Bioenergy. *Fluidised bed combustion of biomass*. Paris: International Energy Agency, 2018. 44 p.

11. Ryabov, G.A. *Nauchnoe obosnovanie ispol'zovaniya tekhnologii szhiganiya tverdykh topliv v tsirkuliruyushchem kipyashchem sloe*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Scientific substantiation of the use of solid fuel combustion technology in a circulating fluidized bed. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow: VTI, 2016.

12. IEA Bioenergy. *Combined Heat and Power from Biomass*. Paris: International Energy Agency, 2018. Available at: <https://www.ieabioenergy.com/publications/combined-heat-and-power-from-biomass/> (accessed 10 August 2025).

13. Pristupa, A.O., Mol, A.P.J. The take off in solid bioenergy. *Energy Policy*, 2015, vol. 83, pp. 24–36. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.03.019.

14. **Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo i kartonnogo proizvodstva: T. I. Syr'e i proizvodstvo polufabrikatov. Ch. 2. Proizvodstvo polufabrikatov** [Technology of Pulp and Paper and Cardboard Production. Vol. I. Raw Materials and Production of Semifinished Products. Part 2. Production of Semifinished Products]. Saint-Petersburg: Politehnika, 2003, pp. 513–528.

15. **Kotly KM-75-40: metodicheskoe posobie po energotekhnologicheskomu oborudovaniyu** [KM-75-40 Boilers. Methodological Manual on Energy-Technological Equipment]. Belgorod: Belgorodskiy kotlostroitel'nyy zavod, 1975, p. 12.

16. Puzyrev, E.M., Golubev, V.A., Puzyrev, M.E. Perspektivy primeneniya kotlov s topkami tsirkulyatsionnogo kipyashchego sloya v kommunal'noy energetike [Prospects for the use of boilers with circulating fluidized bed furnaces in municipal energy supply]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2016, no. 10, pp. 31–33.

17. Filippov, A.N., Kiselev, S.Yu. Issledovanie prichin aglomeratsii sloya pri szhigani drevesnykh otkhodov v kotle TETS-3 Arkhangel'skogo TSBK [Study of the causes of bed agglomeration during combustion of wood waste in the boiler of Arkhangel'sk PPM CHP-3]. *Teploenergetika*, 2019, no. 11, pp. 48–54.

18. Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G. Agglomeration in fluidized bed combustion of biomass: Operational experiences and laboratory investigations. *Fuel Processing Technology*, 2006, vol. 87, no. 10, pp. 993–1007.

19. Babcock Power. Efficient – low emission stoker-fired biomass systems. *Babcock Power White Paper*, 2018.

УДК 536.24

Айдар Рафаэлевич Хайруллин

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», аспирант кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, Россия, Казань, телефон +7(843) 519-43-21, e-mail: kharullin@yandex.ru

Айгуль Ильгизаровна Хайбуллина

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, Россия, Казань, телефон +7(843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

Елена Ринатовна Киржацких

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, Россия, Казань, телефон +7(843) 519-43-21, e-mail: ukaneeva1991@mail.ru

Численное исследование интенсификации теплообмена шахматного пучка труб при различных режимных параметрах вынужденных пульсаций потока¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Доля теплообменного оборудования в составе промышленных установок является значительной, поэтому эффективность работы теплообменных аппаратов влияет на технико-экономические показатели промышленных установок в целом. Повышение эффективности теплообменного оборудования возможно за счет применения различных методов интенсификации теплообмена, например за счет вынужденных пульсаций потока, которые относятся к активным методам интенсификации теплообмена. Несмотря на имеющиеся положительные результаты в данной области, закономерности теплообмена в условиях вынужденных пульсаций потока исследованы недостаточно.

Методы и материалы. Исследование закономерностей теплообмена в пучке труб проведено численно, с помощью Ansys Fluent. Дискретизация уравнений Навье–Стокса и конвективного теплообмена (Фурье–Кирхгофа) проведено методом конечных объемов. Валидация численной модели осуществлена по известному критериальному уравнению для прогнозирования теплоотдачи в пучках труб при условиях стационарного течения.

Результаты. По результатам численного моделирования установлено влияние режимных параметров на теплообмен шахматного пучка труб при симметричных и несимметричных вынужденных возвратно-поступательных пульсациях потока. Показано, что с увеличением произведения безразмерной амплитуды и числа Струхала Sh , характеризующего интенсивность пульсаций, происходит увеличение числа Нуссельта Nu независимо от числа Рейнольдса Re и числа Прандтля Pr . Установлено, что число Nu в пульсационном течении увеличивается с ростом Re и Pr , при этом их влияние на прирост Nu в пульсационном течении по сравнению со стационарным течением незначительно. В ходе численного исследования получена максимальная интенсификация теплообмена в 1,8 раза. Показано, что скважность пульсаций оказывает незначительное влияние на теплообмен, при этом теплогидравлическая эффективность пучка труб увеличивается при несимметричных пульсациях. Получены обобщающие зависимости для предсказания теплоотдачи в шахматном пучке труб при пульсациях потока.

Выводы. Результаты исследования направлены на повышение эффективности трубчатых теплообменных аппаратов за счет использования пульсационных методов интенсификации теплообмена.

Ключевые слова: теплообменное оборудование, кожухотрубный теплообменный аппарат, пульсации потока, шахматный пучок труб, метод интенсификации теплообмена

Aydar Rafaelevich Khayrullin

Kazan State Power Engineering University, Postgraduate Student of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures Department, Russia, Kazan, telephone +7(843) 519-43-21, e-mail: kharullin@yandex.ru

Aigul Ilgizarovna Khaibullina

Kazan State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures Department, Russia, Kazan, telephone +7(843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–29–00845, rscf.ru/en/project/23-29-00845/
The study is supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23–29–00845, rscf.ru/en/project/23-29-00845/

Elena Rinatovna Kirzhatskikh

Kazan State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures Department, Russia, Kazan, telephone +7(843) 519-43-21, e-mail: ukaneeva1991@mail.ru

Numerical study of heat transfer enhancement in a staggered tube bundle under various operating parameters of forced flow pulsation

Abstract

Background. The share of heat exchange equipment in industrial plants is significant, therefore, the efficiency of heat exchangers affects the technical and economic indicators of industrial plants taken as a whole. Increasing the efficiency of heat exchange equipment is possible due to the application of various methods of heat exchange enhancement, for example, due to forced flow pulsations, which are active methods of heat transfer enhancement. Despite the available positive results in this area, the consistent patterns of heat transfer under conditions of forced flow pulsations have not been sufficiently studied.

Materials and methods. The study of heat transfer patterns in a tube bundle has been carried out numerically using Ansys Fluent. Discretization of the Navier–Stokes and convective heat transfer (Fourier–Kirchhoff) equations have been carried out using the finite volume method. Validation of the numerical model has been carried out using the well-known criteria equation to predict heat transfer in tube bundles under steady-state flow conditions.

Results. As a result of numerical simulation, the influence of operating parameters on heat transfer of a staggered bundle under symmetric and asymmetric forced reciprocating flow pulsations has been established. It has been shown that with an increase of the product of the dimensionless amplitude and the Strouhal number Sh , which characterizes the pulsation intensity, an increase of the Nusselt number Nu occurs regardless of the Reynolds number Re and the Prandtl number Pr . It has been established that the number Nu in a pulsating flow increases with the growth of Re and Pr , while their influence on the increase of Nu in a pulsating flow compared to a steady flow is insignificant. During the numerical study, a maximum intensification of heat transfer of 1.66 times has been obtained. It has been shown that the duty cycle of pulsations has an insignificant effect on heat transfer, while the thermohydraulic efficiency of the tube bundle is increasing in case of asymmetric pulsations. Empirical correlations to predict heat transfer in a staggered tube bundle under flow pulsations have been obtained.

Conclusions. The obtained results are aimed at increasing the efficiency of tubular heat exchangers by using pulsation methods of heat transfer enhancement.

Key words: heat exchange equipment, shell-and-tube heat exchanger, flow pulsations, staggered tube bundle, heat transfer enhancement method

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.021-029

Введение. Массогабаритные теплообменные аппараты (ТА) являются неотъемлемой частью промышленных установок. Эффективность теплообменного оборудования напрямую влияет на экономическую эффективность технологических процессов промышленных установок. Повышение технико-экономических показателей ТА возможно за счет применения различных методов интенсификации теплообмена. Пульсирующие течения, созданные искусственным путем, позволяют интенсифицировать теплообмен за счет подвода дополнительной энергии, что относит их к активным методам интенсификации теплообмена. В отличие от пассивных методов интенсификации теплообмена, вынужденные пульсации потока остаются менее изученными, что отчасти вызвано сложностью исследования нестационарных течений. Теплообмен в условиях вынужденных пульсаций потока предполагает оценку большего количества факторов по сравнению со стационарным течением. Пульсации потока в основном характеризуются частотой колебания потока и амплитудой пульсаций. Колебания потока могут иметь симметричный характер или несимметричный, когда периоды времени ускорения и торможения различны. Амплитуда

может выражаться в безразмерной амплитуде скорости (отклонение от средней скорости) или в относительном расстоянии (отклонение потока относительно поверхности теплообмена). Несмотря на возникающие сложности при исследовании пульсирующих течений, такие течения в некоторых случаях позволяют существенно интенсифицировать теплообмен, что представляет научный и практический интерес.

Ввиду распространенности трубчатых ТА, внешний теплообмен и гидродинамика пучков труб является классической задачей многие десятилетия. Несмотря на имеющуюся подробную информацию по теплогидравлическим характеристикам для широкого диапазона режимных и геометрических параметров [1], исследования в данной области остаются актуальными [2, 3]. При этом теплообмен в условиях наложенного пульсационного потока в пучках труб остается менее изученным. Подробный обзор пульсирующих течений в поперечно обтекаемых пучках труб приведен в [4], где продолжают комплексные исследования характеристик теплообмена при возвратно-поступательных пульсациях потока в пучках труб [4–6].

В имеющихся исследованиях по данной тематике показано, что теплообмен в пучках

труб существенно зависит от режимных и геометрических параметров. В [7] в результате численного исследования показано, что теплоотдача колеблющегося трехрядного коридорного пучка может увеличиться до 25 %, что связывается с синхронизацией вынужденных частот с частотой вихреобразования в следе первого ряда пучка. Результаты численных исследований [8, 9] показали, что интенсификация теплообмена тандема цилиндров при пульсациях потока зависит от числа Рейнольдса, частоты и геометрических параметров пучка. В [10] рассмотрено влияние синусоидальных пульсаций потока на теплообмен шахматного пучка труб, в результате численных экспериментов показано, что теплоотдача пучка труб увеличивается при более высоких частотах и зависит от ряда трубки в пучке. В [8–10] предложены обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи в пучках труб в условиях пульсирующих потоков, однако полученные корреляции лимитированы ламинарными режимами. В [11] проведено численное исследование эффекта синусоидальных пульсаций потока жидкого металла на теплообмен коридорного пучка труб, которое показало, что с увеличением частоты пульсаций имеется некоторый максимум теплоотдачи, дальнейшее увеличение приводит к снижению теплообмена, при этом увеличение амплитуды оказывает положительный эффект на теплоотдачу во всем диапазоне исследований. В [12] рассмотрен теплообмен каплевидного пучка труб при пульсациях потока наножидкости, в результате численного эксперимента получен схожий с [11] эффект частоты и амплитуды. Увеличение теплоотдачи пучка происходит на фоне повышения амплитуды, при этом с увеличением частоты теплоотдача может как увеличиваться, так и понижаться.

В серии экспериментальных работ [13, 14] проведено исследование колеблющегося потока относительно пучков труб, погруженных в открытый бассейн, в отсутствии направленного стационарного потока. Безразмерная амплитуда колебаний выражалась в смещении потока относительно диаметра трубки пучка и достигала значения 18,75. Несмотря на низкую частоту колебаний $f \leq 0,5$ Гц, в результате проведенных опытов достигнута интенсификация теплообмена 200 % за счет высокоамплитудных колебаний потока. При этом если повышение амплитуды приводило к росту теплоотдачи пучка, то частота колебаний практически не оказывала влияния на теплообмен. В другой серии экспериментальных работ [15, 16] исследованы теплообмен и гидродинамика в пучках труб при

пульсациях потока воздуха, близких к гармоническим. Результаты исследования показали, что теплоотдача пучков может отличаться значительно, в зависимости от их разреженности и компоновки. Показано также, что интенсификация теплообмена происходит на фоне роста интенсивности турбулентности в следе трубки пучка. В серии работ [17–19] исследованы статистические характеристики потока пучков труб в условиях вынужденных пульсаций. Одной из основных целей исследований являлось определение режимов, при которых происходит подстройка вынужденных частот пульсаций под частоты вихреобразования в следе трубок пучка, при этом теплообмен пучка не рассматривался.

Поскольку теплообмен в пучках труб при вынужденных пульсациях потока сложнее стационарного течения и отсутствует систематизированная информация в данной области, понимание механизмов теплообмена такого течения остается на начальном этапе развития. Расширение информации о взаимном влиянии режимных и геометрических параметров по характеристикам теплообмена в пучках труб позволит улучшить фундаментальные знания и будет способствовать применению пульсирующих течений для повышения эффективности теплообменного оборудования.

Математическая модель. Вычислительные ресурсы при нестационарном течении в задачах гидродинамики возрастают существенно, поэтому моделирование конвективного теплообмена в пучках труб зачастую ведется в двухмерной постановке. Использование трехмерной постановки еще более усложняется при многопараметрическом исследовании. Для упрощения задачи численное исследование велось в двухмерной постановке. Способность предсказывать интегральные характеристики теплообмена в пучках труб при двухмерной постановке в условиях вынужденных пульсаций потока показана в [5, 11]. Область расчета математической модели показана на рис. 1. Диаметр трубки пучка D составляет 0,02 м, входной и выходной стабилизационный участок соответствует $10D$. Количество рядов в продольном направлении соответствует 15. Известно, что теплообмен начальных рядов меньше глубинного ряда пучка труб [1], что необходимо учитывать при прогнозировании теплообмена в пучках труб. Влияние начальных рядов на теплообмен всего пучка уменьшается с увеличением числа рядов и может не учитываться [1]. Трубки пучка расположены в шахматном порядке по схеме повернутого на 45° квадрата к набегающему потоку с относительным шагом трубок $S/D = 1,3$.

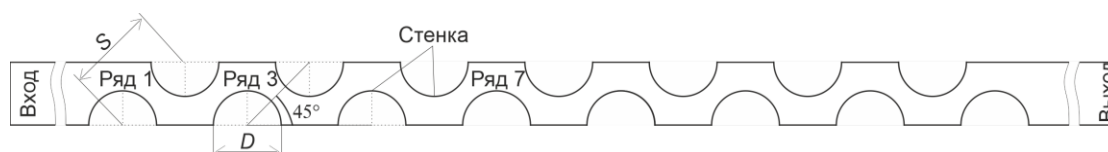


Рис. 1. Расчетная область численной модели

На входе в пучок труб для стационарного течения задавалась постоянная скорость по нормали, для нестационарного течения – пульсации скорости. Температура потока при пульсационном и стационарном течении на входном и выходном участке задавалась постоянной. На верхней и нижней частях канала задавалось условие симметрии и отсутствие проскальзывания. На стенках трубки седьмого ряда задавалось условие постоянной температуры, на остальных трубках принималось условие адиабатной стенки. Локальный нагрев седьмого ряда позволил исключить влияние начальных рядов на теплообмен всего пучка. Разница температур между стенкой нагреваемой трубки и входной температурой составляла один градус. На выходе из канала задавалось постоянное давление 101325 Па. Теплофизические свойства несжимаемой жидкости были постоянными, для фиксированного числа Прандтля Pr силы гравитации не учитывались. Пульсации потока имели симметричный и несимметричный возвратно-поступательный характер и определялись режимными параметрами. На рис. 2 приведен пример для различной скважности пульсаций, которая рассчитывалась по формуле

$$\psi = \frac{T_1}{T}, \quad (1)$$

где $T = T_1 + T_2$ – период пульсаций, с; T_1 и T_2 – первый и второй полупериоды пульсаций соответственно, с.

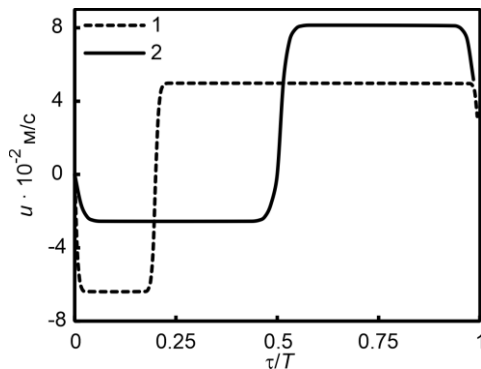


Рис. 2. Пульсации скорости на входе в пучок при $Re = 3500$, $Pr = 3$, $A/DSh = 0,15$: 1 – $\psi = 0,2$; 2 – $\psi = 0,5$

Частота пульсаций f определяется по формуле

$$f = \frac{1}{T} \text{ Гц}. \quad (2)$$

Амплитуда пульсаций выражается в безразмерном виде относительно трубки пучка A/D , при этом за размерную амплитуду принимается смещение частицы жидкости в пучке труб в противоположном направлении от стационарного потока за T_1 :

$$A = -\int_0^{T_1} u d\tau \text{ м}, \quad (3)$$

где u – скорость в самом узком сечении межтрубного пространства пучка труб, м/с; τ – время, с.

Число Рейнольдса в пучке труб определяется по формуле

$$Re = \frac{uD}{\nu}, \quad (4)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости теплоносителя, $\text{м}^2/\text{с}$.

Осредненная за один период пульсаций скорость в пучке труб при пульсационном течении u_p равна скорости стационарного течения u_{st} :

$$\langle u_p \rangle = \frac{\int_0^T u d\tau}{T} = u_{st}. \quad (5)$$

Число Нуссельта в пучке труб при стационарном Nu_{st} и пульсационном течении Nu_p рассчитывается следующим образом:

$$Nu_{st} = \frac{q_{st} D}{\lambda \Delta t_{st}}; \quad (6)$$

$$Nu_p = \frac{q_p D}{\lambda \Delta t_p}, \quad (7)$$

где q_{st} , q_p – плотность теплового потока, осредненная по поверхности пучка труб, $\text{Вт}/\text{м}^2$; Δt_{st} , Δt_p – разница температур теплоносителя и стенки трубки седьмого ряда, $^{\circ}\text{C}$, при пульсационном и стационарном течении соответственно; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/\text{м}^{\circ}\text{C}$.

Nu_p в уравнении (7) осредняется за один период пульсаций аналогично уравнению (5). Плотность теплового потока рассчитывается по формуле

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (8)$$

где $\partial t / \partial n$ – градиент температуры на стенке трубки седьмого ряда.

Теплогидравлическая эффективность пучка труб при одинаковом числе Рейнольдса ($Re_p = Re_{st}$) [20] определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{Nu_p / Nu_{st}}{\xi_p / \xi_{st}}, \quad (9)$$

где $\xi_{p,st}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, который рассчитывается по формулам для стационарного и пульсационного течения соответственно:

$$\xi_{st} = \frac{\Delta P_{st} 2}{\rho u_{st}^2}, \quad (10)$$

где ΔP_{st} – перепад давления в пучке труб, Па, при стационарном течении;

$$\xi_p = \frac{\langle \Delta P_p | u | \rangle 2}{\rho u_p^3}, \quad (11)$$

где $\langle \Delta P_p | u \rangle$ – мощность на прокачку теплоносителя, Вт/м², осредненная за один период пульсаций следующим образом:

$$\langle \Delta P_p | u \rangle = \frac{\int_0^T \Delta P_p | u | dt}{T}, \quad (12)$$

где ΔP_p – мгновенное значение перепада давления, Па, в пучке труб при пульсационном течении.

Поскольку избыточное давление на выходе было принято нулевым, перепад давления как в пульсационном, так и в стационарном течении определялся по осредненному давлению на входе в расчетную область (см. рис. 1).

Расчет течения жидкости и конвективного теплообмена выполнен на основе уравнений Навье–Стокса и Фурье–Кирхгофа с использованием метода конечных объемов в Ansys Fluent, k - ε модели турбулентности с улучшенной пристеночной функцией RNG k - ε EWT².

В результате тестовых расчетов сходимости сеточного решателя была выбрана расчетная сетка с количеством контрольных объемов 60668. Количество слоев в пристеночной зоне соответствовало 15 при минимальном размере контрольного объема r , отнесенного к диаметру цилиндра пучка труб $r/D = 1 \cdot 10^{-3}$, при этом размер контрольных объемов увеличивался с коэффициентом 1,2 в радиальном направлении от стенки цилиндра. Безразмерный шаг по времени, выбранный в результате тестовых расчетов, соответствовал $9,44 \cdot 10^{-3} = |u_{\max}| \cdot \Delta t / D$, где u_{\max} – максимальная скорость в пучке труб, м/с; Δt – шаг по времени, с. Размерный шаг по времени в зависимости от режимных параметров находился в диапазоне от $9,97 \cdot 10^{-5}$ до $1,57 \cdot 10^{-3}$. Расчеты проводили до выхода на квазистационарный режим, который констатировали при различии теплового потока, осредненного за два соседних периода пульсаций, не более чем на 0,1 %. Для выхода на квазистационарный режим требовалось не более 12 периодов пульсаций.

Результаты исследования. Влияние вынужденных пульсаций на теплообмен в пучке труб исследовалось при различных значениях числа Рейнольдса Re , числа Прандтля Pr , скважности пульсаций ψ и с относительным шагом трубок $S/D = 1,3$ (см. рис. 1). В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Теплофизические свойства рабочей жидкости соответствовали значениям числа Pr , указанным в таблице. Матрица полнофакторного численного эксперимента также приведена в таблице. Для уменьшения вариантов расчета оценка влияния амплитуды и частоты пульсаций проводилась с помощью безразмерного комплекса A/DSh , где $Sh = fD/u_{st}$ (Sh – число Струхала).

Параметры численного эксперимента

Уровни	Re	A/DSh	Pr	ψ
1	3500	0,15	3	0,2
2	6000	0,46	5,5	0,5
3	8500	0,77	8	–

Для валидации результатов моделирования теплообмен в пучке труб при двух значениях S/D для стационарного течения сравнивался с критериальным уравнением (рис. 3), предложенным А. Жукаускасом [1] по результатам обобщения экспериментальных данных для шахматных пучков труб:

$$Nu = 0,4Re^{0,6}Pr^{0,36}. \quad (13)$$

Результаты численного моделирования показывают, что теплоотдача в пучке труб удовлетворительно согласуется с уравнением (13), различие для пучка при $S/D = 1,3$ и $S/D = 1,8$ составило не более 17 и 11 % соответственно. Большее расхождение с уравнением (13) при $S/D = 1,3$, возможно, связано с тем, что данное значение S/D выходит за пределы исследованных А. Жукаускасом [1].

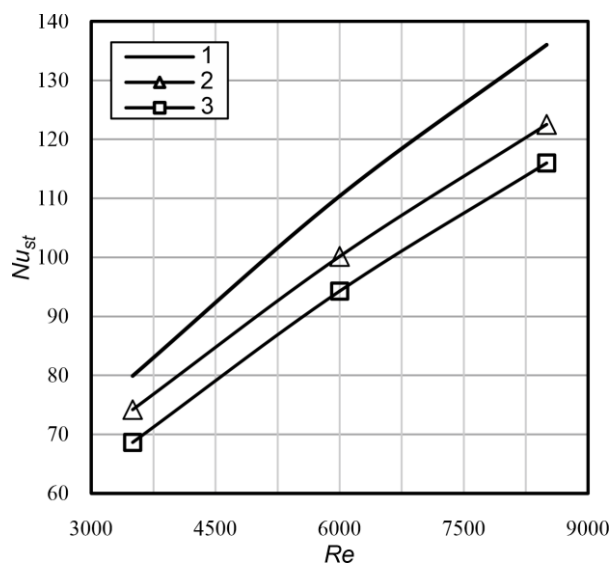


Рис. 3. Зависимость Nu_{st} от Re при $Pr = 3$: 1 – результаты моделирования; 2 – данные А. Жукаускаса [1]

На рис. 4 и 5 показано влияние интенсивности пульсаций A/DSh на теплообмен пучка труб при числе Прандтля $Pr = 3$, $Pr = 8$ и различным числе Рейнольдса Re . Увеличение интенсивности пульсаций A/DSh приводит к росту числа Нуссельта Nu_p при всех исследованных значениях числа Рейнольдса Re и числа Прандтля Pr . Полученные результаты согласуются с данными других исследований. В [4–6, 11, 15] амплитуда и частота пульсаций также оказывали положительное влияние на теплообмен коридорного пучка. Влияние Re и Pr на теплообмен пучка труб при пульсационном течении

² ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc, Canonsburg, 2016.

аналогично стационарному течению: увеличение как Re , так и Pr приводит к росту теплоотдачи.

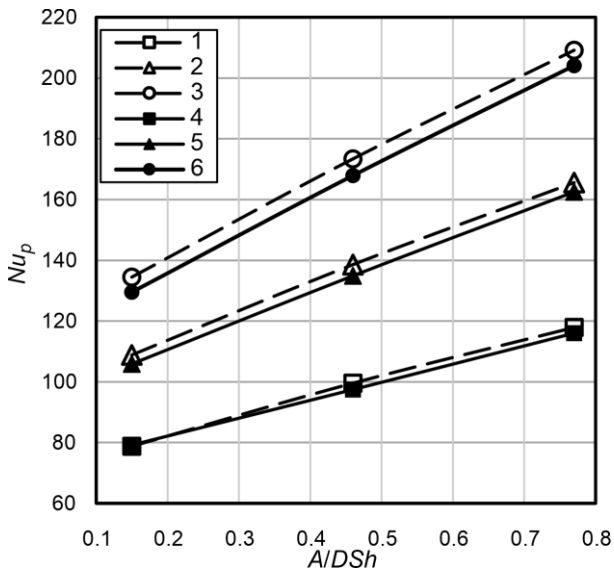


Рис. 4. Зависимость Nu_p от A/DSh для различных значений ψ и Re при $Pr = 3$: 1 – $Re = 3500$, $\psi = 0,2$; 2 – $Re = 6000$, $\psi = 0,2$; 3 – $Re = 8500$, $\psi = 0,2$; 4 – $Re = 3500$, $\psi = 0,5$; 5 – $Re = 6000$, $\psi = 0,5$; 6 – $Re = 8500$, $\psi = 0,5$

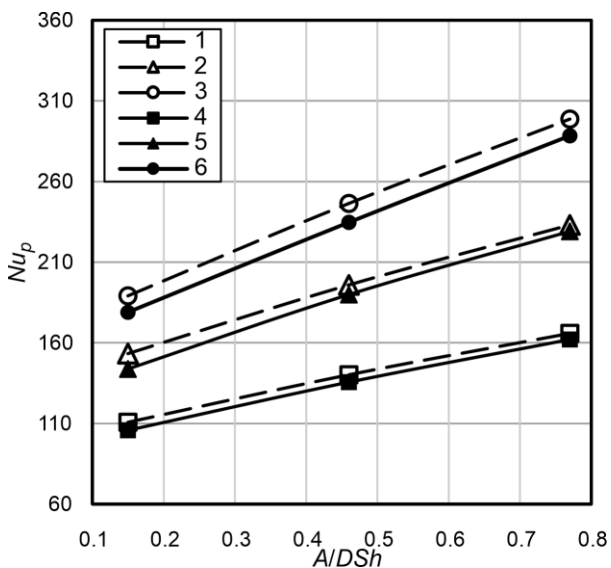


Рис. 5. Зависимость Nu_p от A/DSh для различных значений ψ и Re при $Pr = 8$: 1 – $Re = 3500$, $\psi = 0,2$; 2 – $Re = 6000$, $\psi = 0,2$; 3 – $Re = 8500$, $\psi = 0,2$; 4 – $Re = 3500$, $\psi = 0,5$; 5 – $Re = 6000$, $\psi = 0,5$; 6 – $Re = 8500$, $\psi = 0,5$

Влияние скажности пульсаций на теплоотдачу пучка труб в целом несущественно. Теплоотдача при несимметричных пульсациях незначительно выше, чем при симметричных пульсациях во всем исследованном диапазоне, при этом данная тенденция усиливается (на 1–2 %) с ростом Pr , Re и A/DSh .

На рис. 6 показано влияние A/DSh на прирост числа Нуссельта Nu_p/Nu_{st} в пульсационном течении по сравнению со стационарным

течением. Рост A/DSh приводит к увеличению Nu_p/Nu_{st} , при этом влияние числа Re на Nu_p/Nu_{st} по сравнению с влиянием A/DSh незначительно. Например, при $Pr = 3$ и $\psi = 0,5$ с увеличением A/DSh от 0,15 до 0,77 прирост числа Нуссельта Nu_p/Nu_{st} увеличивается с 1,12 до 1,76, при этом разброс прироста Nu_p/Nu_{st} для исследованного диапазона Re при $\psi = 0,5$ составляет не более 1,04 раза.

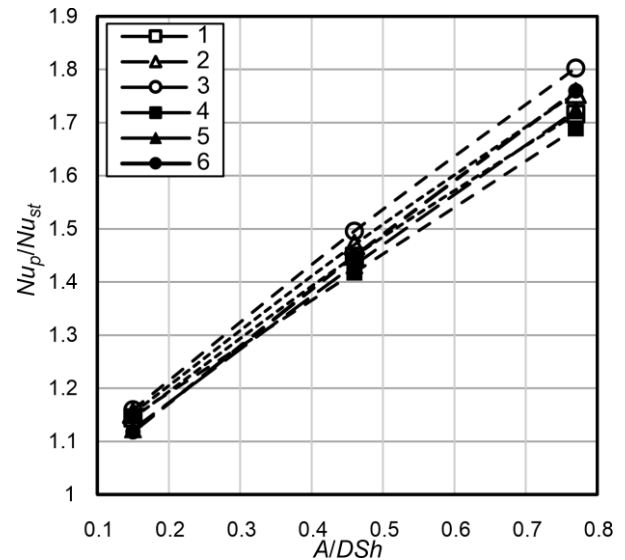


Рис. 6. Зависимость Nu_p/Nu_{st} от A/DSh для различных значений ψ и Re при $Pr = 3$: 1 – $Re = 3500$, $\psi = 0,2$; 2 – $Re = 6000$, $\psi = 0,2$; 3 – $Re = 8500$, $\psi = 0,2$; 4 – $Re = 3500$, $\psi = 0,5$; 5 – $Re = 6000$, $\psi = 0,5$; 6 – $Re = 8500$, $\psi = 0,5$

На рис. 7, 8 показаны зависимости отношения гидравлического сопротивления ξ_p/ξ_{st} в пульсационном течении по сравнению со стационарным течением и теплогидравлическая эффективность пучка труб при $Pr = 3$ и различном числе Re .

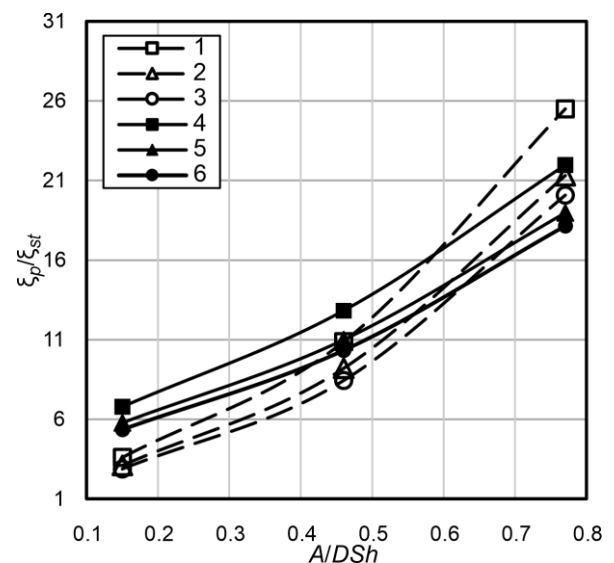


Рис. 7. Зависимость ξ_p/ξ_{st} от A/DSh для различных значений ψ и Re при $Pr = 3$: 1 – $Re = 3500$, $\psi = 0,2$; 2 – $Re = 6000$, $\psi = 0,2$; 3 – $Re = 8500$, $\psi = 0,2$; 4 – $Re = 3500$, $\psi = 0,5$; 5 – $Re = 6000$, $\psi = 0,5$; 6 – $Re = 8500$, $\psi = 0,5$

Увеличение интенсивности пульсаций A/DSh приводит к росту гидравлического сопротивления в несколько раз, при этом рост ξ_p/ξ_{st} при несимметричных пульсациях с увеличением A/DSh опережает рост ξ_p/ξ_{st} при симметричных пульсациях. Когда интенсивность пульсаций минимальна ($A/DSh = 0,15$), гидравлическое сопротивление ниже при скважности $\psi = 0,2$, с увеличением A/DSh до $0,77$ гидравлическое сопротивление выше при $\psi = 0,5$. Эффект влияния числа Re на ξ_p/ξ_{st} менее значителен по сравнению с A/DSh , при этом увеличение числа Re приводит к уменьшению прироста ξ_p/ξ_{st} .

Теплогидравлическая эффективность пучка труб η максимальна при минимальной интенсивности пульсаций A/DSh и уменьшается с ростом A/DSh (рис. 8). Эффективность пучка труб при несимметричных пульсациях превосходит эффективность при симметричных пульсациях в два раза для минимального значения A/DSh за счет меньшего роста гидравлического сопротивления при $\psi = 0,2$ (рис. 7). С увеличением A/DSh теплогидравлическая эффективность пучка труб при несимметричных пульсациях приближается к эффективности при симметричных пульсациях.

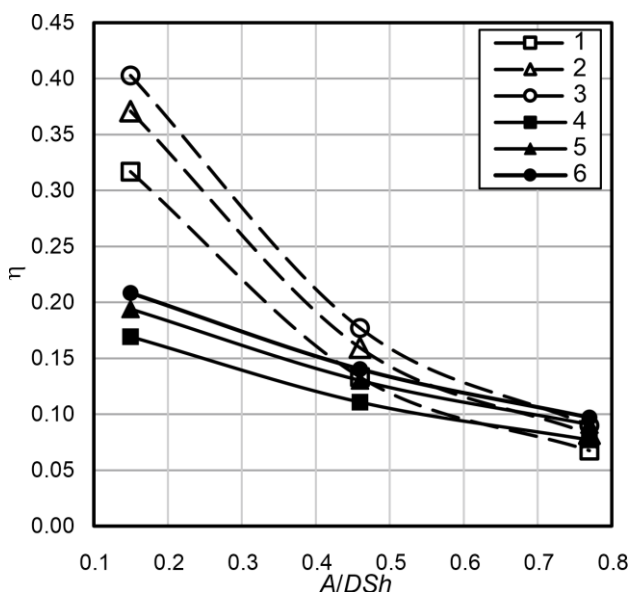


Рис. 8. Зависимость η от A/DSh для различных значений ψ и Re при $Pr = 3$: 1 – $Re = 3500$, $\psi = 0,2$; 2 – $Re = 6000$, $\psi = 0,2$; 3 – $Re = 8500$, $\psi = 0,2$; 4 – $Re = 3500$, $\psi = 0,5$; 5 – $Re = 6000$, $\psi = 0,5$; 6 – $Re = 8500$, $\psi = 0,5$

По результатам численного исследования получены обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи при несимметричных и симметричных пульсациях:

$$Nu_p = 0,5Re^{0,629} Pr^{0,353} (A/DSh)^{0,253}, \quad (14)$$

$$Nu_p/Nu_{st} = 1,393Re^{0,031} Pr^{0,011} (A/DSh)^{0,253}, \quad (15)$$

$$Nu_p = 0,591 Re^{0,61} Pr^{0,335} (A/DSh)^{0,263}, \quad (16)$$

$$Nu_p/Nu_{st} = 1,634 Re^{0,013} Pr^{-0,006} (A/DSh)^{0,263}. \quad (17)$$

Уравнения (14)–(17) справедливы для шахматного пучка труб при принятых геометрических параметрах и режимных параметрах: $3500 \leq Re \leq 8500$; $3 \leq Pr \leq 8$; $0,15 \leq A/DSh \leq 0,77$.

Отклонение полученных зависимостей от данных численного эксперимента составляет не более 5 % (рис. 9, 10). Степенные показатели полученных уравнений (14)–(17) свидетельствуют о том, что прирост теплоотдачи Nu_p/Nu_{st} практически не зависит от Re и Pr , значение эмпирических констант при Re и Pr в уравнениях (15), (17) не более 0,031. В связи с этим прирост теплоотдачи Nu_p/Nu_{st} в пучке труб при вынужденных пульсациях потока определяется интенсивностью пульсаций A/DSh .

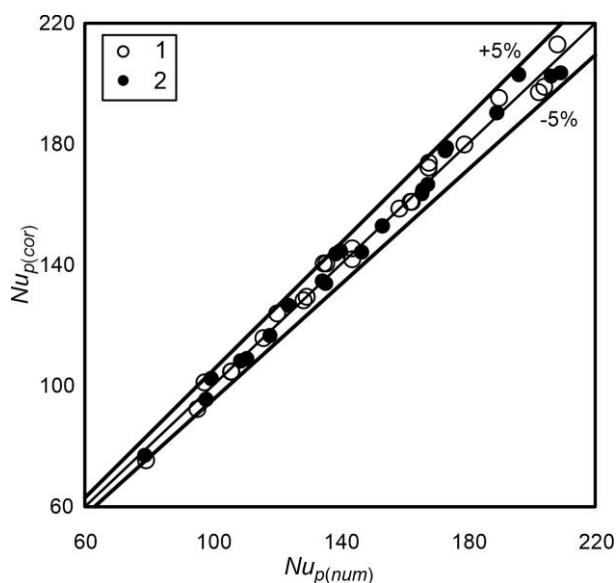


Рис. 9. Сравнение корреляций (14), (16) и результатов численного исследования: 1 – $\psi = 0,2$; 2 – $\psi = 0,5$

Для организации возвратно-поступательного движения в пучках труб ТА возможно применение технических решений, предложенных в [4, 21]. Возвратно-поступательное движение в ТА может осуществляться посредством поршня. Движение поршня с соответствующими режимными параметрами может контролироваться посредством пневматической или гидравлической системы.

При симметричных пульсациях простым решением для организации возвратно-поступательного пульсационного течения является применение кулачкового механизма на основе электропривода.

Целесообразность применения пульсирующего течения в ТА, в том числе аппаратного оформления пульсационного метода, должна рассматриваться на основе эксплуатационных и капитальных затрат, что выходит за рамки настоящего исследования.

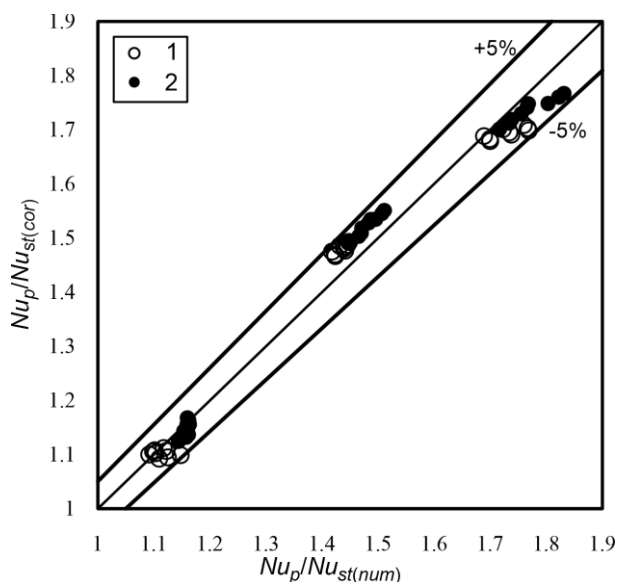


Рис. 10. Сравнение корреляций (15), (17) и результатов численного исследования: 1 – $\psi = 0,2$; 2 – $\psi = 0,5$

Необходимо учитывать, что рассмотренный метод интенсификации теплообмена требует дополнительных энергетических затрат на генерацию пульсаций и может являться экономически нецелесообразным в ряде случаев. Экономическая эффективность при организации пульсирующего течения в ТА подтверждена в работах других авторов [22, 23]. Одним из преимуществ исследованного метода является возможность организации пульсирующего течения в существующем ТА для восстановления теплопроизводительности, например, при пиковых нагрузках работы ТА. При этом возможны ситуации, когда габариты ТА могут быть ограничены техническим заданием. Для организации возвратно-поступательного движения оборудование может быть установлено дистанционно, что позволит повысить теплопроизводительность ТА, не увеличивая площадь теплообмена.

Выводы. В результате проведенного численного исследования теплообмена в шахматном пучке труб при вынужденных возвратно-поступательных пульсациях потока и анализа полученных данных установлено, что увеличение A/DSh приводит к росту Nu и уменьшению теплогидравлической эффективности η независимо от скважности ψ пульсаций, получены обобщающие зависимости, позволяющие предсказывать теплоотдачу шахматного пучка труб в диапазоне числа Рейнольдса $3500 \leq Re \leq 8500$, числа Прандтля $3 \leq Pr \leq 8$, и интенсивности пульсаций $0,15 \leq A/DSh \leq 0,77$.

Полученные в ходе численного исследования результаты показывают возможность интенсификации теплообмена в шахматных пучках труб за счет вынужденных пульсаций потока. Установлено, что скважность пульсаций незначительно влияет на теплообмен. При этом теплогидравлическая эффективность η для несимметричного

режима пульсаций может быть до двух раз выше, чем для симметричного режима. Принимая во внимание затраты энергии на генерацию пульсаций, можно заключить, что несимметричный режим является энергетически более эффективным при низкой интенсивности пульсаций.

Список литературы

1. Zukauskas A. Heat Transfer from Tubes in Cross-flow // *Adv. Heat Transf.* – 1972. – Vol. 18. – P. 87–159.
2. **Experimental** investigation and analysis on the cross flow characteristics over inline tube bundles with $S/D=1,875$ / X. Xie, A. Ma, H. Zhao, et al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2023. – Vol. 203. – P. 123800.
3. Seroshtanov V., Gusakov A. Gradient Heatmetry and PIV Investigation of Heat Transfer and Flow near Circular Cylinders // *Inventions.* – 2022. – Vol. 7, No. 3. – P. 80.
4. **Experimental** study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow / A. Hayrullin, A. Haibullina, A. Sinyavin, V. Ilyin // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2024. – Vol. 232. – P. 125916.
5. **Local** Heat Transfer Dynamics in the In-Line Tube Bundle under Asymmetrical Pulsating Flow / A. Haibullina, A. Hayrullin, D. Balzamor, et al. // *Energies.* – 2022. – Vol. 15, No. 22. – P. 8660.
6. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р. Численное исследование теплообмена в коридорном пучке труб в условиях пульсирующего потока жидкости // *Вестник ИГЭУ.* – 2019. – Вып. 4. – С. 12–21.
7. Ghazanfarian J., Taghilou B. Active Heat Transfer Augmentation of Bundle of Tubes by Partial Oscillatory Excitation // *Journal of Thermophysics and Heat Transf.* – 2018. – Vol. 32, No. 3. – P. 590–604.
8. Mulcahey T.I., Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M. The effect of flow pulsation on drag and heat transfer in an array of heated square cylinders // *International Journal of Thermal Sciences.* – 2013. – Vol. 64. – P. 105–120.
9. Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M. Thermal Dispersion and Convection Heat Transfer during Laminar Transient Flow in Porous Media // *International Journal of Thermal Sciences.* – 2011. – Vol. 50. – P. 440–448.
10. **Numerical** study on the heat transfer characteristics of oscillating flow in cryogenic regenerators / S. Chen, Q. Huang, M. Liang, et al. // *Cryogenics.* – 2018. – Vol. 96. – P. 99–107.
11. **Effect** of pulsation parameters on the spatial and temporal variation of flow and heat transfer characteristics in liquid metal cross flow the in-line tube bundle / H. Jiang, Y. Niu, P. Yang, Y. Liu // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2024. – Vol. 219. – P. 124871.
12. Akcay S., Akdag U. Numerical Analysis of Thermal and Hydraulic Performance of Pulsating Nanofluid Flow Over Cam-Shaped Tube Bundles // *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng.* – 2023. – Vol. 47, No. 3. – P. 969–988.
13. **A comparative** experimental study on the performance of staggered tube-bundle heat exchanger with unequally-pitch and equally-pitch arrangement in oscillating flow / Z. Wu, S. You, H. Zhang, W. Zheng // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2020. – Vol. 154. – P. 119680.
14. **Experimental** investigation on heat transfer characteristics of staggered tube bundle heat exchanger immersed in oscillating flow / Z. Wu, S. You, H. Zhang, W. Zheng // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2020. – Vol. 148. – P. 119125.
15. **Heat** transfer of a tube bundle in a pulsating flow: 4 / V.M. Molochnikov, A.N. Mikheev, A.K. Aslaev, et al. // *Thermophys. Aeromech.* – 2019. – Vol. 26, No. 4. – P. 547–559.

16. **Flow** structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow / V.M. Molochnikov, A.N. Mikheev, A.K. Aslaev, et al. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1105. – P. 012024.

17. **Konstantinidis E., Castiglia D., Balabani S.** An experimental study of steady and pulsating cross-flow over a semi-staggered tube bundle // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2005. – Vol. 219, No. 3. – P. 283–298.

18. **Konstantinidis E., Balabani S., Yianneskis M.** Relationship Between Vortex Shedding Lock-On and Heat Transfer // Chemical Engineering Research and Design. – 2003. – Vol. 81, No. 6. – P. 695–699.

19. **Konstantinidis E., Balabani S., Yianneskis M.** Phase-Average Mean Flow and Turbulence Structure in a Staggered Cylinder Array Subjected to Pulsating Cross-Flow // Journal of Fluids Engineering. – 2004. – Vol. 126, No. 3. – P. 323–336.

20. **Bergles A.E., Bunn R.L., Junkhan G.H.** Extended performance evaluation criteria for enhanced heat transfer surfaces // Letters in Heat and Mass Transfer. – 1974. – Vol. 1, No. 2. – P. 113–120.

21. **Energy** efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler / A. Haibullina, L.S. Sabitov, A. Hayrullin, V.K. Ilyin // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2018. – Vol. 412. – P. 012026.

22. **Федоткин И.М., Фирисюк В.Р.** Интенсификация теплообмена в аппаратах химических производств. – Киев: Техника, 1971. – 216 с.

23. **Колчин С.А.** Гидравлическое сопротивление дискретно-шероховатого канала при наложенных пульсациях потока: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05, 01.04.14. – Казань, 2015. – 126 с.

References

1. Zukauskas, A. Heat Transfer from Tubes in Cross-flow. *Adv. Heat Transf.*, 1972, vol. 18, pp. 87–159.

2. Xie, X., Ma, A., Zhao, H., Li, X., Wu, X. Experimental investigation and analysis on the cross flow characteristics over inline tube bundles with $S/D = 1,875$. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 203, p. 123800.

3. Seroshtanov, V., Gusakov, A. Gradient Heatmetry and PIV Investigation of Heat Transfer and Flow near Circular Cylinders. *Inventions*, 2022, vol. 7, no. 3, p. 80.

4. Hayrullin, A., Haibullina, A., Sinyavin, A., Ilyin, V. Experimental study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 232, p. 125916.

5. Haibullina, A., Hayrullin, A., Balzamor, D., Ilyin, V., Bronskaya, V., Khairullina, L. Local Heat Transfer Dynamics in the In-Line Tube Bundle under Asymmetrical Pulsating Flow. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 22, p. 8660.

6. Khaibullina, A.I., Khairullin, A.R. Chislennoe issledovanie teploobmena v koridornom puchke trub v usloviyakh pul'siruyushchego potoka zhidkosti [A numerical study of heat transfer in the in-line tube bundle under pulsating fluid flow conditions]. *Vestnik IGÉU*, 2019, issue 4, pp. 12–21.

7. Ghazanfarian, J., Taghilou, B. Active Heat Transfer Augmentation of Bundle of Tubes by Partial Oscillatory Excitation. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2018, vol. 32, no. 3, pp. 590–604.

8. Mulcahey, T.I., Pathak, M.G., Ghiaasiaan, S.M. The effect of flow pulsation on drag and heat transfer in an array of heated square cylinders. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, vol. 64, pp. 105–120.

9. Pathak, M.G., Ghiaasiaan, S.M. Thermal Dispersion and Convection Heat Transfer during Laminar Transient Flow in Porous Media. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, vol. 50, pp. 440–448.

10. Chen, S., Huang, Q., Liang, M., Chen, H., Chen, L., Hou, Y. Numerical study on the heat transfer characteristics of oscillating flow in cryogenic regenerators. *Cryogenics*, 2018, vol. 96, pp. 99–107.

11. Jiang, H., Niu, Y., Yang, P., Liu, Y. Effect of pulsation parameters on the spatial and temporal variation of flow and heat transfer characteristics in liquid metal cross flow the in-line tube bundle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 219, p. 124871.

12. Akcay, S., Akdag, U. Numerical Analysis of Thermal and Hydraulic Performance of Pulsating Nanofluid Flow Over Cam-Shaped Tube Bundles. *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng.*, 2023, vol. 47, no. 3, pp. 969–988.

13. Wu, Z., You, S., Zhang, H., Zheng, W. A comparative experimental study on the performance of staggered tube-bundle heat exchanger with unequally-pitch and equally-pitch arrangement in oscillating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 154, p. 119680.

14. Wu, Z., You, S., Zhang, H., Zheng, W. Experimental investigation on heat transfer characteristics of staggered tube bundle heat exchanger immersed in oscillating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 148, p. 119125.

15. Molochnikov, V.M., Mikheev, A.N., Aslaev, A.K., Dushina, O.A., Paereliy, A.A. Heat transfer of a tube bundle in a pulsating flow. *Thermophys. Aeromech.*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 547–559.

16. Molochnikov, V.M., Mikheev, A.N., Aslaev, A.K., Goltsman, A.E., Paereliy, A.A. Flow structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1105, p. 012024.

17. Konstantinidis, E., Castiglia, D., Balabani, S. An experimental study of steady and pulsating cross-flow over a semi-staggered tube bundle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2005, vol. 219, no. 3, pp. 283–298.

18. Konstantinidis, E., Balabani, S., Yianneskis, M. Relationship Between Vortex Shedding Lock-On and Heat Transfer. *Chemical Engineering Research and Design*, 2003, vol. 81, no. 6, pp. 695–699.

19. Konstantinidis, E., Balabani, S., Yianneskis, M. Phase-Average Mean Flow and Turbulence Structure in a Staggered Cylinder Array Subjected to Pulsating Cross-Flow. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, vol. 126, no. 3, pp. 323–336.

20. Bergles, A.E., Bunn, R.L., Junkhan, G.H. Extended performance evaluation criteria for enhanced heat transfer surfaces. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1974, vol. 1, no. 2, pp. 113–120.

21. Haibullina, A.I., Sabitov, L.S., Hayrullin, A.R., Ilyin, V.K. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 412, p. 012026.

22. Fedotkin, I.M., Firisyuk, V.R. *Intensifikatsiya teploobmena v apparatakh khimicheskikh proizvodstv* [Intensification of Heat Transfer in Apparatuses of Chemical Industries]. Kiev: Tekhnika, 1971. 216 p.

23. Kolchin, S.A. *Gidravlichesкое soprotivlenie diskretno-sherokhovatogo kanala pri nalozhennykh pul'satsiyakh potoka*. Diss. ... kand. tekhn. nauk: 01.02.05, 01.04.14 [Hydraulic Resistance of a Discrete-Rough Channel with Superimposed Flow Pulsations: Cand. tech. sci. diss.: 01.02.05, 01.04.14]. Kazan, 2015. 126 p.

УДК 620.97 661.566

Егор Александрович Шелгинский

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», аспирант, ассистент кафедры промышленных теплоэнергетических систем, Россия, Москва, e-mail: yegornumberone@yandex.ru

Юрий Викторович Яворовский

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленных теплоэнергетических систем, Россия, Москва, e-mail: YavorovskyYV@mpei.ru

Александр Яковлевич Шелгинский

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», доктор технических наук, профессор кафедры промышленных теплоэнергетических систем, Россия, Москва, e-mail: shelginskyay@yandex.ru

Выбор рабочих тел для органического цикла Ренкина на примере производства азотной кислоты

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одним из способов утилизации теплоты вторичных энергетических ресурсов в промышленности являются установки, работающие по органическому циклу Ренкина, в которых используются низкокипящие органические вещества. Органический цикл Ренкина находит применение как в промышленности, так и в возобновляемой энергетике. Производство же слабой азотной кислоты осуществляется по методу Оствальда. В Российской Федерации производство слабой азотной кислоты осуществляется на двух основных агрегатах: АК-72 (АК-72М) и УКЛ-7 (УКЛ-7М). Оба агрегата спроектированы во второй половине XX века в СССР и имеют значительные недостатки, связанные с выбросами низкопотенциальной и среднетенциальной тепловой энергии в окружающую среду. В связи с этим одной из актуальных задач является поиск способов повышения энергетической эффективности в производстве азотной кислоты, особенно с учетом наблюдающегося постоянного роста цен на топливные ресурсы и электроэнергию.

Материалы и методы. Анализ энергоэффективности агрегата УКЛ-7 произведен с использованием уравнений теплового баланса и коэффициента полезного использования тепловой энергии. Теплоту сжатого воздуха в агрегате УКЛ-7 производства слабой азотной кислоты предлагается утилизировать посредством органического цикла Ренкина.

Результаты. Предложена методика выбора подходящего низкокипящего рабочего тела с определением давлений, температур и pinch-точки (минимальной разницы температур при теплообмене в теплообменниках органического цикла Ренкина), соответствующих максимальной полезной эффективной мощности органического цикла Ренкина. Получены термодинамические параметры (давление, температура, термический и эффективный КПД) органического цикла Ренкина для двенадцати низкокипящих рабочих тел. Определено рабочее тело, при котором цикл имеет наибольшее значение эффективной мощности. Проведен отбор рабочих тел по экологическим характеристикам и указаны подходящие низкокипящие рабочие тела. Определена эффективность агрегата УКЛ-7 для каждого из рабочих тел при использовании органического цикла Ренкина.

Выводы. Предложенная методика, основанная на термодинамическом анализе энергоэффективности, позволяет выбрать подходящее низкокипящее рабочее тело из рассмотренных веществ при утилизации теплоты сжатого воздуха для органического цикла Ренкина в производстве слабой азотной кислоты в агрегате УКЛ-7 по предложенной тепловой схеме.

Ключевые слова: вторичные энергетические ресурсы, органический цикл Ренкина, слабая азотная кислота, низкокипящее рабочее тело

Egor Aleksandrovich Shelginsky

Moscow Power Engineering Institute, Postgraduate Student, Teaching Assistant of Heat Power Engineering Systems Department, Russia, Moscow, e-mail: yegornumberone@yandex.ru

Yury Viktorovich Yavorovsky

Moscow Power Engineering Institute, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Head of Heat Power Engineering Systems Department, Russia, Moscow, e-mail: YavorovskyYV@mpei.ru

Aleksandr Yakovlevich Shelginsky

Moscow Power Engineering Institute, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Heat Power Engineering Systems Department, Russia, Moscow, e-mail: shelginskyay@yandex.ru

Selection of working fluid for organic Rankine cycle using nitric acid production as an example

Abstract

Background. One of the ways to utilize the heat of secondary energy resources in the industrial sector is to use organic Rankine cycle installations, which use low-boiling organic substances. Organic Rankine cycle is applied both in industry and renewable energy sector. The production of weak nitric acid is carried out using the Ostwald method. There are two main nitric acid production units in Russian Federation. They are AK-72 (AK-72M) and UCL-7 (UCL-7M). Both units were designed in the second half of the XX century in the USSR. They have significant shortcomings due to the emission of low-potential and medium-potential thermal energy into the environment. Therefore, one of the vital tasks is to find ways to increase energy efficiency in nitric acid production, especially taking into account the constant increase in prices for fuel resources and electricity.

Materials and methods. The energy efficiency analysis of the UCL-7 unit has been carried out using heat balance equations and the coefficient of efficient use of thermal energy. It is proposed to utilize the heat of compressed air in the UCL-7 unit for the production of weak nitric acid using the organic Rankine cycle.

Results. The authors have proposed a method to select an applicable suitable low-boiling working fluid with the determination of pressures, temperatures and pinch-point (the minimum temperature difference during heat exchange in heat exchangers of the organic Rankine cycle), corresponding to the maximum useful effective power of the organic Rankine cycle. Thermodynamic parameters (pressure, temperature, thermal and effective efficiency) of the organic Rankine cycle for twelve low-boiling working fluids have been obtained. The working fluid for which the cycle has the highest effective power value has been determined. Working fluids have been selected based on environmental characteristics. Applicable low-boiling working fluids have been identified. The efficiency of the UCL-7 unit has been determined for each working fluid using the organic Rankine cycle.

Conclusion. The proposed methodology based on a thermodynamic analysis of energy efficiency, make it possible to select an applicable low-boiling working fluid from the substances considered when utilizing the heat of compressed air for the organic Rankine cycle during the production of weak nitric acid in the UCL-7 unit according to the proposed thermal scheme.

Key words: secondary energy resources, organic Rankine cycle, weak nitric acid, low-boiling working fluid

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.030-039

Введение. Одним из способов утилизации низкопотенциальной и среднетенциальной тепловой энергии вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) является технология, работающая по органического цикла Ренкина.

Органический цикл Ренкина (ОЦР) представляет собой теплосиловой цикл Ренкина, основным отличием которого от пароводяного цикла Ренкина является использование органических веществ. Такие органические вещества называются также низкокипящими рабочими телами (НКРТ или НРТ), так как температура их кипения значительно ниже температуры кипения воды [1, 2].

Основными элементами ОЦР являются испаритель (теплообменный аппарат, в котором происходит подвод теплоты от источника для испарения НКРТ), расширитель (производство механической работы за счет расширения НКРТ), конденсатор (конденсация НКРТ и отвод теплоты из цикла), насос (сжатие жидкого НКРТ до начального давления).

Существуют различные схемы осуществления технологии ОЦР. Так, установки ОЦР могут быть рекуперативными, включающими теплообменник – рекуператор для нагрева НКРТ после сжатия [1, 2]. Существуют и регенеративные установки ОЦР, в которых происходит отбор части пара НКРТ из турбины и направляется на смешение с НКРТ, идущим из конденсатора, тем самым повышается температура НКРТ на входе в испаритель [1, 3]. Также существует исполнение

каскадных установок ОЦР [4, 5]. Проводятся исследования в области двухфазного расширения НКРТ в цикле, где используются спиральные и винтовые расширители [6, 7].

Применение установок ОЦР находит широкое применение также и в цикле газотурбинных установок [8, 9]; для привода компрессора пароконденсационных холодильных установок [10, 11]; для выработки электроэнергии от солнечного излучения (от солнечных коллекторов) [12, 13] и др.

Одним из ключевых этапов проектирования установок ОЦР является выбор подходящего НКРТ.

Выбор подходящего НКРТ зависит от множества факторов: вида источника теплоты и его температуры, влияющих на термодинамическую эффективность; экологической безопасности, заключающейся в показателях потенциала глобального потепления (ПГП) и озоноразрушающего потенциала (ОРП); горючести и токсичности; границах термического разложения; стоимости и доступности; совместимости со смазочными материалами; эффективной мощности [14, 15].

Что касается типа источника теплоты, то здесь важным фактором является минимальная разница температур в точке сжатия (pinch-point, PP), от значения которой зависит давление в испарителе, температура НКРТ в конце испарителя и температура кипения [14, 16, 17].

НКРТ также разделяют на сухие, влажные и изотропные [16, 18]. К сухим относят вещества, у которых наклон линий насыщения соответствует

$$\frac{ds}{dt} > 0; \text{ к влажным } - \frac{ds}{dt} < 0; \text{ к изотропным } - \frac{ds}{dt} = 0.$$

$$\text{тропным } - \frac{ds}{dt} = 0.$$

НКРТ также подразделяются на чистые вещества (присутствует один компонент, температура кипения не изменяется при постоянном давлении), зеотропные и азеотропные. К зеотропным веществам относят те, в которых присутствует смесь двух и более веществ с изменяющейся температурой кипения при постоянном давлении. К азеотропным относят вещества, в которых присутствует смесь двух и более веществ с постоянной температурой кипения при постоянном давлении [19–21].

Существует большое количество чистых, зеотропных и азеотропных НКРТ. Исследователи также уделяют внимание разработке смесей НКРТ, так как для каждой установки ОЦР в зависимости от температуры источника необходимо подобрать и оптимальное рабочее тело. Например, используется метод CAMD (*computer aided molecular design* – «автоматизированный метод молекулярного проектирования»), основной задачей которого является

разработка подходящих смесей НКРТ для конкретного случая применения ОЦР [21, 23].

В настоящем исследовании предлагается использовать ОЦР для утилизации теплоты ВЭР в производстве слабой азотной кислоты, работающего по схеме агрегата УКЛ-7. УКЛ-7 – это агрегат производства слабой азотной кислоты, работающий по методу Оствальда и имеющий единое проектное давление на всей стадии производства: как на стадии конверсии аммиака, так и на стадии абсорбции оксидов азота водой. Был выполнен анализ термодинамической эффективности разработанной тепловой схемы для нескольких уже существующих НКРТ, указанных в табл. 1. Упрощенная принципиальная схема агрегата УКЛ-7 представлена на рис. 1. Для производства слабой азотной кислоты по методу Оствальда используются три основных вещества: кислород, аммиак и вода. Агрегат УКЛ-7 работает следующим образом. Атмосферный воздух, пройдя фильтр, поступает в осевой компрессор 1, где сжимается до давления 0,342 МПа и нагревается в процессе сжатия до температуры 174 °С. После сжатия воздух поступает в теплообменник-охладитель (холодильник) 2, где охлаждается до температуры 42 °С водой водооборотного цикла через градирни, и теплота выбрасывается в окружающую среду (ОС).

Таблица 1. Список анализируемых НКРТ и их основные характеристики

№	НКРТ	$P_{кр}$, бар	$t_{кр}$, °С	$t_{кип}$, °С	$t_{тр}$, °С	ОРП	ПГП100	БП	Источник
1	R1234yf	33,8	94,7	–29,8	–53,2	0	4	A2L	[14]
2	R1234ze(E)	36,4	109	–19,3	–105	0	<1	A2L	[24]
3	R236fa	32	124,9	–1,5	–93,55	0	8060	A1	[14]
4	RC318	27,7	115,2	–6	–39,8	0	10300	A1	[14]
5	R1243zf	35,179	103,8	–25,42	–53,15	0	<1	A2	[25]
6	R600a	36,3	134	–12,1	–159	0	3	A3	[14]
7	R601	33,7	197	35,7	–130	0	5	A3	[14]
8	R227ea	29,2	101,8	–16,34	–126,8	0	3220	A1	[14]
9	R141b	42,12	204,4	32	–103,5	0,12	725	A2	[14]
10	R1270	45,6	91,1	–47,9	–185	0	3,1	A3	[25]
11	R290	42,5	96,7	–42,4	–188	0	4	A3	[14]
12	R134a	40,59	101	–26,09	–104,3	0	1300	A1	[14]

Примечание: $P_{кр}$ – критическое давление; $t_{кр}$ – критическая температура; $t_{кип}$ – температура кипения при н.у.; $t_{тр}$ – температура в тройной точке; ОРП – озоноразрушающий потенциал; ПГП100 – потенциал глобального потепления за 100 лет; БП – индекс безопасности; Источник – ссылка на источник, в котором данное НКРТ указано как используемое в ОЦР; A1 – негорючее и нетоксичное; A2 – с низкой воспламеняемостью и нетоксичное; A2L – с низкой воспламеняемостью и с высокой скоростью горения; A3 – воспламеняемое и нетоксичное по классификации ASHRAE (Классификация хладагентов по стандартам Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха).

После охлаждения воздух поступает в центробежный компрессор 5, где его давление повышается до 0,716 МПа и температура до 135 °С. Компрессор 1 приводится в работу от газовой турбины 3, которая работает от избыточного давления хвостового газа, идущего после очистки из остальной части производства. Расширенный и охлажденный хвостовой газ поступает в

котел-утилизатор (КУ) и экономайзер агрегата в узел подготовки питательной воды для образования пара и нагрева питательной воды соответственно. Другая часть механической работы турбины 3 передается через редуктор 4 на компрессор 5 и электрогенератор 6 для производства избыточной мощности.

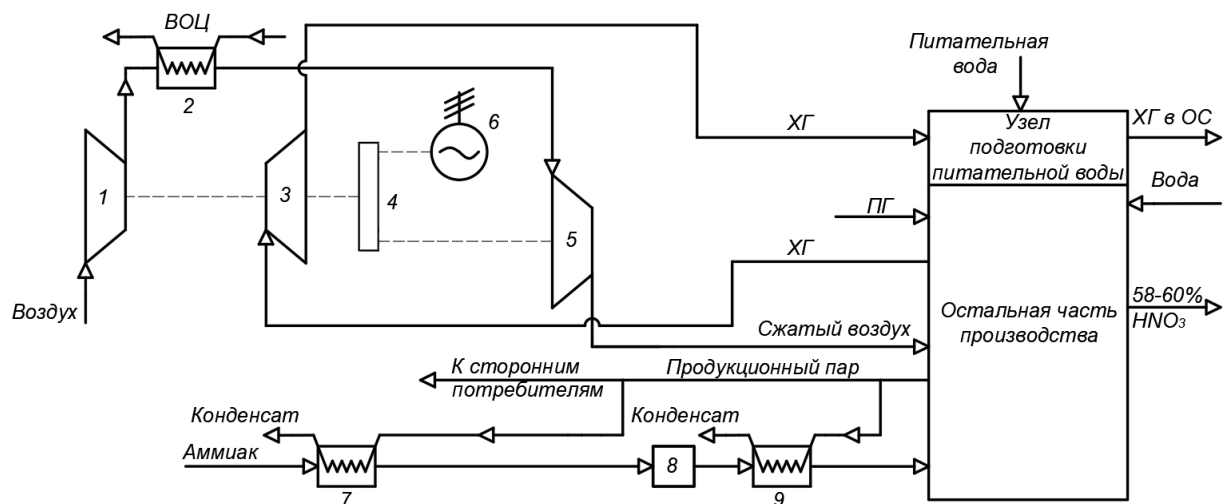


Рис. 1. Принципиальная схема агрегата УКЛ-7: 1 – осевой компрессор; 2 – холодильник; 3 – газовая турбина; 4 – редуктор; 5 – центробежный компрессор; 6 – электрогенератор; 7 – испаритель аммиака; 8 – фильтр аммиака; 9 – перегреватель аммиака; ВОЦ – водооборотный цикл; ХГ – хвостовой газ; ПГ – природный газ; ОС – окружающая среда; HNO_3 – азотная кислота

Аммиак поступает в состоянии жидкости в испаритель 7, где испаряется при давлении около 12 бар, проходит фильтр 8 и далее перегревается до температуры 110–180 °С в перегревателе 9. После чего поступает в остальную часть производства в контактный аппарат, где смешивается со сжатым воздухом, окисляется кислородом воздуха на катализаторе с выделением теплоты химических реакций. В контактном аппарате образуются оксиды азота NO . Полученная теплота химических реакций, которую несет уже нитрозный газ, утилизируется на производство пара в КУ. Полученный пар отправляется в сеть предприятия. Далее нитрозный газ также охлаждается и поступает в систему абсорбции, где абсорбируется абсорбентом – водой. Полученная в результате абсорбции 58–60 %-ная азотная кислота направляется на склад. Остатки газа (хвостовой газ) идут на очистку природным газом, где происходит выделение теплоты химических реакций. Очищенный хвостовой газ поступает в газовую турбину 3.

Наибольшим приходом теплоты в систему является теплота химических реакций окисления оксидов азота, абсорбции, конверсии и реактора очистки и составляет 77,28 % от общего прихода 46 МВт тепловой энергии в агрегат УКЛ-7. Теплота сгорания природного газа в камере сгорания природного газа реактора очистки составляет 17 %. Остальное – физическая теплота абсорбента, аммиака, воздуха, природного газа, поступающих в агрегат. Наибольший выход тепловой энергии (51,75 %) – это теплота, идущая на производство пара. Также полезной является теплота, которая преобразуется в электроэнергию в генераторе и составляет 0,126 % от общего прихода теплоты. Полезной является и теплота, уходящая с азотной кислотой, так как она является целевым продуктом и составляет 1,705 % от общего количества

теплоты. Однако 34 % теплоты уходит с водой водооборотного цикла (ВОЦ), являясь низкопотенциальной и среднетемпературной, как, например, теплота сжатого воздуха между компрессорами в холодильнике 2. Остальная выходящая теплота включает в себя потери с хвостовым газом и прочие потери, заключающиеся в несовершенстве процессов сжатия и расширения, и потери через стенки аппаратов.

Предлагается использовать теплоту сжатого воздуха между компрессорами для производства электроэнергии с помощью ОЦР. Разработанная тепловая схема представлена на рис. 2.

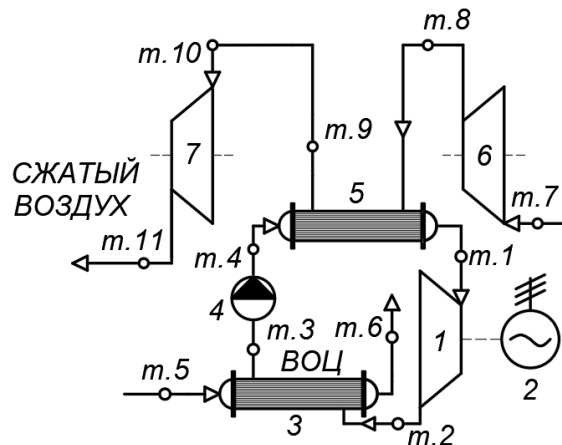


Рис. 2. Принципиальная схема утилизации теплоты сжатого воздуха посредством ОЦР: 1 – расширитель ОЦР; 2 – электрогенератор; 3 – конденсатор ОЦР; 4 – насос ОЦР; 5 – испаритель ОЦР; 6 – осевой компрессор; 7 – центробежный компрессор; ВОЦ – водооборотный цикл; т. 1 – т. 11 – соответствующие точки процессов схемы

Методы исследования. Основной задачей анализа предлагаемой тепловой схемы является выбор подходящего НКРТ, соответствующего максимальной эффективной мощности ОЦР. Для

выбора подходящего НКРТ предлагается следующая методика.

1. Задается давление P_2 (после расширителя, в конденсаторе ОЦР) в зависимости от двух условий: 1) температурного потенциала источника холода; 2) снижения средней температуры отвода теплоты из цикла.

2. Задается давление P_1 (перед расширителем, в испарителе) – от близкого к критическому до близкого к P_2 с учетом степени расширения.

3. Задается температура перегрева НКРТ на выходе из испарителя в зависимости от двух условий: 1) температурного потенциала источника теплоты (ВЭР) и его расходной теплотемкости; 2) эффективности теплообменника.

4. Определяются условия фазовых состояний в характерных точках процесса: 1,2 – газ, или перегретый газ, или насыщенный газ (в случае $\frac{ds}{dt} > 0$); 3,4 – жидкость.

5. Осуществляется проверка теплообмена в испарителе ОЦР.

6. Проверяется осуществление теплообмена в конденсаторе ОЦР.

7. Определяется эффективная мощность ОЦР с учетом КПД всех элементов. Осуществляется выбор НКРТ, соответствующих максимуму этой мощности, с соответствующими температурой t_1 и давлением P_1 НКРТ.

Для реализации методики разработан алгоритм анализа для тепловой схемы со следующими исходными данными: расход воздуха между компрессорами $G_{вх} = 25,78$ кг/с; теплотемкость воздуха $C_{рвх} = 1,04$ кДж/кг·К; температура воздуха на входе в испаритель $t_1^{ВЭР} = 174$ °С (рис. 2, т. 8); температура воздуха на выходе из испарителя $t_2^{ВЭР} = 42$ °С (рис. 2, т. 9). Принято, что воздух охлаждается и передает тепловую мощность НКРТ в испарителе полностью, как и в изначальной схеме УКЛ-7 в охладителе 2 (см. рис. 1). Так как в настоящем исследовании рассматривается тепловая схема использования ОЦР и конкретные модели аппаратов ОЦР неизвестны, то для оценки показателей системы задаются значения КПД. Во многих работах, посвященных ОЦР, значения КПД также задаются для приближенной оценки эффективности ОЦР [1, 11]. Эти значения могут быть различны для каждого НКРТ и параметров НКРТ в цикле. Однако для упрощения принимается, что для каждого НКРТ для всех рассматриваемых параметров значения КПД фиксированы и соответственно приняты: КПД, учитывающий механические потери $\eta_m = 90$ %; потери в электродвигателе $\eta_{эд} = 80$ %; потери в редукторе расширителя (редуктор расширителя не показан на схеме рис. 2) $\eta_p = 90$ %; потери в электрогенераторе $\eta_{эг} = 85$ %; внутренние потери при сжатии в насосе $\eta_{oi}^H = 70$ %; внутренние потери в

расширителе $\eta_{oi}^P = 80$ %. Температура воздуха в т. 11 равна 135 °С, в т. 7 температура атмосферного воздуха принята 20 °С (рис. 2).

Алгоритм анализа тепловой схемы следующий. Источником холода в конденсаторе ОЦР принят водооборотный цикл с градирней с температурным графиком 25/32 °С (рис. 2, т. 5 / т. 6). Температура НКРТ в т. 3 принята равной $t_3 = 25 + 7 = 32$ °С, т. е. на 7 °С выше начальной температуры охлаждающей воды. Температура насыщения НКРТ в конденсаторе принята на 5 °С выше температуры НКРТ в т. 3 и составляет $t_{кс} = 37$ °С. По данной температуре насыщения определяется давление НКРТ в конденсаторе P_2 .

Давление P_1 варьируется в интервале $[P_{кр} - 1 \text{ бар}; P_2 + 1 \text{ бар}]$ с шагом 1 бар, где $P_{кр}$ – критическое давление соответствующего НКРТ. Рассматриваемый ОЦР – докритический.

Для каждого давления задается температура перегрева НКРТ (на выходе из испарителя) $t_1 = t_1^{ВЭР} - \Delta t$ где $\Delta t = [10 - 100]$ °С с интервалом 10 °С. Таким образом, варьируется эффективность испарителя ОЦР для каждого из значений P_1 .

Для каждого давления, при котором варьируется t_1 , определяются фазовые состояния точек цикла 1,2,3,4 на нужное фазовое состояние и рассчитываются параметры цикла для каждого давления. Если т. 1,2 не входят в область газа, и 3,4 – в область жидкости ни для одной из температур и давлений, то соответствующий НКРТ далее не рассматривается.

Затем производится проверка теплообмена в испарителе. Пересечение потоков теплообмена наблюдается в области жидкости НКРТ и в области испарения НКРТ (рис. 3). С определенным шагом температур от начала нагрева жидкости НКРТ и до начала испарения НКРТ сравниваются температуры теплоносителей (рис. 4). Если присутствует разница температур меньше 5 °С (Δt_{min}), то НКРТ исключается из анализа.

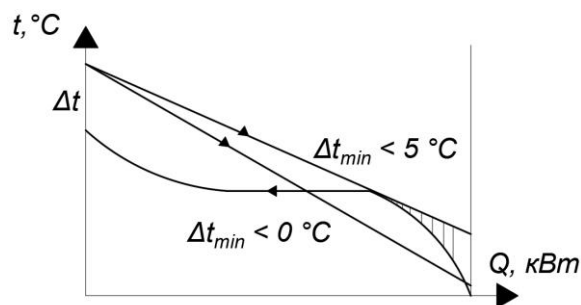


Рис. 3. Принципиальная t, Q -диаграмма испарителя ОЦР с вариантами пересечений линий теплообмена воздуха и НКРТ

С учетом заданных температур НКРТ в конденсаторе и температур воды ВОЦ пересечения потоков теплообмена не будет и для данной схемы проверка теплообмена в конденсаторе выполняется.

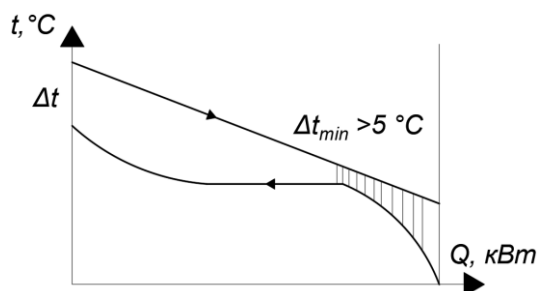


Рис. 4. Принципиальная t, Q -диаграмма испарителя ОЦР с выполненным условием минимальной разницы температур между потоками теплообмена

В области жидкости НКРТ рассчитывается тепловая мощность Q_i для каждого НКРТ, для каждого давления и для каждой из температур в интервале Δt_{\min} с шагом удельной энтальпии НКРТ по линии теплообмена $h_i = 1$ кДж/кг, где $h_i \in [h_4; h_1]$; $h_4; h_1$ – удельные энтальпии НКРТ после сжатия в насосе (на входе в испаритель) и перед расширителем (на выходе из испарителя), кДж/кг. Для каждой полученной Q_i определяется соответствующая температура воздуха в данной точке по линии теплообмена и сравнивается с температурой НКРТ (рис. 5). При этом должны выполняться условия: $\Delta t_{\min} = (t_{\text{и}}^{\text{БЭР}} - t_{\text{и}}) > 5^\circ\text{C}$ и $\Delta t_{\min} = (t_{0i}^{\text{БЭР}} - t_{0i}) > 5^\circ\text{C}$.

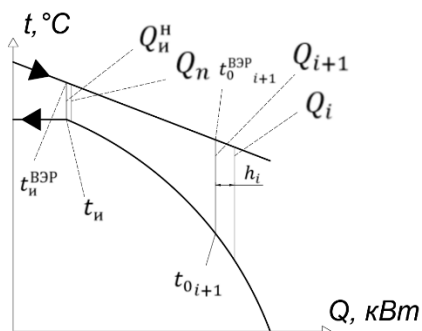


Рис. 5. Схема определения минимальной разницы температур между потоками теплообмена воздуха и рассматриваемых НКРТ в t, Q -диаграмме: t_{0i} – температура НКРТ в области жидкости при соответствующей энтальпии h_i ; $t_{0i+1}^{\text{БЭР}}$ – температура воздуха при соответствующей температуре НКРТ t_{0i+1} и тепловой мощности Q_{i+1} ; $Q_{\text{и}}^{\text{и}}$ – тепловая мощность в испарителе, соответствующая началу испарения НКРТ; $t_{\text{и}}^{\text{БЭР}}$ – температура воздуха в начале испарения НКРТ; $t_{\text{и}}$ – температура начала испарения НКРТ ($t_{\text{кс}}$); i – номер шага определения тепловой мощности по h_i ; n – количество шагов по i .

НКРТ не подходит для использования в ОЦР и далее не рассматривается, если при всех рассматриваемых значениях P_1 и t_1 не выполняется условие $\Delta t_{\min} > 5$.

При этом для подходящих по условиям теплообмена значений P_1 и t_1 определяется

эффективная мощность ОЦР для соответствующего НКРТ. Среди полученного списка значений эффективной мощности ОЦР выбирается максимальное значение этой мощности и соответствующие значения P_1 и t_1 .

Для анализа энергоэффективности агрегата УКЛ-7 используется такой параметр, как коэффициент полезного использования тепловой энергии (КПИ) [26], который определяется по формуле

$$\text{КПИ} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{подв}}} = \frac{Q_{\text{подв}} - Q_{\text{пот}}}{Q_{\text{подв}}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{пол}}$ – полезная тепловая энергия, равная количеству теплоты, используемому для получения полезного продукта, или количеству теплоты полезного продукта, кВт; $Q_{\text{подв}}$ – общее количество теплоты, подведенной к системе, кВт; $Q_{\text{пот}}$ – количество тепловой энергии, выбрасываемой в ОС, кВт.

Для агрегата УКЛ-7 полезной тепловой энергией является: теплота, идущая на производство вторичного пара (51,75 %); теплота, перешедшая в электроэнергию в генераторе газовой турбины (0,126 %); теплота, уходящая с азотной кислотой (1,705 %), так как азотная кислота является целевым продуктом.

Расчет параметров ОЦР проводился по уравнениям термодинамического анализа. Термодинамические свойства веществ определялись через библиотеку CoolProp Wrapper.

Результаты. Зависимость максимальной полезной эффективной мощности ОЦР от изменения температуры перегрева представлена на рис. 6. Параметры ОЦР (давление, КПД, расход, КПИ, температура перегрева Δt_{\min}), соответствующие максимальной мощности ОЦР, для рассматриваемых НКРТ по результатам анализа представлены в табл. 2 в порядке убывания по эффективной мощности ОЦР.

При понижении температуры перегрева НКРТ на выходе из испарителя эффективная мощность ОЦР постепенно возрастает, а затем происходит резкий рост и достигается максимум. С дальнейшим понижением температуры перегрева эффективная мощность ОЦР снова снижается для каждого НКРТ. Среди рассматриваемых НКРТ максимальная эффективная мощность ОЦР достигается при R236fa и составляет 234 кВт с увеличением КПИ УКЛ-7 на 0,5 % и термическим и эффективным КПД 14,57 и 6,6 % соответственно (см. табл. 2). Вторым по максимальному значению мощности является R1234ze(E) с мощностью ОЦР 202 кВт и увеличением КПИ УКЛ-7 на 0,432 % и термическим и эффективным КПД 13 и 5,7 % соответственно, третьим и четвертым – RC318 и R1243zf с мощностью ОЦР 201 и 193 кВт и увеличением КПИ на 0,43 и 0,413 %, с термическим КПД 12,76 и 12,74 % и эффективным КПД 5,67 и 5,45 % соответственно.

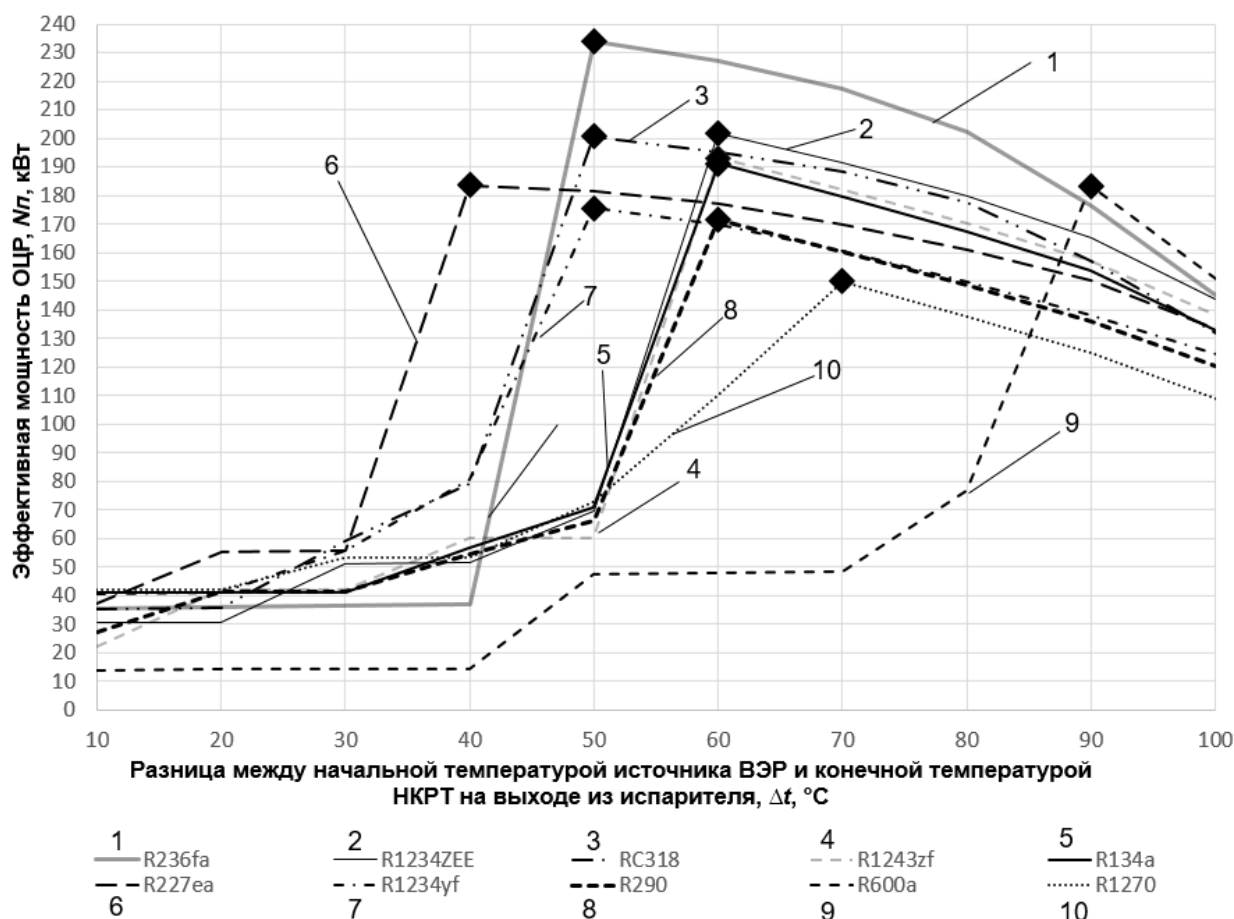


Рис. 6. Зависимость максимальной эффективной мощности ОЦР от разницы температур на выходе из испарителя между начальной температурой ВЭР и НКРТ

Таблица 2. Параметры НКРТ при разнице температур в испарителе, соответствующей максимальной полезной эффективной мощности ОЦР (в порядке убывания)

№	НКРТ	Δt , °C	P_1 , МПа	P_2 , МПа	N_n , кВт	η_t , %	$\eta_{эф}$, %	$G_{нкрт}$, кг/с	$\Delta КПИ$, %
1	R236fa	50	2,9	0,399	234	14,57	6,6	19,2	0,5
2	R1234ze(E)	60	3,135	0,706	202	13	5,7	17,24	0,432
3	RC318	50	2,678	0,451	201	12,76	5,67	22,8	0,43
4	R1243zf	60	3,218	0,818	193	12,74	5,45	15,8	0,413
5	R134a	60	3,759	0,937	191,3	12,68	5,4	16,71	0,41
6	R227ea	40	3,825	0,646	183,6	11,67	5,19	19,5	0,39
7	R1234yf	50	3,282	0,943	175,5	11,69	4,96	17	0,38
8	R290	60	4,051	1,277	171,4	12,33	4,84	8,58	0,37
9	R600a	100	1,129	0,49	150,9	8,55	4,264	9,44	0,323
10	R1270	70	4,155	1,54	149,9	11,2	4,237	9,23	0,32
11	R141b	—	—	—	—	—	—	—	—
12	R601	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание: Δt — разность температуры перегрева НКРТ в испарителе, °C; P_1 — давление НКРТ перед расширителем, МПа; P_2 — давление НКРТ в конденсаторе, МПа; N_n — полезная максимальная эффективная мощность ОЦР, кВт; η_t — термический КПД ОЦР, %; $\eta_{эф}$ — эффективный КПД ОЦР, %; $G_{нкрт}$ — расход НКРТ в ОЦР, кг/с; $\Delta КПИ$ — увеличение КПИ агрегата УКЛ-7, % (см. (1)).

Для остальных НКРТ эффективная мощность еще ниже и минимальное значение принимает при R1270 и составляет 149,9 кВт с увеличением КПИ на 0,32 %, с термическим и эффективным КПД 11,2 и 4,237 % соответственно. При этом для R141b и R601 значения не указаны, так как для данных НКРТ по результатам анализа по предложенной методике проверяемые условия

не выполняются и эти вещества не подходят для использования в ОЦР предлагаемой тепловой схемы утилизации теплоты сжатого воздуха.

Стоит также учитывать экологические характеристики НКРТ. У R236fa ОРП равен 0, однако имеет ПГП за 100 лет 8060, что является показателем сильного влияния на глобальное

потепление (см. табл. 1). Аналогично и для RC318 ПГП за 100 лет имеет высокое значение и равен 10300 при ОРП равном 0. С учетом экологических характеристик НКРТ наиболее предпочтительными из 12 рассматриваемых НКРТ являются НКРТ R1234ze(E) и R1243zf, имеющие значение ПГП за 100 лет <1 , ОРП равное 0 и максимальной эффективной мощности ОЦР 202 и 193 кВт соответственно.

Что касается температур перегрева НКРТ, то для R1234ze(E) и R1243zf максимальная эффективная мощность достигается при разнице температур $\Delta t = 60^\circ\text{C}$, что соответствует температуре в т. 1 (см. рис. 2), равной 114°C . Когда как для R236fa значение Δt составляет 50°C , т.е. температура перед расширителем равна 124°C , что означает более высокую температуру на выходе из теплообменника и требование к более высокой эффективности теплообменника.

На рис. 7 представлена t - Q -диаграмма в испарителе для R1234ze(E) при максимальной эффективной мощности ОЦР. На рис. 8 для наглядности представлена t - s -диаграмма цикла ОЦР тепловой схемы утилизации теплоты сжатого воздуха R1234ze(E).

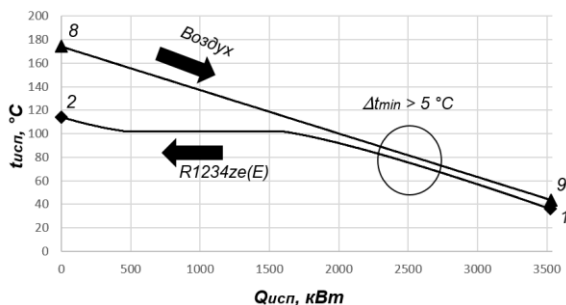


Рис. 7. t - Q -диаграмма теплообмена в испарителе ОЦР для R1234ze(E): $Q_{\text{исп}}$ – тепловая мощность в испарителе, кВт; $t_{\text{исп}}$ – температура в испарителе, $^\circ\text{C}$; 1,2,8,9 – характерные точки процессов (см. рис. 3)

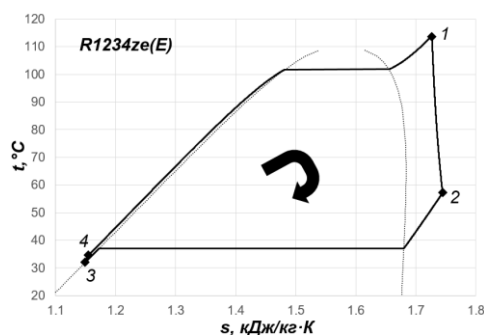


Рис. 8. t - s -диаграмма теплообмена в испарителе ОЦР для R1234ze(E): s – удельная энтропия НКРТ, кДж/кг·К; t – температура в испарителе, $^\circ\text{C}$; 1,2,3,4 – характерные точки процессов в цикле (см. рис. 3)

Анализ полученных данных (рис. 7) показывает, что минимальная разница температур расположена в области жидкости НКРТ. Таким

образом, минимальный температурный напор теплообменника или теплообменников в случае исполнения испарителя ОЦР несколькими теплообменниками для нагрева жидкости НКРТ, испарения и перегрева, будет находиться при нагревании жидкой фазы. Минимальная разница температур в области жидкости НКРТ присутствует и для R236fa, и для R1243zf.

Выводы. Установки, работающие по органическому циклу Ренкина, являются одним из способов утилизации теплоты вторичных энергетических ресурсов среднего и низкого потенциала. В настоящее время происходит стремительное развитие как самих установок, так и методов подбора оптимальной рабочей жидкости для цикла из существующих и созданием подходящих смесей низкокипящих рабочих тел. Также расширяется сфера применения установок – от промышленности до возобновляемой энергетики.

Предложенная тепловая схема утилизации теплоты сжатого воздуха в производстве слабой азотной кислоты в агрегате УКП-7 на основе органического цикла Ренкина имеет наибольшую эффективную мощность 234 кВт при использовании вещества R236fa. Однако данное вещество имеет высокое значение потенциала глобального потепления 8060 за 100 лет, что делает его экологически небезопасным. В связи с этим из 12 рассмотренных веществ предпочтительными с точки зрения потенциала глобального потепления за 100 лет и нулевого озоноразрушающего потенциала являются вещества R1234ze(E) и R1243zf, имеющие потенциал глобального потепления за 100 лет менее 1. Однако мощность цикла при таких веществах ниже и составляет 202 и 193 кВт для R1234ze(E) и R1243zf соответственно. Точка минимальной разницы температур R236fa, R1234ze(E) и R1243zf в испарителе цикла находится в области нагрева жидкости низкокипящего рабочего вещества, что подразумевает низкий температурный напор в этой области теплообмена и требование к ее большей эффективности (эффективности теплообменника) при нагреве НКРТ и, как следствие, большую площадь теплообмена.

Таким образом, использование органического цикла Ренкина является одним из эффективных способов утилизации тепловых вторичных энергетических ресурсов, используемых в промышленности, например в производстве азотной кислоты.

Список литературы

1. Alkotami A. Thermodynamic Performance Analysis and Design of an Organic Rankine Cycle (ORC) Driven by Solar Energy for Power Generation // Sustainability. – 2025. – Vol. 17, issue 13. – P. 5742. <https://doi.org/10.3390/su17135742>
2. Thermodynamic, economic, and environmental evaluation of internal combustion engine exhaust gas-

driven Organic Rankine cycles for power generation and desalination / Mohammad Waqas Chandio, Laveet Kumar, Abdul Ghafoor Memon, Mohamed M. Awad // International Journal of Thermofluids. – 2025. – Vol. 25. – P. 101046. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101046>

3. **Das Mainak, Reddy K.S.** Modelling and optimization of combined supercritical carbon dioxide Brayton cycle and organic Rankine cycle for electricity and hydrogen production // Applied Energy. – 2025. – Vol. 377, Part C. – P. 124586. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124586>.

4. **Thermodynamic** analysis of a cascade organic Rankine cycle power generation system driven by hybrid geothermal energy and liquefied natural gas / Z. Pan, Y. Fu, H. Chen, Y. Song // Front. Energy Res. – 2024. – Vol. 12. – P. 1474714. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1474714.

5. **Optimization** and exergy analysis of a cascade organic Rankine cycle integrated with liquefied natural gas regasification process / M. Fakhrazadeh, N. Tahouni, M. Abbasi, M.H. Panjeshahi // International Journal of Refrigeration. – 2023. – Vol. 156. – P. 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.10.004>.

6. **Bellos E.** A review of organic Rankine cycles with partial evaporation and dual-phase expansion // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2024. – Vol. 72. – P. 104059. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104059>.

7. **Experimental** assessment of an Organic Rankine Cycle with a partially evaporated working fluid / F. Dawo, J. Buhr, Ch. Schiffelechner, et al. // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 221. – P. 119858. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119858>.

8. **Разработка** комплексной энергетической установки с рекуперацией теплоты уходящих газов / Б. Бу Дакка, И.А. Султангузин, Ю.В. Яворовский, С.Ю. Курзанов // Вестник МЭИ. – 2025. – № 1. – С. 100–109. DOI: 10.24160/1993-6982-2025-1-100-109.

9. **Matuszewska D.** Economic Analysis of Gas Turbine Using to Increase Efficiency of the Organic Rankine Cycle // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 75. <https://doi.org/10.3390/su16010075>

10. **Comparative** study of two novel composition adjustable organic Rankine cycle-vapor compression refrigeration systems / X. Xia, H. Zhang, Z. Wang, et al. // Thermal Science and Engineering Progress. – 2025. – Vol. 57. – P. 103179. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103179>.

11. **Witanowski, Ł.** Optimization of an Organic Rankine Cycle-Vapor Compression Cycle System for Electricity and Cooling Production from Low-Grade Waste Heat // Energies. – 2024. – Vol. 17. – P. 5566. <https://doi.org/10.3390/en17225566>.

12. **Gonidakis D., Bellos E., Kaldellis J.K.** Design and Dynamic Simulation of a Solar-Driven Organic Rankine Cycle with Zeotropic Mixture. Sol. // Energy. – 2025. – Vol. 301. – P. 113948.

13. **Performance** and economic analyses of organic rankine cycle integrated with parabolic trough solar collector using multiple dry working fluids / M.S. Arif, L. Kumar, M.W. Chandio, et al. // Environ Prog Sustainable Energy. – 2025. – Vol. 44(6). – P. e70079. DOI:10.1002/ep.70079

14. **Shalby M., Marachli A., Salah A.** Working fluid selection and performance analysis for subcritical organic Rankine cycles // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 25. – P. 104120. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104120>.

15. **Operational** flexibility-oriented selection of working fluid for organic Rankine cycles via Bayesian optimization / J. Wang, Y. Zhang, C. Mei, L. Zhu // Computers & Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 197. – P. 109043. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2025.109043>.

16. **Bellos E.** A detailed analysis of waste heat recovery organic Rankine cycle with partial evaporation and different working fluids // Applied Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 263. – P. 125410. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125410>.

17. **Study** and application of the shift-temperature of heating fluid for zeotropic mixtures in organic Rankine cycle / S. Bu, X. Yang, W. Li, et al. // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2023. – Vol. 145, Part A. – P. 106808. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106808>.

18. **Mohan S., Dinesha P., Campana Pietro Elia.** ANN-PSO aided selection of hydrocarbons as working fluid for low-temperature organic Rankine cycle and thermodynamic evaluation of optimal working fluid // Energy. – 2022. – Vol. 259. – P. 124968. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124968>.

19. **Javed S., Tiwari A.K.** Performance analysis of zeotropic mixture as a working fluid for medium temperature in regenerative Organic Rankine cycle // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – Vol. 179. – P. 864–872. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.09.043>.

20. **Parametric** analysis and thermal-economical optimization of a parallel dual pressure evaporation and two stage regenerative organic Rankine cycle using mixture working fluids / Yongqiang Feng, Yu Wang, Lin Yao, et al. // Energy. – 2023. – Vol. 263, Part A. – P. 125670. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125670>.

21. **Development** of selection criteria of zeotropic mixtures as working fluids for the trans-critical organic Rankine cycle / Z. Miao, Z. Wang, P. Sabevarbanov, et al. // Energy. – 2023. – Vol. 278, Part A. – P. 127811. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127811>.

22. **On the CAMD** method based on PC-SAFT for working fluid design of a high-temperature organic Rankine cycle / E. Wang, J. Mao, B. Zhang, Y. Wang // Energy. – 2023. – Vol. 263, Part D. – P. 125935. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125935>.

23. **Working** fluid and system optimisation of organic Rankine cycles via computer-aided molecular design: A review / C.N. Markides, A. Bardow, M. De Paepe, et al. // Progress in Energy and Combustion Science. – 2025. – Vol. 107. – P. 101201. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2024.101201>

24. **Овсянник А.В., Ключинский В.П.** Выбор, расчет и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 1. – С. 76–88. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-76-88>.

25. **Bekiloğlu H.E., Bedir H., Anlaş G.** Optimal selection of Organic Rankine cycle working fluids and geometric parameters of Condensers // Applied Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 280, Part 2. – P. 128242. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128242>.

26. **Маленков А.С.** Разработка перспективной системы теплохладоснабжения на основе абсорбционных трансформаторов теплоты: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. – М., 2018. – 188 с.

References

1. Alkotami, A. Thermodynamic Performance Analysis and Design of an Organic Rankine Cycle (ORC) Driven by Solar Energy for Power Generation. *Sustainability*, 2025, vol. 17, issue 13, p. 5742. <https://doi.org/10.3390/su17135742>

2. Chandio, M.W., Kumar, L., Memon, A.G., Awad, M.M. Thermodynamic, economic, and environmental evaluation of internal combustion engine exhaust gas-driven Organic Rankine cycles for power generation and desalination.

International Journal of Thermofluids, 2025, vol. 25, p. 101046. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101046>

3. Das, M., Reddy, K.S. Modelling and optimization of combined supercritical carbon dioxide Brayton cycle and organic Rankine cycle for electricity and hydrogen production. *Applied Energy*, 2025, vol. 377, part C, p. 124586. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124586>.

4. Pan, Z., Fu, Y., Chen, H., Song, Y. Thermodynamic analysis of a cascade organic Rankine cycle power generation system driven by hybrid geothermal energy and liquefied natural gas. *Front. Energy Res*, 2024, vol. 12, p. 1474714. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1474714.

5. Fakhrazadeh, M., Tahouni, N., Abbasi, M., Panjeshahi, M.H. Optimization and exergy analysis of a cascade organic Rankine cycle integrated with liquefied natural gas regasification process. *International Journal of Refrigeration*, 2023, vol. 156, pp. 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.10.004>.

6. Bellos, E. A review of organic Rankine cycles with partial evaporation and dual-phase expansion. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2024, vol. 72, p. 104059. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104059>.

7. Dawo, F., Buhr, J., Schiffechner, Ch., Wieland, Ch., Spliethoff, H. Experimental assessment of an Organic Rankine Cycle with a partially evaporated working fluid. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 221, p. 119858. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119858>.

8. Bu Dukka, B., Sultanguzin, I.A., Yavorovskiy, Yu.V., Kurzanov, S.Yu. Razrabotka kompleksnoy energeticheskoy ustanovki s rekuperatsiyey teploty ukhodyashchikh gazov [Development of an Integrated Power Plant with Exhaust Gas Heat Recovery]. *Vestnik MEI*, 2025, no. 1, pp. 100–109. DOI: 10.24160/1993-6982-2025-1-100-109.

9. Matuszewska, D. Economic Analysis of Gas Turbine Using to Increase Efficiency of the Organic Rankine Cycle. *Sustainability*, 2024, vol. 16, p. 75. <https://doi.org/10.3390/su16010075>.

10. Xia, X., Zhang, H., Wang, Z., Sun, T., Yang, C., Bo peng, Jiang, T. Comparative study of two novel composition adjustable organic Rankine cycle-vapor compression refrigeration systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, vol. 57, p. 103179. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103179>.

11. Witanowski, Ł. Optimization of an Organic Rankine Cycle–Vapor Compression Cycle System for Electricity and Cooling Production from Low-Grade Waste Heat. *Energies*, 2024, vol. 17, p. 5566. <https://doi.org/10.3390/en17225566>

12. Gonidaki, D., Bellos, E., Kaldellis, J.K. Design and Dynamic Simulation of a Solar-Driven Organic Rankine Cycle with Zeotropic Mixture. *Sol. Energy*, 2025, vol. 301, p. 113948.

13. Arif, M.S., Kumar, L., Chandio, M.W., Raza, M.A., Harijan, K. Performance and economic analyses of organic Rankine cycle integrated with parabolic trough solar collector using multiple dry working fluids. *Environ Prog Sustainable Energy*, 2025, vol. 44(6), p. e70079. DOI:10.1002/ep.70079

14. Shalby, M., Marachli, A., Salah, A. Working fluid selection and performance analysis for subcritical organic Rankine cycles. *Results in Engineering*, 2025, vol. 25, p. 104120. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104120>.

15. Wang, J., Zhang, Y., Mei, C., Zhu, L. Operational flexibility-oriented selection of working fluid for or-

ganic Rankine cycles via Bayesian optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 2025, vol. 197, p. 109043. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2025.109043>.

16. Bellos, E. A detailed analysis of waste heat recovery organic Rankine cycle with partial evaporation and different working fluids. *Applied Thermal Engineering*, 2025, vol. 263, p. 125410. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125410>.

17. Bu, S., Yang, X., Li, W., Su, C., Wang, X., Liu, X., Yu, N., Wang, G., Tang, J. Study and application of the shift-temperature of heating fluid for zeotropic mixtures in organic Rankine cycle. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 145, part A, p. 106808. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106808>.

18. Mohan, S., Dinesha, P., Campana, P.E. ANN-PSO aided selection of hydrocarbons as working fluid for low-temperature organic Rankine cycle and thermodynamic evaluation of optimal working fluid. *Energy*, 2022, vol. 259, p. 124968. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124968>.

19. Javed, S., Tiwari, A.K. Performance analysis of zeotropic mixture as a working fluid for medium temperature in regenerative Organic Rankine cycle. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 179, pp. 864–872. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.09.043>.

20. Feng, Y., Wang, Y., Yao, L., Xu, Jing-wei, Zhang, Fei-yang, He, Zhi-xia, Wang, Q., Ma, Jian-long. Parametric analysis and thermal-economical optimization of a parallel dual pressure evaporation and two stage regenerative organic Rankine cycle using mixture working fluids. *Energy*, 2023, vol. 263, part A, p. 125670. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125670>.

21. Miao, Z., Wang, Z., Sabev Varbanov, P., Klemeš, J.J., Xu, J. Development of selection criteria of zeotropic mixtures as working fluids for the transcritical organic Rankine cycle. *Energy*, 2023, vol. 278, part A, p. 127811. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127811>.

22. Wang, E., Mao, J., Zhang, B., Wang, Y. On the CAMD method based on PC-SAFT for working fluid design of a high-temperature organic Rankine cycle. *Energy*, 2023, vol. 263, part D, p. 125935. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125935>.

23. Markides, C.N., Bardow, A., De Paepe, M., De Servi, C., Gross, J., Haslam, A.J., Lecompte, S., Papadopoulos, A.I., Oyewunmi, C.O. Working fluid and system optimisation of organic Rankine cycles via computeraided molecular design: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2025, vol. 107, p. 101201. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2024.101201>.

24. Ovsyannik, A.V., Klyuchinskiy, V.P. Vybor, raschet i termodinamicheskiy analiz turbostanovok na organicheskom tsikle Renkina [Selection, Calculation and Thermodynamic Analysis of Turbine Units Based on the Organic Rankine Cycle]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG*, 2022, vol. 65, no. 1, pp. 76–88. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-76-88>.

25. Bekiloğlu, H.E., Bedir, H., Anlaş, G. Optimal selection of Organic Rankine cycle working fluids and geometric parameters of Condensers. *Applied Thermal Engineering*, 2025, vol. 280, part 2, p. 128242. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128242>.

26. Malenkov, A.S. Razrabotka perspektivnoy sistemy teplokhodosnabzheniya na osnove absorbtionnykh transformatorov teploty: diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of a promising heat and cold supply system based on absorption heat transformers. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2018. 188 p.

УДК 621.039.534.6:536.24

Василий Валентинович Глазков

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной теплофизики, Россия, Москва, e-mail: VVGlazkov@gmail.com

Артем Михайлович Зотов

АО «НИКИЭТ», инженер-конструктор 1 категории, отдел исследовательских и изотопных реакторов, Россия, Москва, e-mail: zotov@nikiet.ru

Илья Александрович Зубрицкий

АО «НИКИЭТ», инженер 2 категории, отдел компьютерных и интегрированных систем, Россия, Москва, e-mail: ilya220101listru@mail.ru

Концепция использования теплового аккумулятора для исследовательской ядерной установки МБИР

Авторское резюме

Состояние вопроса. Атомная энергетика сталкивается с проблемой низкой маневренности энергетических установок, что затрудняет адаптацию к изменяющимся режимам энергопотребления. Существует необходимость разработки технических решений, позволяющих повысить гибкость атомных электростанций без существенных конструктивных изменений реакторных установок. Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является внедрение систем теплового аккумулирования, которые позволяют накапливать избыточную энергию в периоды низкого потребления и использовать ее в часы пиковых нагрузок.

Материалы и методы. Исследование проведено на базе исследовательской ядерной установки МБИР, а также на материале опубликованных статей о тепловом аккумулировании. Использованы методы анализа существующих схем теплового аккумулирования на атомных электростанциях, методы моделирования и выбора режимов работы теплового аккумулятора. Рассмотрен вариант конструктивной реализации теплового аккумулятора с использованием четырех насосов теплового аккумулятора и двухбакового накопителя теплоносителя.

Результаты. Разработана концепция использования двухбакового теплового аккумулятора с нитратно-нитритным солевым теплоносителем для исследовательской ядерной установки МБИР, включающая три режима работы: зарядка, разрядка и номинальный режим. Выбор теплоносителя обоснован его высокой по сравнению с натрием теплоемкостью и, что критически важно, повышенной безопасностью при возможном контакте с водой, что снижает риски при интеграции с пароводяным контуром. Предложена конструкция теплового аккумулятора, состоящая из бака-разрядки, бака-зарядки, четырех насосов теплового аккумулятора и запорной арматуры.

Выводы. Предложенная концепция теплового аккумулятора для исследовательской ядерной установки МБИР обеспечивает более эффективное использование тепловой энергии реактора, позволяет работать турбине в полупиковом режиме и может быть адаптирована для использования на отраслевых атомных электростанциях. Применение теплового аккумулятора создает возможность резервирования энергии и повышения маневренности энергетической установки. Предложенная концепция может быть применена в дальнейшем и для отраслевых АЭС.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор, исследовательская ядерная установка МБИР, энергетическая эффективность, режимы работы теплового аккумулятора, солевые теплоносители, накопление энергии, атомная энергетика

Vasily Valentinovich Glazkov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Engineering Thermal Physics Department, Russia, Moscow, e-mail: VVGlazkov@gmail.com

Artem Mikhailovich Zotov

JSC "NIKIET", Design Engineer of 1st category, Research and Isotope Reactors Department, Russia, Moscow, e-mail: zotov@nikiet.ru

Ilya Aleksandrovich Zubritsky

JSC "NIKIET", Design Engineer of 2nd category, Computer and Integrated Systems Department, Russia, Moscow, e-mail: ilya220101listru@mail.ru

Concept of using a heat accumulator for MBIR research reactor

Abstract

Background. Nuclear power engineering faces the problem of low maneuverability of power plants, which makes it difficult to adapt to changing energy consumption modes. There is a need to develop technical solutions that increase the flexibility of nuclear power plants without significant design changes to reactor plants. One of the promising areas to solve this

problem is the introduction of heat storage systems that allow us to accumulate excess energy during periods of low consumption and use it during peak load hours.

Materials and methods. The study has been conducted using MBIR research reactor, as well as the material of published articles on heat accumulation. The authors have used the methods to analyze existing schemes of thermal accumulation for nuclear power plants, as well as methods to model and select operating modes of heat accumulator. A design option for implementation of a heat accumulator using four circulation pumps and a two-tank coolant storage tank has been considered.

Results. A concept for using a two-tank heat accumulator with a nitrate-nitrite salt coolant for the MBIR nuclear research reactor has been developed. This concept includes three operating modes: charging, discharging, and nominal condition. The choice of coolant is justified by its high heat capacity compared to sodium and, crucially, increased safety in case of possible contact with water, which reduces the risks during integration with the steam-water circuit. The proposed heat accumulator design consists of a discharge tank, a charging tank, four heat accumulator pumps (HAPs), and shutoff valves.

Conclusions. The proposed concept of a heat accumulator for the MBIR research reactor ensures more efficient use of the reactor thermal energy, allows the turbine to operate in a semi-peak mode, and can be adapted for use at industry-based nuclear power plants. The use of a heat accumulator offers an opportunity for energy storage and increased maneuverability of the power plant. The proposed concept can be applied in the future for industry-based nuclear power plants.

Key words: heat accumulator, MBIR research reactor, energy efficiency, operating modes of heat accumulator, coolant-salt, energy storage, nuclear power

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.040-048

Введение. Одной из актуальных задач современной атомной энергетики является повышение эффективности использования энергетических ресурсов [1]. Согласно прогнозу развития атомной энергетики, доля атомной энергии в мировом энергопотреблении увеличится с 5 до 7 %, а также в производстве электроэнергии – с 10,5 до 11–11,4 % [2]. В этой связи для развития энергетического потенциала атомной отрасли одной из важных задач является повышение эффективности использования энергии.

Особую проблему для атомной энергетики представляет необходимость обеспечения соответствия производства энергии изменяющемуся режиму потребления [3]. В отличие от традиционных тепловых электростанций, атомные электростанции характеризуются низкой маневренностью регулирования мощности, что существенно затрудняет их работу в условиях неравномерной нагрузки. При этом мощность энергоустановок должна быть рассчитана на максимально возможную нагрузку, что приводит к неполному использованию установленных мощностей в периоды пониженного энергопотребления [4].

Увеличение доли АЭС в общем производстве электроэнергии при одновременном сокращении доли ТЭС, традиционно привлекаемых к работе в переменной части графика нагрузок сети, ставит вопрос о необходимости привлечения АЭС к регулированию мощности электросети – увеличению генерации в дневное время и снижению в ночное [5]. Однако существуют два ключевых фактора, делающих привлечение АЭС к работе в переменных режимах экономически нецелесообразным: 1) более высокая капитальная составляющая стоимости производимой электроэнергии по сравнению с ТЭС; 2) низкие маневренные характеристики активных зон реакторов [2].

Хотя разработка специализированных высокоманевренных АЭС, допускающих изменение мощности энергоблока в широком диапазоне,

технически возможна, такой подход требует значительных затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, что существенно повышает стоимость проектов.

Одним из перспективных решений данной проблемы является внедрение систем аккумулярования тепловой энергии [6]. Тепловые аккумуляторы позволяют накапливать избыточную энергию в периоды низкого потребления и использовать ее в часы пиковых нагрузок, что обеспечивает более равномерную загрузку основного оборудования АЭС. Такие системы способствуют повышению гибкости и надежности работы атомных электростанций, а также позволяют оптимизировать режимы их эксплуатации без снижения уровня безопасности.

Включение тепловых аккумуляторов в состав АЭС дает возможность регулирования режима работы энергетических установок без жесткой зависимости от режима потребления энергии, позволяя срезать пики графика нагрузки и заполнять провалы. Это особенно актуально в условиях развития распределенной генерации и увеличения доли возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе, что создает дополнительные вызовы для обеспечения стабильности энергосистемы [5].

С точки зрения регулирования мощности энергосистемы существует несколько подходов. Первый предполагает сохранение за АЭС постоянной части графика нагрузок, при котором покрытие переменной части возлагается на специализированные маневренные газотурбинные, парогазовые или гидроаккумулирующие станции. Однако проведенные Всероссийским научно-исследовательским институтом атомных электростанций (ВНИИАЭС) исследования технико-экономической эффективности различных решений показали, что наиболее экономичным решением является именно аккумулярование тепловой энергии непосредственно на АЭС [5]. Этот подход позволяет реакторной установке

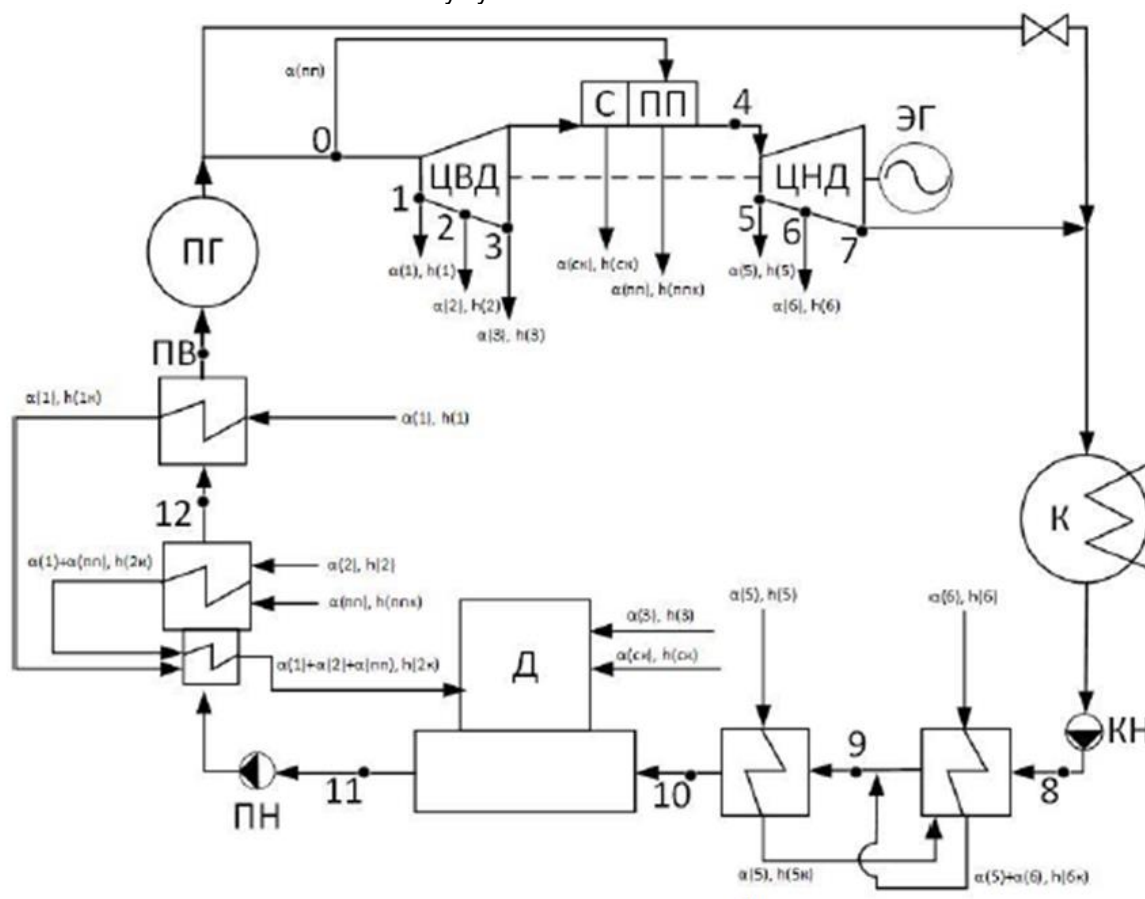
Объектом исследования является опыт реализации тепловых аккумуляторов на энергетических объектах.

Методы исследования. В ряде работ [7–9] рассмотрены различные способы реализации использования тепловых аккумуляторов на АЭС.

тора для АЭС малой мощности. Принципиальная тепловая схема турбоустановки АЭС малой мощности представлена на рис. 1. Для теплового аккумулятора используется тепловое аккумулирование посредством использования теплоты фазового перехода.

В [7] рассмотрены два варианта использования аккумулятора теплоты с фазовым переходом в схеме АЭС малой мощности: вариант 1 – параллельно подогревателю высокого давления (ПВД1); вариант 2 – для генерации дополнительного пара в цилиндр низкого давления (ЦНД).

Принципиальные тепловые схемы турбоустановки с аккумуляторами теплоты представлены на рис. 2, 3.



42

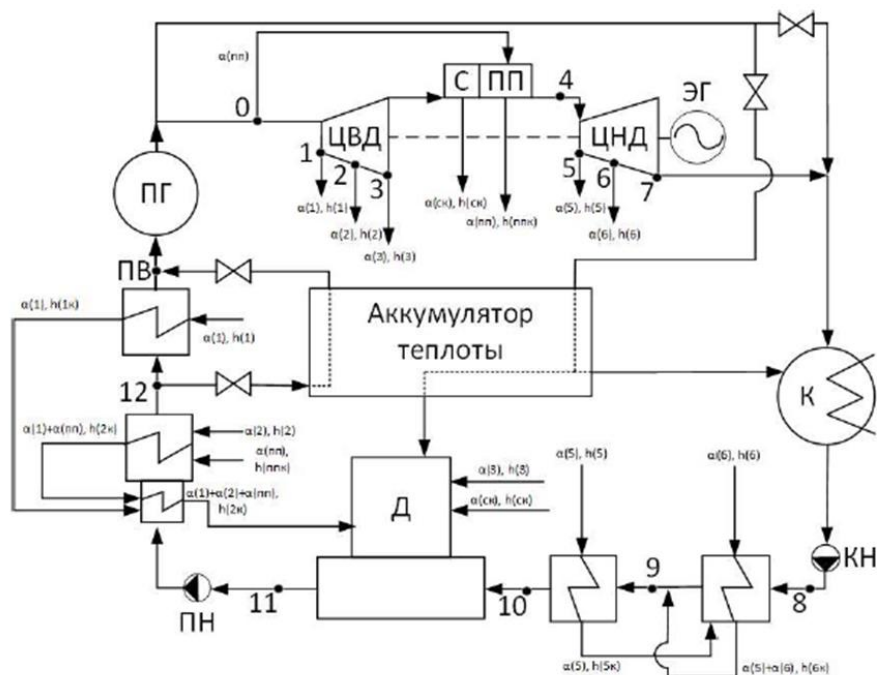


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема турбоустановки АЭС малой мощности с ВВЭР с аккумулятором теплоты (вариант 1)

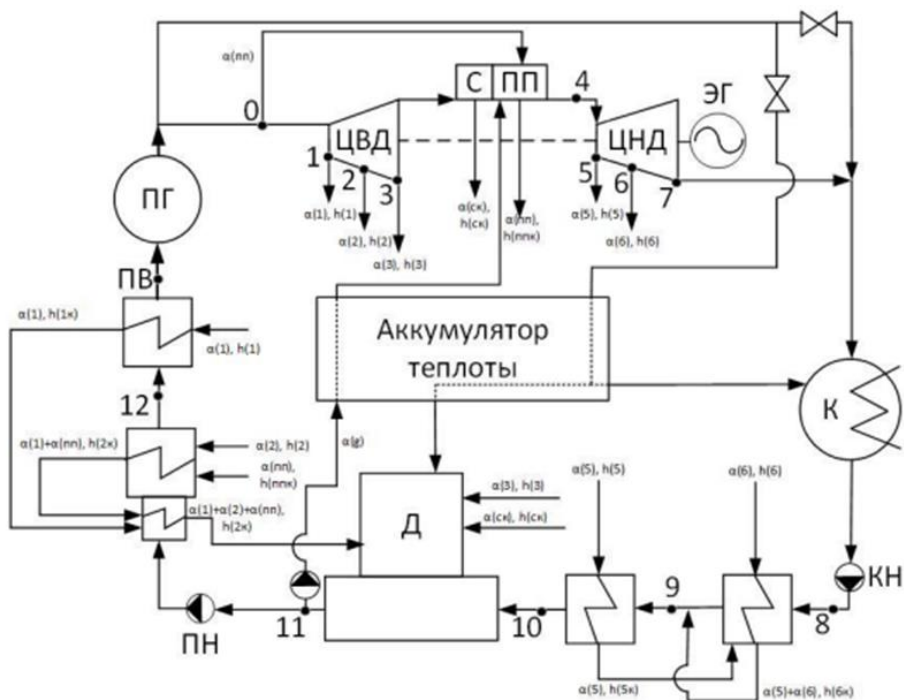


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема турбоустановки АЭС малой мощности с ВВЭР с аккумулятором теплоты (вариант 2)

Анализ показателей эффективности показывает: для варианта 1 характерно увеличение мощности турбоустановки на 7,2 %, дополнительная выработка составляет 0,63 МДж/кг сбросного пара; для варианта 2 увеличение мощности турбоустановки составляет 6,6 %, при этом дополнительная выработка составляет 0,40 МДж/кг сбросного пара.

Более высокая эффективность варианта 1 обусловлена более широким диапазоном увеличения расхода пара: в варианте 1 увеличивается

расход пара в ЦНД и ЦВД, при этом в варианте 2 – только в ЦНД.

Кроме того, вариант 1 имеет следующие конструктивные преимущества:

- более простая конструкция аккумулятора;
- отсутствие необходимости в дополнительном насосе;
- отсутствие потребности в сепараторе и испарительной части.

Таким образом, вариант 1 технически проще и энергетически эффективнее.

В [9] для АЭС с ВВЭР-1000 предложен проект схемы теплового аккумулирования. В этом проекте для теплового аккумулирования использованы хемотермические циклы и установки.

Высокотемпературные хемотермические системы (ХТС) накопления и передачи энергии

рассматриваются как один из перспективных методов аккумулирования энергии. Данные системы основаны на процессах паровой конверсии метана.

Схема АЭС с аккумулятором питательной воды (АПВ) низкого давления представлена на рис. 4.

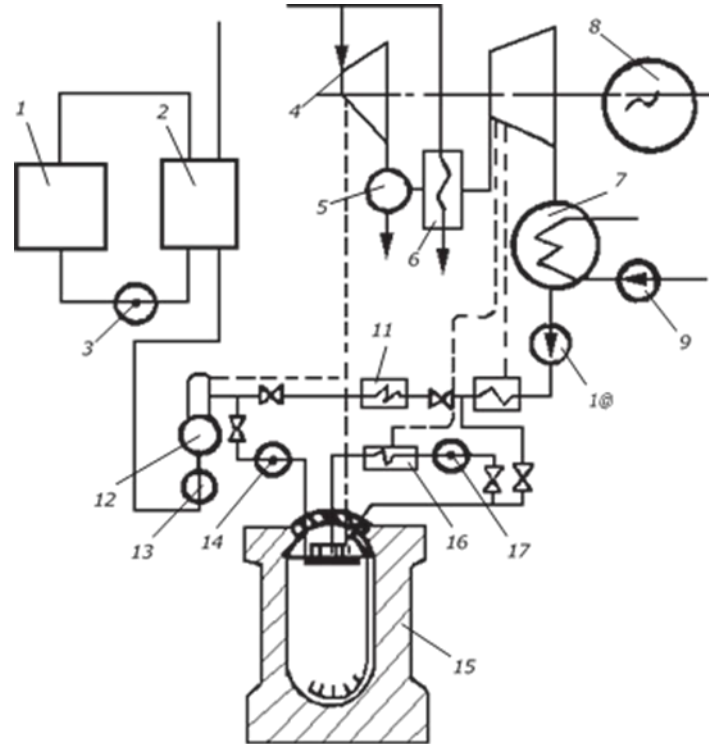


Рис. 4. Схема АЭС с АПВ низкого давления: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – главный циркуляционный насос реактора; 4 – паровая турбина; 5 – сепаратор; 6 – пароперегреватель; 7 – конденсатор; 8 – электронагреватель; 9 – циркуляционный насос системы охлаждения конденсатора; 10 – конденсатный насос; 11 – регенеративные подогреватели основного контура; 12 – деаэрактор; 13 – питательный насос; 14 – насос подачи горячей воды из АПВ в линию питательной воды; 15 – АПВ; 16 – регенеративные подогреватели пикового контура; 17 – циркуляционный насос АПВ

Принцип работы высокотемпературной ХТС следующий:

1. В период провала электрической нагрузки тепло от АЭС, которое в обычном режиме сбрасывается, используется для паровой конверсии метана. При этом метан взаимодействует с водяным паром с образованием синтез-газа, состоящего из водорода и оксида углерода.

2. Синтез-газ аккумулируется и хранится под давлением.

3. В период пиковых нагрузок синтез-газ подается в турбину, где происходит его расширение с выработкой электроэнергии.

Результаты исследования. На основе описанных решений использования тепловых аккумуляторов для АЭС предложена концепция использования теплового аккумулятора для ИЯУ МБИР.

Тепловой аккумулятор предлагается использовать в качестве составной части ИЯУ МБИР. Концепция использования теплового аккумулятора для ИЯУ МБИР определяется спецификой установки МБИР.

Основное назначение ИЯУ МБИР – обеспечение выполнения широкого спектра исследовательских и экспериментальных работ с использованием реакторного излучения, а также выработка электроэнергии [10].

Установка МБИР состоит из двух независимых петель, каждая из которых содержит трубопроводы и оборудование первого, второго и третьего контуров и контура САОТ, а также оборудование и трубопроводы вспомогательных систем. В первом и втором контурах, контуре САОТ в качестве теплоносителя используется натрий, третий контур – пароводяной [11].

Первый контур МБИР предназначен для отвода тепла с помощью натриевого теплоносителя от активной зоны (а.з.) реактора и передачи этого тепла в промежуточных теплообменниках (ПТО) второму контуру. Две симметричные петли, подключенные к корпусу реактора, отводят примерно по 50 % мощности. В каждой петле реакторной установки (РУ) содержится однотипный набор оборудования: ПТО, аварийный теплообменник (АТО), ГЦН-1, арматура и трубопроводы первого контура.

Второй контур предназначен для отвода тепла от первого контура и передачи его теплоносителю третьего контура в парогенераторах. Второй контур является дополнительным защитным барьером между радиоактивным натрием первого контура и пароводяным контуром турбины.

Третий контур обеспечивает выработку пара парогенератором и подачу его на турбоустановку. В проекте применена паровая турбина с электрогенератором.

В состав третьего контура входят: обратный парогенератор (ОПГ); паровая турбина; деаэрационная установка; конденсатор; трубопроводы пара и питательной воды с арматурой; трубопроводы конденсата, масла; подогреватели высокого давления (ПВД) и низкого давления (ПНД); трубопроводы и арматура [12].

Турбоагрегат является основным элементом третьего контура системы теплофикационной паротурбиной установки с вспомогательным оборудованием на ИЯУ МБИР. Принципиальная тепловая схема турбоагрегата приведена на рис. 5.

В состав паротурбинной установки входят: паровая турбина с системами регулирования и

смазки; конденсатор; трубопроводы турбоустановки с опорами и подвесками; система регенерации [13].

Для повышения эффективности использования электроэнергии, полученной от турбины, для ИЯУ МБИР предлагается следующая конструкция теплового аккумулятора.

Конструкция теплового аккумулятора состоит: из бака-разрядки, бака-зарядки, четырех насосов НТА, запорной арматуры на напоре и всасе насосов НТА. Схема конструкции теплового аккумулятора (ТА) для ИЯУ МБИР представлена на рис. 6.

На основе анализа существующих решений использования ТА для АЭС предложена концепция применения двухбакового аккумулятора с жидким теплоносителем для ИЯУ МБИР.

Принцип работы, способ аккумулирования и выбор теплоносителя. В основе предлагаемой концепции лежит аккумулирование явной теплоты (sensible heat storage) путем изменения температуры и объема жидкого теплоносителя. В качестве аккумулирующей среды в контуре теплового аккумулятора предлагается использовать нитратно-нитритную соль (например, $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_2$).

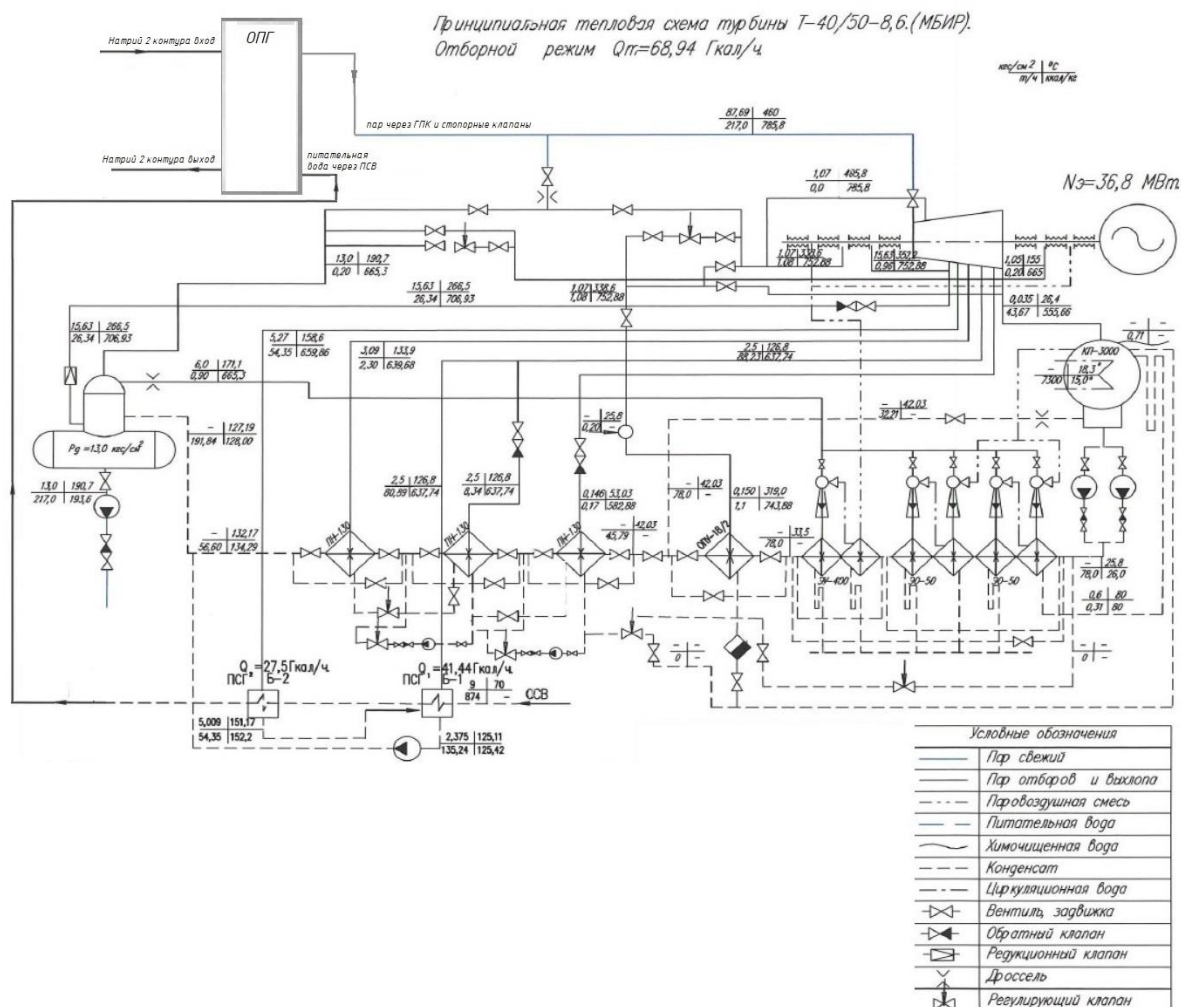


Рис. 5. Принципиальная тепловая схема турбоагрегата для ИЯУ МБИР

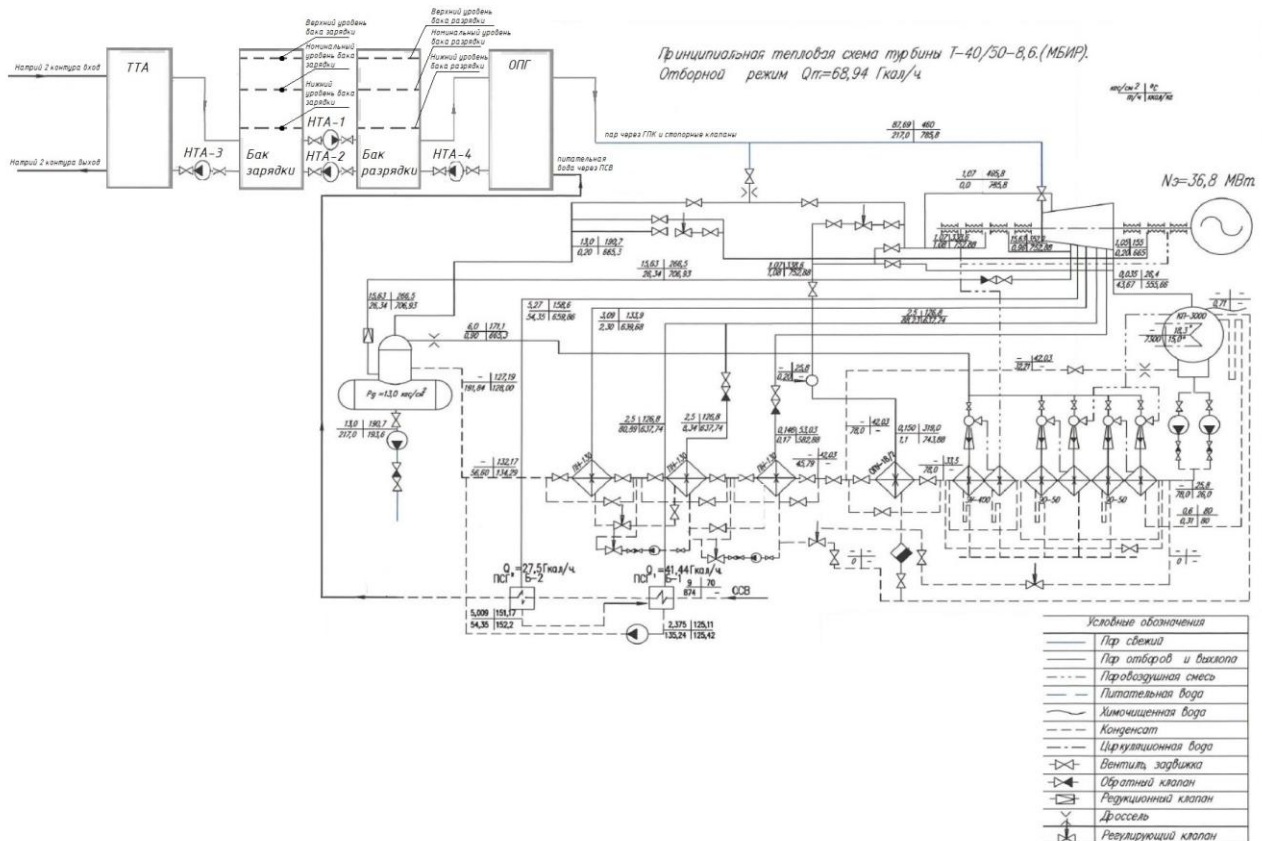


Рис. 6. Схема конструкции теплового аккумулятора для ИЯУ МБИР: ТТА – теплообменник теплового аккумулятора; HTA-1,2,3,4 – насос теплового аккумулятора 1,2,3,4

Выбор данного теплоносителя обусловлен следующими ключевыми характеристиками:

1) повышенной безопасностью. В отличие от натрия второго контура, нитратно-нитритные соли не вступают в интенсивную экзотермическую реакцию с водой или водяным паром. Это критически важно для исключения рисков при возможных взаимных протечках между контуром ТА и соседним пароводящим третьим контуром, что существенно повышает общую безопасность установки;

2) высокой теплоемкостью и возможностью работать в широком диапазоне температур (до 600°C), что обеспечивает высокую плотность аккумулируемой энергии и эффективную интеграцию с параметрами теплоносителя второго контура МБИР.

Ключевым элементом интеграции является теплообменник ТТА, который устанавливается в разрыв второго контура МБИР между ПТО и штатным парогенератором. Таким образом, контур ТА подключается последовательно между вторым и третьим контуром, становясь промежуточным звеном в цепи передачи тепла от реактора к пароводящему контуру турбины.

Принципиальная схема включения и работы предлагаемого ТА заключается в следующем (рис. 6):

1) натрий второго контура, нагретый в ПТО, поступает не напрямую в парогенератор, а

сначала в теплообменник ТТА контура теплового аккумулятора;

2) в теплообменнике ТТА тепло от натрия передается солевому теплоносителю контура ТА;

3) далее частично охлажденный натрий поступает в штатный парогенератор, где отдает оставшееся тепло пароводящему третьему контуру.

Подобная схема включения является целесообразной и реализуемой в силу следующих причин:

1) позволяет аккумулировать тепло напрямую от основного теплоносителя второго контура, не создавая параллельных потоков и не изменяя принципиальную тепловую схему парогенерации;

2) контур ТА выполняет функцию буферной (демпфирующей) системы, регулируя тепловую нагрузку на парогенератор;

3) наличие запорной арматуры позволяет в случае необходимости байпасировать (закольцевать) контур ТА, обеспечивая работу установки по исходной схеме.

Реализацию данного принципа обеспечивает детализация работы схемы и управление насосами:

1. *Режим зарядки.* Расход насоса HTA-4 увеличивается до $1,25 N_{ном}$, что обеспечивает усиленную подачу солевого теплоносителя через теплообменник ТТА и его нагрев. Одновременно расход насоса HTA-3 уменьшается до

0,75 $N_{\text{ном}}$, создавая разрежение в линии бака-зарядки и инициируя переток в него охлажденной соли. Тем самым в баке-зарядке устанавливается нижний уровень теплоносителя, а в баке-разрядке – верхний уровень. По достижении верхнего уровня в баке-разрядке, что сигнализирует о завершении цикла зарядки, расходы насосов НТА-3 и НТА-4 возвращаются к значениям, соответствующим мощности работы турбины в периоды низкого потребления. Расходы насосов НТА-1 и НТА-2 при этом поддерживаются в соответствии с заданной постоянной мощностью реактора.

2. Режим разрядки. Расход насоса НТА-3 увеличивается до 1,25 $N_{\text{ном}}$, обеспечивая подачу накопленной горячей соли из бака-разрядки в теплообменник ТТА. Расход насоса НТА-4 уменьшается до 0,75 $N_{\text{ном}}$, направляя охлажденную соль после отдачи тепла в бак-зарядки. Уровень в баке-разрядке понижается, а в баке-зарядке повышается. По достижении верхнего уровня в баке-зарядке (нижнего в баке-разрядке) расходы насосов НТА-3 и НТА-4 корректируются для поддержания мощности турбины в пиковом режиме.

3. Номинальный режим. Уровень солевого теплоносителя в обоих баках поддерживается на среднем номинальном уровне. Расходы всех насосов НТА-1,2,3,4 поддерживаются на номинальном уровне, обеспечивая стационарную работу установок без аккумуляирования.

Таким образом, в режиме зарядки ТА накапливает избыточное тепло от реактора, а в режиме разрядки – отдает накопленную энергию для повышения мощности турбины в пиковые часы, реализуя функцию полупикового регулятора нагрузки. Использование нитратно-нитритной соли в качестве теплоносителя контура ТА обеспечивает необходимое сочетание энергетической эффективности и повышенной эксплуатационной безопасности.

Выводы. Предложенная концепция использования ТА для ИЯУ МБИР позволяет более эффективно использовать тепловую энергию от реактора для работы турбины согласно графику нагрузок потребления и обеспечивает работу турбины в полупиковом режиме.

Концепция применения ТА может быть использована в дальнейшем и для отраслевых атомных электростанций с их относительно жесткими ограничениями по маневренности. Применение ТА для отраслевых АЭС позволяет также обеспечить резерв энергии в случае внезапного прекращения работы энергоблоков АЭС, особенно на период запуска резервных установок.

Список литературы

1. Глазков В.В., Синкевич О.А., Чикунов С.Е. Подземные водяные тепловые аккумуляторы для АЭС – новые перспективы // Вестник МЭИ. – 2011. – № 3. – С. 23–24.

2. Копкова Е.С., Иманова Х.Г. Атомная энергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы развития отрасли в условиях цифровой экономики // Проблемы региональной экономики. – 2018. – № 42. – С. 3–26.

3. Фортков В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. – М.: Интеллект, 2011. – С. 25–30.

4. Асмолов В.Г. Российская ядерная энергетика сегодня и завтра // Теплоэнергетика. – 2007. – № 5. – С. 2–6.

5. Бажанов В.В., Лощаков И.И., Щуклинов А.П. Исследование возможности использования на АЭС аккумуляторов тепловой энергии при регулировании частоты тока в сети // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2013. – № 4. – С. 29–36.

6. Бабаев Б.Д. Принципы теплового аккумуляирования и используемые теплоаккумулирующие материалы // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 5. – С. 760. DOI: 10.7868/S0040364414050019.

7. Лебедев В.А., Деев А.С., Ступкин А.Д. АЭС малой мощности с аккумулятором теплоты фазового перехода // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 19–27. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.019-027.

8. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумуляирование энергии: пер. с англ. / под ред. В.М. Бродянского. – М.: Мир, 1987.

9. Столяревский А.Я. Хемотермические циклы и установки аккумуляирования энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2005. – № 3(23). – С. 45–58.

10. Многоцелевой быстрый исследовательский реактор (МБИР) – инновационный инструмент для развития ядерных энерготехнологий / Ю.Г. Драгунов, И.Т. Третьяков, А.В. Лопаткин и др. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113, вып. 1. – С. 25–28.

11. Исследовательские реакторы – взгляд в будущее / Б.А. Габараев, А.В. Лопаткин, И.Т. Третьяков и др. // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103, вып. 1. – С. 65–70.

12. Нейтронно-физические особенности проектирования МБИР / И.В. Зайко, М.О. Левченко, А.В. Лопаткин и др. // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. – М.: ОАО «НИКИЭТ», 2012. – С. 187–194.

13. Нейтронно-физические особенности активной зоны МБИР / И.В. Зайко, М.О. Левченко, А.В. Лопаткин // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114, вып. 4. – С. 188–192.

References

1. Glazkov, V.V., Sinkevich, O.A., Chikunov, S.E. Podzemnye vodyanye teplovye akkumulyatory dlya AES – novye perspektivy [Underground water heat accumulators for nuclear power plants – new prospects]. *Vestnik MEI*, 2011, no. 3, pp. 23–24.

2. Koptkova, E.S., Imanova, Kh.G. Atomnaya energetika Rossii: sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya otrasli v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki [Nuclear energy in Russia: current state, problems and prospects for the development of the industry in the context of the digital economy]. *Problemy regional'noy ekonomiki*, 2018, no. 42, pp. 3–26.

3. Fortov, V.E., Popel', O.S. *Energetika v sovremennom mire* [Energy in the modern world]. Moscow: Intellekt, 2011, pp. 25–30.

4. Asmolov, V.G. Rossiyskaya yadernaya energetika segodnya i zavtra [Russian nuclear energy today and tomorrow]. *Teploenergetika*, 2007, no. 5, pp. 2–6.

5. Bazhanov, V.V., Loshchakov, I.I., Shchuklinov, A.P. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya na AES akkumulyatorov teplovoy energii pri regulirovani chasty toka v seti [Study of the possibility of using thermal energy accumulators at nuclear power plants when regulating the frequency of the current in the network]. *Izvestiya vysokikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2013, no. 4, pp. 29–36.

6. Babaev, B.D. Printsipy teplovogo akumulirovaniya i ispol'zuemye teploakkumuliruyushchie materialy [Principles of thermal storage and heat storage materials used]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2014, vol. 52, no. 5, p. 760. DOI: 10.7868/S0040364414050019.

7. Lebedev, V.A., Deev, A.S., Stupkin, A.D. AES maloy moshchnosti s akkumulyatorom teploty fazovogo perekhoda [Low-power nuclear power plant with phase transition heat accumulator]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 5, pp. 19–27. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.019-027.

8. Bekman, G., Gilli, P. *Teplovoe akumulirovanie energii* [Thermal energy storage]. Moscow: Mir, 1987.

9. Stolyarevskiy, A.Ya. Khimotermicheskie tsikly i ustanovki akumulirovaniya energii [Chemothermic cycles and energy storage units]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal "Alternativnaya energetika i ekologiya"*, 2005, no. 3(23), pp. 45–58.

10. Dragunov, Yu.G., Tret'yakov, I.T., Lopatkin, A.V., Romanova, N.V., Lukasevich, I.B. Mnogotselovoy bystryy

issledovatel'skiy reaktor (MBIR) – innovatsionnyy instrument dlya razvitiya yadernykh energotekhnologiy [Multi-purpose fast research reactor (MBIR) – an innovative tool for the development of nuclear energy technologies]. *Atomnaya energiya*, 2012, vol. 113, issue 1, pp. 25–28.

11. Gabaraev, B.A., Lopatkin, A.V. Tret'yakov, I.T., Khmel'shchikov, V.V., Aksenov, V.L. Issledovatel'skie reaktory – vzglyad v budushchee [Research Reactors – A Look into the Future]. *Atomnaya energiya*, 2007, vol. 103, issue 1, pp. 65–70.

12. Zayko, I.V., Levchenko, M.O., Lopatkin, A.B., Lukasevich, I.B., Rodina, E.A., Romanova, N.V., Tret'yakov, I.T. Neytronno-fizicheskie osobennosti proektirovaniya MBIR [Neutron-physical features of MBIR design]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Innovatsionnye proekty i tekhnologii yadernoy energetiki»* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Innovative Projects and Technologies of Nuclear Energy”]. Moscow: OAO «NIKIET», 2012, vol. 1, pp. 187–194.

13. Zayko, I.V., Levchenko, M.O., Lopatkin, A.B., Lukasevich, I.B., Rodina, E.A., Romanova, N.V., Tret'yakov, I.T. Neytronno-fizicheskie osobennosti aktivnoy zony MBIR [Neutron-physical features of the MBIR active zone]. *Atomnaya energiya*, 2013, vol. 114, issue 4, pp. 188–192.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314.225

Дмитрий Юрьевич Вихарев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: dvikhareff@yandex.ru

Андрей Юрьевич Мурзин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, декан электроэнергетического факультета, Россия, Иваново, e-mail: murzin-64@mail.ru

Никита Андреевич Родин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: nikita_iv_96@mail.ru

Аналитический расчет собственной индуктивности вторичной обмотки трансформатора тока с тороидальным магнитопроводом

Авторское резюме

Состояние вопроса. Исследование установившихся и переходных процессов в трансформаторах тока основано на составлении схемы замещения и расчете ее параметров. Одним из элементов схемы замещения является индуктивность рассеяния вторичной обмотки, значение которой главным образом определяется степенью равномерности намотки. Результаты исследований, а также справочные данные указывают на необходимость учета индуктивности рассеяния при выполнении инженерных расчетов. В настоящее время индуктивность рассеяния определяются экспериментальным способом. Существующие аналитические методы расчета этого параметра не могут быть применены для получения точных результатов в силу предположения о равномерности намотки вторичной обмотки при расчете ее собственной индуктивности. Таким образом, разработка способа аналитического расчета собственной индуктивности вторичной обмотки с учетом степени ее равномерности является актуальной задачей.

Материалы и методы. Для определения индуктивности рассеяния использованы методы математического моделирования электрических цепей. Аналитические выражения для расчета собственной индуктивности вторичной обмотки основаны на применении векторного потенциала магнитного поля. Для преобразования полученных выражений к итоговому виду использованы методы векторного анализа.

Результаты. Сформулировано аналитическое выражение для расчета собственной индуктивности вторичной обмотки трансформатора тока с учетом степени ее равномерности. Проведена верификация расчетных выражений на основе результатов эксперимента с применением тороидальной обмотки с регулируемым углом сектора ее намотки.

Выводы. Полученные в ходе исследования аналитические выражения могут быть использованы для расчета индуктивности рассеяния вторичной обмотки трансформатора тока и составления его схемы замещения.

Ключевые слова: трансформатора тока, индуктивность рассеяния, собственная индуктивность, векторный потенциал

Dmitry Yurievich Vikharev

Ivanovo State Power Engineering University, Teaching Assistant of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dvikhareff@yandex.ru

Andrey Yurievich Murzin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Dean of Electrical Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: murzin-64@mail.ru

Nikita Andreevich Rodin

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: nikita_iv_96@mail.ru

Analytical calculation of self-Inductance of the secondary winding of a current transformer with a toroidal magnetic core

Abstract

Background. The study of steady-state and transient processes in current transformers relies on constructing an equivalent circuit and calculating its parameters. One of the elements of the equivalent circuit is the leakage inductance of the secondary winding. Its value is primarily determined by the degree of the uniformity of the winding. The research results, as well as reference data indicate the necessity to take into account leakage inductance during engineering calculations. Currently, leakage inductance is determined experimentally. Existing analytical methods to calculate this parameter cannot be applied to obtain accurate results due to the assumption of uniformity of the winding when calculating the self-inductance of the secondary winding. Thus, to develop a method for analytical calculation of the self-inductance of the secondary winding considering the degree of its uniformity is an urgent task.

Materials and methods. To determine the leakage inductance, methods of mathematical modeling of electrical circuits have been used. The analytical expressions to calculate self-inductance of the secondary winding are based on the use of the magnetic vector potential. Methods of vector analysis have been applied to transform the derived expressions into their final form.

Results. The authors have formulated an analytical expression to calculate the self-inductance of the secondary winding of a current transformer considering the degree of the uniformity of the winding. The calculated expressions have been verified based on the experimental results obtained with a toroidal winding with an adjustable sector angle of the winding.

Conclusions. The analytical expressions obtained during the study can be used to calculate the leakage inductance of the secondary winding of a current transformer and to construct its equivalent circuit.

Key words: current transformer, leakage inductance, self-inductance, magnetic vector potential

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.049-058

Состояние вопроса. Электромагнитные трансформаторы тока с тороидальным магнитопроводом (ТТ) широко применяются для измерения тока в электрических цепях напряжением от 0,4 до 750 кВ. Исследование установившихся и переходных процессов в ТТ проводится с помощью схемы замещения, детально описанной в [1]. Одним из ее основных параметров является индуктивность рассеяния вторичной обмотки $L_{\sigma 2}$, значение которой зависит от степени равномерности намотки обмотки. В соответствии с нормативно-технической документацией [2], значение индуктивности $L_{\sigma 2}$ должно быть указано в паспорте ТТ с классом точности 5PR, 10PR, TPY, TPZ. Индуктивность рассеяния используется для расчета сопротивления вторичной цепи ТТ при определении времени до насыщения магнитопровода в переходных режимах электроэнергетических систем (ЭЭС) [3], а также при выборе типа ТТ на стадии проектирования [4, 5]. Техническое обслуживание ТТ также проводится с использованием $L_{\sigma 2}$ при определении параметров рабочей точки характеристики

намагничивания [2]. Значением индуктивности рассеяния в большинстве инженерных расчетов для современных ТТ можно пренебречь по причине ее малого значения [2, 6]. Однако в справочных материалах содержится информация о значении $L_{\sigma 2}$, сопоставимом с омическим сопротивлением вторичной обмотки R_2 [1]. Это может быть обусловлено неравномерной намоткой вторичной обмотки как фазных ТТ [6], так и ТТ нулевой последовательности [7]. Исследования [8] показывают, что неучет $L_{\sigma 2}$ при расчете времени до насыщения ТТ может привести к существенному изменению полученных результатов и, как следствие, неправильному выводу о его пригодности к работе в переходных режимах ЭЭС. Таким образом, индуктивность рассеяния вторичной обмотки может оказывать существенное влияние на работу ТТ.

Значение индуктивности $L_{\sigma 2}$ возможно определить экспериментальным способом на основе регулировки угловой погрешности ТТ при заданных первичном и вторичном токах [9]. Этот способ может быть использован для идентификации

параметров ТТ при его техническом обслуживании. На стадии разработки, а также при расчете параметров ТТ, находящегося в эксплуатации, могут применяться аналитические способы, основанные на определении индуктивности рассеяния в схеме замещения. Известно, что индуктивность $L_{\sigma 2}$ рассчитывается по выражению

$$L_{\sigma 2} = L_2 - n_{\text{ном}} M_{12}, \quad (1)$$

где L_2 – индуктивность вторичной обмотки ТТ; $n_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент трансформации ТТ; M_{12} – коэффициент взаимной индукции между первичной и вторичной обмотками.

Значение индуктивности рассеяния не зависит от степени насыщения магнитопровода [9]. По этой причине значения L_2 , M_{12} могут быть рассчитаны для первичной и вторичной обмоток, расположенных в вакууме. Известные аналитические выражения для определения индуктивности L_2 и коэффициента взаимной индукции M_{12} детально описаны в [10]. При использовании известных расчетных выражений индуктивность $L_{\sigma 2}$ имеет нулевое значение. Это обусловлено тем, что индуктивность L_2 зависит от степени равномерности намотки вторичной обмотки, что не учитывается при ее расчете. По этой причине разработка аналитического способа определения индуктивности вторичной обмотки L_2 , учитывающего описанное свойство, является актуальной задачей.

Материалы и методы. В справочных материалах представлены аналитические выражения для расчета индуктивности тороидальной обмотки L_2 и коэффициента взаимной индукции M_{12} . Выражения основаны на допущении о равномерности намотки и имеют следующий вид [10]:

$$L_2 = \frac{\mu_0 w_2^2 d}{2\pi} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right); \quad (2)$$

$$M_{12} = \frac{\mu_0 w_1 w_2 d}{2\pi} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right), \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная в системе СИ; w_1 , w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток соответственно; d – высота магнитопровода; R_1 , R_2 – внутренний и внешний радиусы магнитопровода.

Используя понятие коэффициента трансформации $n_{\text{ном}} = w_2/w_1$, можно определить, что индуктивность рассеяния, рассчитанная по выражению (1), имеет нулевое значение:

$$L_{\sigma 2} = \left(\frac{\mu_0 w_2^2 d}{2\pi} - \frac{w_2}{w_1} \frac{\mu_0 w_1 w_2 d}{2\pi} \right) \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) = 0. \quad (4)$$

Значение коэффициента взаимной индукции не зависит от расположения витков вторичной обмотки. Это обусловлено тем, что магнитное поле, создаваемое первичной обмоткой, является осесимметричным. В связи с этим

выражение (3) может быть использовано для расчета индуктивности рассеяния. Магнитное поле, создаваемое тороидальной обмоткой, в общем случае не является осесимметричным. По этой причине индуктивность вторичной обмотки L_2 не может быть рассчитана по выражению (2) для определения параметров схемы замещения ТТ.

Для расчета собственной индуктивности тороидальной обмотки предлагается использовать понятие векторного потенциала магнитного поля. Его применение для определения потокоцеплений витков катушки имеет ряд преимуществ, детально описанных в [11]: простота математических выкладок при формулировке конечного вида расчетного выражения; возможность использования меньшего объема вычислительных мощностей при расчете определенных интегралов по сравнению с другими методами. Выражение для векторного потенциала, создаваемого элементом проводника с током, с учетом калибровки для решения задач магнитостатики имеет вид [12]

$$\vec{dA} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l}}{r}, \quad (5)$$

где \vec{dA} – векторный потенциал магнитного поля, создаваемого элементом бесконечно тонкого проводника с током $I d\vec{l}$; μ_0 – магнитная постоянная в системе СИ; I – сила тока, протекающего через элемент бесконечно тонкого проводника; r – расстояние от элемента бесконечно тонкого проводника с током до точки, в которой производится расчет векторного потенциала \vec{dA} .

При формулировке итоговых выражений для расчета векторного потенциала и магнитного потока через отдельные витки принимается упрощение в части геометрической конфигурации тороидальной катушки. Это упрощение заключается в представлении тороидальной катушки как совокупности короткозамкнутых витков прямоугольной формы, располагающихся в осевых сечениях тороидального магнитопровода. В таком случае для расчета магнитных потоков используется выражение, содержащее циркуляцию векторного потенциала магнитного поля [13]:

$$\Phi = \oint_l \vec{A} \cdot d\vec{l}, \quad (6)$$

где Φ – магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром l ; \vec{A} – векторный потенциал магнитного поля; l – замкнутый контур для вычисления циркуляции; $d\vec{l}$ – элемент длины контура интегрирования l .

Представление катушки в виде совокупности отдельных друг от друга короткозамкнутых витков позволяет ввести следующее выражение для потокоцепления катушки с учетом принципа суперпозиции магнитных полей:

$$\Psi = \sum_i \left(\sum_j \Phi_{ij} \right), \quad (7)$$

где i – порядковый номер витка катушки, для которой выполняется расчет потокоцепления Ψ ; j – порядковый номер витка катушки, которая создает магнитное поле, обуславливающее потокоцепление Ψ (при расчете собственного потокоцепления катушки множества i -х и j -х витков совпадают); Φ_{ij} – магнитный поток, созданный электрическим током j -го витка, через контур i -го витка.

Задачу о расчете собственной индуктивности тороидальной обмотки предлагается решить в условиях равномерного распределения плотности электрического тока в сечении проводника обмотки, т. е. при протекании силы тока низкой частоты. Такое упрощение физической модели исследуемого объекта обусловлено значением частоты изменения электрических параметров промышленных электрических сетей, при котором влиянием поверхностного эффекта можно пренебречь.

Формулировка принципа расчета потокоцепления, согласно выражению (7), указывает на необходимость определения векторного потенциала магнитного поля, созданного отдельным витком катушки. Для расчета магнитных потоков, входящих в состав выражения (7), требуется решить задачу об определении векторного потенциала \vec{A} , созданного прямоугольной рамкой из бесконечно тонкого проводника с током. Результаты решения такой задачи могут быть распространены и на витки с заданной формой сечения проводника [11]. Прямоугольная рамка с током, создающая векторный потенциал \vec{A} в пространстве, изображена на рис. 1.

Согласно выражению (5) и принципу суперпозиции магнитных полей, для определения векторного потенциала \vec{A} , созданного прямоугольной рамкой, необходимо произвести векторное суммирование элементарных векторных потенциалов $d\vec{A}$, созданных бесконечно малыми элементами длины проводника с током $d\vec{l}$.

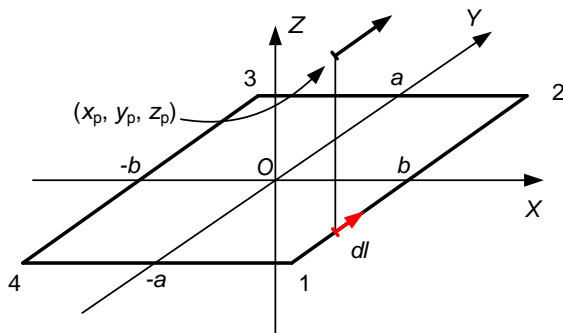


Рис. 1. Схема расположения прямоугольной рамки из бесконечно тонкого проводника с током

Предел такой векторной суммы при устремлении модуля $d\vec{l}$ к нулю равен криволинейному интегралу следующего вида:

$$\vec{A} = \oint_l d\vec{A}, \quad (8)$$

где l – контур прямоугольной рамки с током.

Стоит отметить, что результатом вычисления криволинейного интеграла, входящего в состав выражения (8), является вектор. Расчет интеграла такого вида может быть произведен с помощью криволинейного интеграла второго рода с учетом выражения (5) следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{A} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\vec{i} \oint_l \frac{dx}{r} + \vec{j} \oint_l \frac{dy}{r} + \vec{k} \oint_l \frac{dz}{r} \right) = \\ &= \vec{i} A_x + \vec{j} A_y + \vec{k} A_z, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы, образующие ортонормированный базис; A_x, A_y, A_z – функции, определяющие ортогональные составляющие векторного потенциала \vec{A} .

При расположении прямоугольной рамки в плоскости XOY (см. рис. 1) координата z каждого элемента с током $d\vec{l}$ не изменяется, следовательно, результат вычисления криволинейного интеграла по этой координате равен нулю. Расчет оставшихся криволинейных интегралов по замкнутому контуру l можно упростить аналогичным способом. Так как значение координаты x элемента с током $d\vec{l}$ не изменяется на участках 1–2 и 3–4, а координаты y – на участках 4–1 и 2–3, результат вычисления соответствующих интегралов по этим контурам равен нулю. С учетом описанных свойств контура l расчетное выражение для векторного потенциала \vec{A} примет следующий вид:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\vec{i} \left[\int_{l_{4-1}} \frac{dx}{r} + \int_{l_{2-3}} \frac{dx}{r} \right] + \vec{j} \left[\int_{l_{1-2}} \frac{dy}{r} + \int_{l_{3-4}} \frac{dy}{r} \right] \right). \quad (10)$$

Путем преобразования интегралов в выражении (10) определяются ортогональные составляющие векторного потенциала \vec{A} .

Для упрощения итоговой записи введем следующие функции:

$$\begin{aligned} \alpha_x(q_p, a, b) &= \\ &= (b - x_p) + \sqrt{(b - x_p)^2 + (a - y_p)^2 + z_p^2}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \alpha_y(q_p, a, b) &= \\ &= (a - y_p) + \sqrt{(b - x_p)^2 + (a - y_p)^2 + z_p^2}; \end{aligned} \quad (12)$$

Тогда итоговые выражения для ортогональных составляющих векторного потенциала \vec{A} примут вид:

$$\begin{aligned} A_x(q_p, a, b, I) &= \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \left[\frac{\alpha_x(q_p, -a, b) \alpha_x(q_p, a, -b)}{\alpha_x(q_p, -a, -b) \alpha_x(q_p, a, b)} \right], \end{aligned} \quad (13)$$

$$A_y(q_p, a, b, l) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \left[\frac{\alpha_y(q_p, a, b) \alpha_y(q_p, -a, -b)}{\alpha_y(q_p, -a, b) \alpha_y(q_p, a, -b)} \right]; \quad (14)$$

$$A_z(q_p, a, b, l) = 0. \quad (15)$$

Формулы (13)–(15) могут быть использованы как для расчета собственной индуктивности витка с учетом формы сечения проводника, так и для расчета коэффициентов взаимной индукции между отдельными витками.

При определении собственного потокоцепления прямоугольной рамки из провода с заданной формой сечения возникает задача о расчете магнитных потоков двух прямоугольных рамок, расположенных в параллельных плоскостях. Система, состоящая из двух прямоугольных рамок, расположенных в параллельных плоскостях, изображена на рис. 2.

Подстрочный индекс 1 у наименований геометрических размеров и координат обозначает прямоугольную рамку, через которую рассчитывается магнитный поток, а подстрочный индекс 2 – рамку, которая создает магнитное поле.

В соответствии с выражением (6), магнитный поток определяется циркуляцией векторного потенциала \vec{A} :

$$\Phi_1 = \oint_{l_1} A_x dx + \oint_{l_1} A_y dy + \oint_{l_1} A_z dz, \quad (16)$$

где l_1 – контур прямоугольной рамки, через которую рассчитывается магнитный поток Φ_1 ; A_x , A_y , A_z – ортогональные составляющие векторного потенциала \vec{A} , определяющиеся выражениями (13)–(15).

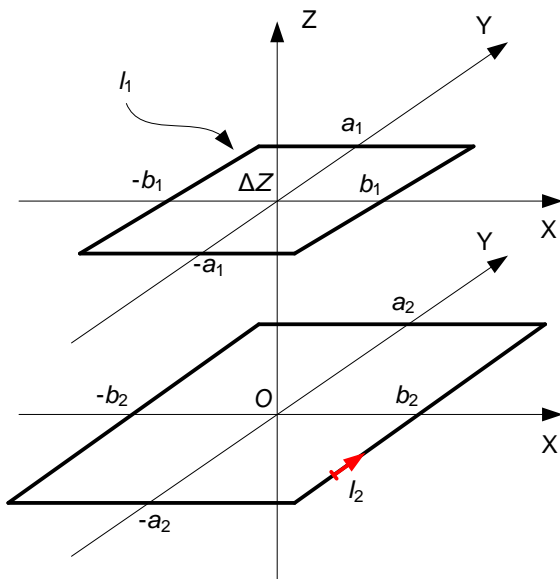


Рис. 2. Схема системы, состоящей из двух прямоугольных рамок, расположенных в параллельных плоскостях

Выражение (16) может быть приведено к итоговому виду с применением вспомогательных матриц U и V :

$$U(a_1, b_1, a_2, b_2, \Delta Z, l_2) = \begin{bmatrix} -(b_1 - b_2) A_x(b_1, a_2, \Delta Z, a_1, b_2, l_2) \\ -(b_1 + b_2) A_x(-b_1, a_2, \Delta Z, a_1, b_2, l_2) \\ -2b_2 A_x(b_2, a_2, \Delta Z, a_1, b_1, l_2) \\ (a_1 - a_2) A_y(b_2, a_1, \Delta Z, a_2, b_1, l_2) \\ (a_1 + a_2) A_y(b_2, -a_1, \Delta Z, a_2, b_1, l_2) \\ 2a_2 A_y(b_2, a_2, \Delta Z, a_1, b_1, l_2) \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$$V(a_1, b_1, a_2, b_2, \Delta Z) = \begin{bmatrix} \alpha_x(b_1, -a_1, \Delta Z, b_2, -a_2) \\ -\alpha_x(b_1, a_1, \Delta Z, b_2, -a_2) \\ \alpha_x(b_1, a_1, \Delta Z, -b_2, -a_2) \\ -\alpha_x(b_1, -a_1, \Delta Z, -b_2, -a_2) \end{bmatrix}; \quad (18)$$

где l_2 – сила тока, протекающего по прямоугольной рамке, расположенной в плоскости XOY.

Итоговое выражение для вычисления магнитного потока через прямоугольную рамку имеет вид

$$\Phi_1 = 2 \left(\sum_{n=1}^6 U_n + \frac{\mu_0 I_2}{\pi} \sum_{k=1}^4 V_k \right), \quad (19)$$

где n и k – порядковый номер строки в векторах U и V соответственно.

Выражение (19) может быть использовано для определения потокоцепления прямоугольной рамки из проводника с заданным сечением, а также для расчета коэффициента взаимной индукции двух прямоугольных рамок, расположенных в параллельных плоскостях.

При равномерном распределении плотности тока по сечению проводника потокоцепление витка определяется, согласно [10], следующим выражением:

$$\Psi = \frac{1}{S_{\text{пр}} S} \int \Phi dS, \quad (20)$$

где Ψ – потокоцепление витка с магнитным полем, которое создано протекающим по нему электрическим током; Φ – магнитный поток через бесконечно тонкий контур, соответствующий определенному элементу сечения dS ; $S_{\text{пр}}$ – площадь сечения проводника, образующего виток; S – поверхность, образованная сечением проводника.

Выражение (20) определяет среднее значение магнитного потока Φ по сечению проводника.

Для определения магнитного потока Φ , входящего в состав выражения (20), необходимо представить объемную прямоугольную рамку совокупностью бесконечно тонких прямоугольных контуров с током dI . Магнитный поток Φ через

отдельный контур может быть определен на основе принципа суперпозиции магнитных полей:

$$\Phi = \int_S d\Phi(dl), \quad (21)$$

где $d\Phi$ – элементарный магнитный поток, созданный током dl .

Магнитный поток, определяемый выражением (19), линейно зависит от силы тока, поэтому может быть введено понятие удельного потока Φ' .

В этом случае элементарный поток может быть определен как

$$d\Phi = \Phi' dl. \quad (22)$$

При равномерном распределении плотности тока по сечению проводника элементарный ток dl может быть определен как

$$dl = j dS = \frac{I}{S_{\text{пр}}} dS, \quad (23)$$

где j – модуль вектора плотности тока; dS – площадь элемента сечения проводника; I – сила тока, протекающего в объемном проводнике рассматриваемой прямоугольной рамки.

С учетом (21), (22) выражение (23) примет вид

$$\begin{aligned} \Phi(a_1, b_1, I) = \\ = \frac{I}{S_{\text{пр}}} \int_S \Phi(a_1, b_1, a_2(S), b_2(S), \Delta z(S)) dS, \end{aligned} \quad (24)$$

где a_1, b_1 – геометрические параметры прямоугольной рамки, через которую рассчитывается магнитный поток Φ ; $a_2(S), b_2(S)$ – геометрические параметры прямоугольной рамки, создающей магнитное поле (значение параметров зависит от положения элемента dS); $\Delta z(S)$ – расстояние между плоскостями, в которых располагаются прямоугольные рамки (значение параметра зависит от положения элемента dS).

Собственная индуктивность объемной прямоугольной рамки определяется следующим выражением с учетом формул (20), (24):

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{1}{S_{\text{пр}}^2} \iint_S \left(\int_S \Phi'(Q(S_1, S_2)) dS_2 \right) dS_1; \quad (25)$$

$$\begin{aligned} Q(S_1, S_2) \equiv \\ \equiv (a_1(S_1), b_1(S_1), a_2(S_2), b_2(S_2), \Delta z(S_1, S_2)), \end{aligned} \quad (26)$$

где $Q(S_1, S_2)$ – совокупность параметров, от которых зависит функция Φ' ; $a_1(S_1), b_1(S_1)$ – геометрические параметры прямоугольной рамки, через которую рассчитывается магнитный поток в соответствии с выражением (24) (значение параметров зависит от положения элемента dS_1); $a_2(S_2), b_2(S_2)$ – геометрические параметры прямоугольной рамки, создающей магнитное поле (значение параметров зависит от положения элемента dS_2); $\Delta z(S_1, S_2)$ – расстояние между плоскостями, в которых располагаются

прямоугольные рамки (значение параметра зависит от положений элементов dS_1, dS_2).

При расчете собственной индуктивности прямоугольной рамки из провода круглого сечения поверхностные интегралы, входящие в состав выражений (25) и (26), могут быть выражены с помощью кратных определенных интегралов:

$$\begin{aligned} L = \frac{1}{S_{\text{пр}}^2} \times \\ \times \int_{-R_{\text{пр}}}^{R_{\text{пр}}} \int_{-\sqrt{R_{\text{пр}}^2 - z_1^2}}^{\sqrt{R_{\text{пр}}^2 - z_1^2}} \left(\int_{-R_{\text{пр}}}^{R_{\text{пр}}} \int_{-\sqrt{R_{\text{пр}}^2 - z_2^2}}^{\sqrt{R_{\text{пр}}^2 - z_2^2}} \Phi'(Q(x_1, x_2, z_1, z_2)) dz_2 dx_2 \right) dz_1 dx_1; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} Q(x_1, x_2, z_1, z_2) \equiv \\ \equiv (a + x_1, b + x_1, a + x_2, b + x_2, z_1 - z_2), \end{aligned} \quad (28)$$

где $Q(x_1, x_2, z_1, z_2)$ – совокупность параметров, от которых зависит функция Φ' ; a, b – геометрические параметры бесконечно тонкой прямоугольной рамки, положение которой соответствует центру сечения проводника.

Выражения (25) и (26) позволяют определить значение индуктивности прямоугольной рамки с учетом формы сечения проводника. Аналитический расчет в этом случае сопряжен с рядом трудностей, обусловленных наличием большого количества определенных интегралов, например как в выражении (27), и сложным видом функции магнитного потока Φ' . Собственная индуктивность L в таком случае может быть рассчитана с помощью численных методов интегрирования.

При определении собственной индуктивности тороидальных катушек возникает задача по расчету коэффициента взаимной индукции двух прямоугольных рамок, расположенных в осевых сечениях тороидальной катушки. Пример расположения таких прямоугольных рамок изображен на рис. 3.

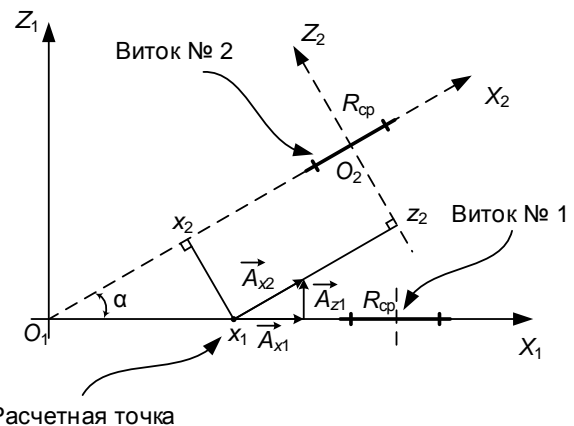


Рис. 3. Схема расположения прямоугольных рамок в осевых сечениях тороидальной катушки

Необходимо отметить, что подстрочный индекс 1 у наименований геометрических размеров и координат соответствует прямоугольной

рамке, через которую рассчитывается магнитный поток, а подстроичный индекс 2 – рамке, которая создает магнитное поле. При формулировке расчетных выражений принимается, что прямоугольные рамки имеют одинаковые размеры a, b .

Магнитный поток через прямоугольную рамку № 1 определяется выражением:

$$\Phi_1 = \oint_{l_1} A_{x1} dx + \oint_{l_1} A_{y1} dy + \oint_{l_1} A_{z1} dz, \quad (29)$$

где A_{x1}, A_{y1}, A_{z1} – ортогональные составляющие векторного потенциала \vec{A} , созданного током рамки № 2, в системе координат, связанной с осью симметрии тороидальной катушки.

Векторный потенциал \vec{A} в системе координат, связанной с витком № 2, описывается функциями A_{x2}, A_{y2}, A_{z2} , которые определяются формулами (13)–(15). Расчетные выражения для ортогональных составляющих A_{x1}, A_{y1}, A_{z1} могут быть получены путем преобразования функций A_{x2}, A_{y2}, A_{z2} . Это преобразование должно учитывать изменение координат расчетной точки и ортогональных составляющих вектора при переходе из одной системы координат в другую.

Расчетные выражения для ортогональных составляющих A_{x1}, A_{y1}, A_{z1} на основе анализа рис. 3 могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} A_{x1}(x_1, y_1, z_1 = 0) = \\ = A_{x2}(x_2(x_1), y_2(y_1), z_2(z_1)) \cos(\alpha); \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} A_{y1}(x_1, y_1, z_1 = 0) = \\ = A_{y2}(x_2(x_1), y_2(y_1), z_2(z_1)); \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} A_{z1}(x_1, y_1, z_1 = 0) = \\ = A_{z2}(x_2(x_1), y_2(y_1), z_2(z_1)) \sin(\alpha). \end{aligned} \quad (32)$$

Для записи итогового вида выражения для расчета магнитного потока необходимо преобразовать криволинейные интегралы, входящие в состав формулы (29), следующим образом:

$$\begin{aligned} \Phi_1(a, b, R_{cp}, \alpha, I) = \int_{-b}^b A_{x1}(x, -a, 0) dx + \int_b^{-b} A_{x1}(x, a, 0) dx + \\ + \int_{-a}^a A_{y1}(b, y, 0) dy + \int_a^{-a} A_{y1}(-b, y, 0) dy. \end{aligned} \quad (33)$$

Согласно [10], коэффициент взаимной индукции определяется следующим выражением:

$$M = \frac{\Phi_1(a, b, R_{cp}, \alpha, I)}{I} = \Phi'_1(a, b, R_{cp}, \alpha). \quad (34)$$

Выражение (34) позволяет определить значение коэффициента взаимной индукции двух прямоугольных рамок, расположенных в осевых сечениях тороидальной катушки. Учет формы сечения проводника в таком расчете не требуется, так как зачастую поперечные размеры проводника намного меньше расстояния между прямоугольными рамками.

Результаты исследования. Согласно [10], собственная индуктивность катушки определяется выражением

$$L = \frac{\Psi}{I}, \quad (35)$$

которое с учетом (7) может быть представлено следующим образом:

$$L = \frac{1}{I} \sum_i \left(\sum_j \Phi_{ij} \right) = \sum_i L_i + \sum_i \left(\sum_j M_{ij} \right), \quad (36)$$

где L_i – собственная индуктивность витка тороидальной катушки, рассчитываемая в соответствии с выражением (27); M_{ij} – коэффициент взаимной индукции между витками тороидальной катушки, рассчитываемый в соответствии с выражением (34) (при вычислении множества i и j совпадают, однако для обеспечения корректности полученного результата коэффициенты взаимной индукции, соответствующие одинаковым значениям переменных i и j , должны быть приняты равными нулю).

Для верификации сформулированных выражений проведен эксперимент с применением тороидальной обмотки. Его суть заключается в измерении собственной индуктивности тороидальной катушки. Для проведения эксперимента была изготовлена тороидальная катушка, обмотка которой имеет ответвления через фиксированное количество витков (рис. 4).

Тороидальная катушка, изготовленная для проведения измерений, имеет следующие параметры:

- внешний диаметр тора 105 мм;
- внутренний диаметр тора 57 мм;
- высота тора 36,5 мм;
- диаметр проводника обмотки 0,8 мм;
- количество секторов намотки 11;
- количество витков в каждом секторе 16 (за исключением последнего сектора, который имеет 19 витков).

Измерение индуктивности секторов тороидальной обмотки осуществлялось с помощью измерителей иммитанса АКТАКОМ АМ-3001, АКТАКОМ АММ-3320 при различных частотах напряжения измерительного сигнала. Результаты измерений представлены в табл. 1.



а)

б)

Рис. 4. Тороидальная катушка для проведения испытаний по измерению индуктивности

Таблица 1. Результаты измерений индуктивности секторов тороидальной обмотки

Число витков	Угол сектора намотки, градус	Значение индуктивности сектора тороидальной обмотки, мкГн					
		АКТАКОМ АМ-3001			АКТАКОМ АММ-3320		
		100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 Гц	1 кГц	10 кГц
16	32,14	9,25	9,11	9,06	9,00	8,60	8,74
32	64,29	21,88	21,62	21,66	21,00	21,20	21,36
48	96,43	35,30	35,12	35,12	34,00	34,80	34,82
64	128,57	48,59	48,54	48,45	47,00	48,30	48,23
80	160,71	62,69	62,52	62,55	61,00	62,40	62,27
96	192,86	77,09	76,91	76,91	76,00	76,80	76,63
112	225,00	91,10	91,18	91,10	90,00	90,80	90,80
128	257,14	105,70	105,61	105,68	106,00	105,80	105,40
144	289,29	121,40	121,33	121,36	121,00	121,50	121,10
160	321,43	138,10	138,14	138,16	138,00	138,10	138,01
179	360,00	162,12	162,06	162,06	162,00	162,10	162,21

Расчет индуктивности секторов тороидальной катушки с помощью предложенного аналитического метода производится в соответствии с выражением (36). Для определения степени соответствия результатов расчета измеренным значениям используется понятие относительной погрешности:

$$\Delta = \frac{L_{\text{расч}} - L_{\text{изм}}}{L_{\text{изм}}} 100\%, \quad (37)$$

где $L_{\text{расч}}$ – расчетное значение индуктивности в соответствии с выражением (36); $L_{\text{изм}}$ – измеренное значение индуктивности.

Результаты расчета индуктивности секторов тороидальной катушки с помощью предложенной методики и значения относительной погрешности представлены в табл. 2. Значение погрешности Δ приведены для результатов измерений индуктивности на частоте 10 кГц

Таблица 2. Результаты расчета индуктивности обмотки с помощью разных методик и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными

Число витков	Угол сектора намотки, градус	Расчетное значение индуктивности $L_{\text{расч}}$ (выражение (36)), мкГн	Расчетное значение индуктивности $L_{\text{расч(упр)}}$ по упрощенной методике (выражение (2)), мкГн	Относительная погрешность Δ , %			
				АКТАКОМ АМ-3001		АКТАКОМ АММ-3320	
				$\Delta L_{\text{расч}}$	$\Delta L_{\text{расч(упр)}}$	$\Delta L_{\text{расч}}$	$\Delta L_{\text{расч(упр)}}$
16	32,14	8,74	1,27	-3,49	-85,90	0,04	-85,39
32	64,29	21,59	5,11	-0,30	-76,42	1,10	-76,09
48	96,43	35,27	11,49	0,39	-67,29	1,29	-67,00
64	128,57	49,23	20,24	1,62	-57,83	2,08	-57,64
80	160,71	63,33	31,91	1,26	-48,97	1,72	-48,75
96	192,86	77,53	45,96	0,83	-40,23	1,19	-40,02
112	225,00	91,83	62,56	0,80	-31,33	1,14	-31,10
128	257,14	106,25	81,71	0,54	-22,68	0,81	-22,47
144	289,29	120,92	103,42	-0,37	-14,78	-0,15	-14,60
160	321,43	136,23	127,68	-1,40	-7,59	-1,29	-7,48
179	360,00	160,62	159,80	-0,88	-1,40	-0,97	-1,48

В табл. 2 также представлены значения индуктивности, полученные с помощью упрощенного выражения (2), и относительная погрешность полученных результатов.

Согласно полученным данным (табл. 2), максимальное значение относительной погрешности составляет не более 3,5 %. Верификация предложенных аналитических выражений по данным физического эксперимента указывает на возможность их применения в практических расчетах.

Упрощенная методика позволяет получить точные результаты только в случае равномерного распределения обмотки. При намотке обмотки в секторе с углом приблизительно 320 градусов погрешность расчета составляет около 7,5 %.

Выводы. Верификация аналитических выражений с учетом степени равномерности намотки вторичной обмотки на основе результатов физического эксперимента указывает на возможность их применения в целях определения параметров схемы замещения ТТ.

Список литературы

1. **Королев Е.А.** Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия, 1980. – 207 с.
2. **ГОСТ Р 70507.2-2024.** Трансформаторы измерительные. Ч. 2. Технические условия на трансформаторы тока. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 32 с.
3. **ГОСТ Р 58669-2019.** Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях. – М.: Стандартинформ, 2020. – 58 с.
4. **ГОСТ Р 71403-2024.** Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Методические указания по определению параметров электромагнитных трансформаторов тока для обеспечения правильного функционирования релейной защиты в переходных режимах. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 11 с.
5. **О стандартизации** требований к трансформаторам тока и быстродействующим устройствам релейной защиты в переходных режимах коротких замыканий / С.Л. Кузнецов, А.А. Дегтярев, Н.А. Дони и др. // Энергоэксперт. – 2022. – № 4(84). – С. 22–30. – EDN ARBRVH.
6. **Вавин В.Н.** Трансформаторы тока. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 105 с.
7. **Сирота И.М.** Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наукова думка, 1983. – 267 с.
8. **Разработка** методики выбора трансформаторов тока с учетом их работы в переходных режимах / А.А. Яблоков, А.В. Панащатенко, А.С. Лифшиц, А.Е. Петров // Энергетик. – 2024. – № 2. – С. 40–47. – EDN MEBDSR.
9. **Авторское** свидетельство № 311217 А1 СССР, МПК G01R 27/26. Способ измерения индуктивности

рассеяния обмоток трансформаторов тока: № 1400992/18–10; заявл. 02.02.1970; опубл. 09.08.1971 / И.М. Сирота; заявитель – Институт электродинамики АН Украинской ССР. – EDN GNZAAD.

10. **Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.** Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергия, 1970. – 415 с.

11. **Вихарев Д.Ю., Снитко И.С., Тихонов А.И.** Аналитический расчет индуктивностей рассеяния на основе применения векторного потенциала магнитного поля // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 4–10. DOI: 10.12737/2219-0767-2021-14-1-4-10.

12. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика. Т. 2: Теория поля. – М.: Физматлит, 2003. – 536 с.

13. **Говорков В.А., Купалян С.Д.** Теория электромагнитного поля в упражнениях и задачах. – М.: Высш. шк., 1970. – 304 с.

References

1. Korolev, E.A. *Raschety dopustimyykh nagruzok v tokovykh tsepyakh releynoy zashchity* [Calculation of permissible loads in relay protection current circuits]. Moscow: Energiya, 1980. 207 p.
2. GOST R 70507.2-2024. *Transformatory izmeritel'nye. Ch. 2. Tekhnicheskie usloviya na transformatory toka* [Instrument Transformers. Part 2. Technical Specifications for Current Transformers]. Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2024. 32 p.
3. GOST R 58669-2019. *Edinaya energeticheskaya sistema i izolirovanno rabotayushchie energosistemy. Reley'naya zashchita. Transformatory toka izmeritel'nye induktivnye s zamknutym magnitoprovodom dlya zashchity. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu vremeni do насыshcheniya pri korotkikh zamykaniyakh* [United Power System and Isolated Power Systems. Relay Protection. Inductive Measuring Current Transformers for Protection with a Closed Magnetic Circuit. Methodology Guidelines for Determination of Time to Saturation During Short Circuits]. Moscow: Standartinform, 2020. 58 p.
4. GOST R 71403-2024. *Edinaya energeticheskaya sistema i izolirovanno rabotayushchie energosistemy. Reley'naya zashchita i avtomatika. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu parametrov elektromagnitnykh transformatorov toka dlya obespecheniya pravil'nogo funktsionirovaniya releynoy zashchity v perekhodnykh rezhimakh* [United Power System and Isolated Power Systems. Relay Protection and Automation. Methodology Guidelines for Determining Parameters of Electromagnetic Current Transformers to Ensure Proper Functioning of Relay Protection in Transient Conditions]. Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2024. 11 p.
5. Kuzhekov, S.L., Degtyarev, A.A., Doni, N.A., Shurupov, A.A., Petrov, D.S. O standartizatsii trebovaniy k transformatoram toka i bystrodeystvuyushchim ustroystvam releynoy zashchity v perekhodnykh rezhimakh korotkikh zamykaniy [On Standardization of Requirements for Current Transformers and High-Speed Relay Protection Devices in Transient Short-Circuit Conditions]. *Energoekspert*, 2022, no. 4(84), pp. 22–30. EDN ARBRVH.
6. Vavin, V.N. *Transformatory toka* [Current Transformers]. Moscow; Leningrad: Energiya, 1966. 105 p.
7. Sirota, I.M. *Transformatory i fil'try napryazheniya i toka nulevoy posledovatel'nosti* [Transformers

and Filters for Zero-Sequence Voltage and Current]. Kiev: Naukova dumka, 1983. 267 p.

8. Yablokov, A.A., Panashchenko, A.V., Lifshits, A.S., Petrov, A.E. Razrabotka metodiki vybora transformatorov toka s uchetom ikh raboty v perekhodnykh rezhimakh [Development of a Methodology for Selecting Current Transformers Considering Their Operation in Transient Conditions]. *Energetik*, 2024, no. 2, pp. 40–47. EDN MEBDSR.

9. Sirota, I.M. *Sposob izmereniya induktivnosti rasseyaniya obmotok transformatorov toka* [A Method for Measuring the Leakage Inductance of Current Transformer Windings]. Avtorskoe svidetelstvo [Inventor's certificate]. No. 311217, 1971. EDN GNZAAD.

10. Kalantarov, P.L., Tseytlin, L.A. *Raschet induktivnostey: spravoch'naya kniga* [Inductance Calculation: Reference Book]. Leningrad: Energiya, 1970. 415 p.

11. Vikharev, D.Yu., Snitko, I.S., Tikhonov, A.I. Analiticheskiy raschet induktivnostey rasseyaniya na osnove primeneniya vektornogo potentsiala magnitnogo polya [Analytical Calculation of Leakage Inductances Based on the Application of the Magnetic Vector Potential]. *Modelirovanie sistem i protsessov*, 2021, vol. 14, no. 1, pp. 4–10. DOI: 10.12737/2219-0767-2021-14-1-4-10.

12. Landau, L.D., Lifshits, E.M. *Teoreticheskaya fizika. T. 2: Teoriya polya* [Theoretical Physics. Vol. 2: Field Theory]. Moscow: Fizmatlit, 2003. 536 p.

13. Govorkov, V.A., Kupalyan, S.D. *Teoriya elektromagnitnogo polya v uprazhneniyakh i zadachakh* [Theory of Electromagnetic Field: Exercises and Problems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970. 304 p.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.82

Елизавета Владимировна Конюшенко

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: KoniuschenkoYV@mpei.ru

Ильяс Рахманов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: RahmanovIlias97@gmail.com

Олег Николаевич Молоканов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: MolokanovON@mpei.ru

Дмитрий Андреевич Ромашкин

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: RomashkinDA@mpei.ru

Александр Сергеевич Иванов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: IvanovAIS@mpei.ru

Юрий Михайлович Сафонов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», профессор кафедры автоматизированного электропривода, Россия, Москва, e-mail: SafonovYM@mpei.ru

Ольга Ивановна Байдакова

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», аспирант кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов, Россия, Москва, e-mail: KiselevaOI@mpei.ru

Исследование топологии электродвигателя Xiaomi Super Motor V6¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Актуальность изучения и синтеза оптимальной конструкции ротора вызвана необходимостью комплексного подхода к проектированию, учитывающего многозадачность и многокритериальность современных электродвигателей. Одним из ярких примеров прогресса является серия Xiaomi Super Motor, в связи с тем что скорость вращения ротора достигает 21 000 об/мин, что способствует быстрому разгону транспортного средства и более низкому энергопотреблению. Целью настоящего исследования является разработка математической модели и проведение экспериментальных исследований для изучения конструкции электродвигателя Xiaomi Super Motor V6.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач использованы численные методы моделирования электромагнитных полей, общие положения теории моделирования электрических машин, а также экспериментальные исследования на лабораторном образце. Моделирование осуществлялось по методу конечных элементов.

¹ Работа выполнена в рамках проекта «Разработка высокоскоростной электрической машины с улучшенными удельными показателями» при поддержке гранта Национального исследовательского университета «Московского энергетического института» (НИУ «МЭИ») на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

The work has been carried out within the framework of the project “Development of a high-speed electric machine with improved specific characteristics” with the support of a grant from the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” for the implementation of the scientific research program “Priority 2030: Technologies of the Future” in 2024–2026.

Результаты. Проведен анализ влияния конструкции ротора на выходные характеристики электрического двигателя. Осуществлено моделирование и экспериментальное исследование электродвигателя Xiaomi Super Motor V6. Получены зависимости электромагнитного момента и выходной мощности от угловой скорости вращения при ограниченном значении питающего напряжения 567 В.

Выводы. Полученные результаты могут быть применены для дальнейшего исследования топологий роторных систем научно-исследовательскими и производственными организациями, специализирующимися на разработке электрических машин.

Ключевые слова: высокооборотные электрические машины, увеличение удельной мощности, электрический транспорт

Elizaveta Vladimirovna Konyushenko

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Associate Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: KoniushenkoYV@mpei.ru

Ilyas Rakhmanov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Postgraduate Student of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: RahmanovIlyas97@gmail.com

Oleg Nikolaevich Molokanov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Associate Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: MolokanovON@mpei.ru

Dmitry Andreevich Romashkin

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Postgraduate Student of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow e-mail: RomashkinDA@mpei.ru

Alexander Sergeevich Ivanov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Associate Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: IvanovAIS@mpei.ru

Yuri Mikhailovich Safonov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Professor of Automated Electric Drive Department, Russia, Moscow, e-mail: SafonovYM@mpei.ru

Olga Ivanovna Baidakova

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Postgraduate Student of Physics and Technology of Electrotechnical Materials and Components Department, Russia, Moscow, e-mail: KiselevaOI@mpei.ru

Study of the topology of Xiaomi Super Motor V6 electric motor

Abstract

Background. The relevance to study and synthesize the optimal rotor design is caused by the need for an integrated design approach that takes into account the multitasking and multi-criteria nature of modern electric motors. One of the striking examples of progress is the Xiaomi Super Motor series due to the fact that the rotor rotation speed reaches 21,000 rpm, which contributes to the rapid acceleration of the vehicle and lower energy consumption. The purpose of this study is to develop a mathematical model and conduct experimental studies to study the design of the Xiaomi Super Motor V6 electric motor.

Materials and methods. Numerical methods of modeling electromagnetic fields, general principles of the theory of modeling electric machines, as well as experimental studies on a laboratory sample have been used to solve the tasks set. The modeling has been carried out using the finite element method.

Results. The influence of the rotor design on the output characteristics of an electric motor has been analyzed. A simulation and experimental study of Xiaomi Super Motor V6 electric motor has been carried out. The dependences of the electromagnetic moment and output power on the angular velocity of rotation have been obtained with a limited supply voltage of 567 V.

Conclusions. The results obtained can be applied to further research of the topologies of rotary systems by scientific research and manufacturing companies specializing in the development of electric machines.

Key words: high-speed electric machines, increase in specific power, electric transport

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.059-065

Введение. Конструкция электрических машин играет решающую роль в обеспечении высоких эксплуатационных характеристик. Под конструкцией подразумевается не только геометрическая форма, но и комплекс функциональных, структурных и полевых параметров,

которые оказывают влияние на работу электродвигателя [1].

Современные типы высокооборотных электродвигателей могут быть классифицированы по различным признакам, однако наиболее ключевым является конструкция ротора. Исходя

из этого, можно выделить следующие основные типы роторных систем:

- роторы с постоянными магнитами (permanent magnet) [2];
- асинхронные роторы [3];
- синхронно-реактивные роторы [4];
- гибридные конструкции роторов [5, 6].

В настоящее время роторы с постоянными магнитами получили широкое распространение в высокооборотных электрических машинах в связи с высокой удельной мощностью, отсутствием в роторе электрических потерь и высоким КПД [7, 8].

Для анализа конструктивных особенностей выбран двигатель Xiaomi Super motor V6 (рис. 1). Он является одним из ярких примеров технического прогресса, в связи с тем что скорость вращения ротора достигает 21 000 об/мин, это способствует быстрому разгону транспортного средства и более низкому энергопотреблению².

Двигатель с частотой вращения 30000 об/мин не только значительно увеличивает скорость автомобиля, но и значительно снижает вес и размер двигателя, повышая удельную мощность, по заявлению президента компании BYD³.



Рис. 1. Электродвигатель Xiaomi Super Motor V6

Кроме электродвигателя Xiaomi Super Motor V6, в линейке компании представлен высокооборотный электродвигатель Super Motor Xiaomi V8s, который способен достигать номинальной частоты вращения 27200 об/мин (рис. 2).

Такой двигатель направлен на применение в электроавтомобилях, где необходима высокая производительность при минимальном уровне энергопотребления. Благодаря использованию передовых технологий (искусственного интеллекта) для оптимизации конструкции ротора и магнитной системы в целом, двигатель Xiaomi обеспечивает не только высокую скорость вращения ротора, но и стабильную работу при различных нагрузках.

Данное решение является примером достижения высокой мощности при малых габаритных размерах, что является важным аспектом в разработке современных электроприводов.

² Xiaomi EV. HyperEngine: The next generation of electric vehicle powertrain technology [Электронный ресурс] // Официальный сайт Xiaomi EV. – URL: <https://www.xiaomiev.com/hyperengine> (дата обращения: 10.06.2025).

³ BYD. BYD unveils Super E-platform with megawatt flash charging [Электронный ресурс] // Официальный сайт BYD. – URL: <https://www.byd.com/emea/news-list/byd-unveils-super-e-platform-with-megawatt-flash-charging> (дата обращения: 19.06.2025).



Рис. 2. Xiaomi Super Motor XiaomiV8s

Параметры электродвигателя Xiaomi Super Motor V6s, выявленные в ходе исследования, представлены в таблице.

Параметры электромотора Xiaomi V6s

Наименование параметра	Значение	
Масса (без плат инвертора)	96,1 кг	
Электрические параметры		
Номинальное напряжение, В	800 В	
Номинальный ток , А	300	
Номинальный момент, Н·м	340	
Пиковый момент, Н·м	500	
Номинальная частота вращения, об/мин	5500	
Номинальная мощность, кВт	170	
Пиковая мощность, кВт	273 кВт	
Число фаз	3	
Линейная ЭДС холостого хода, действующее значение, В	98,3 В	
	при 110,62 Гц	
	76,8 В	
	при 86,43 Гц	
Обмотка		
Линейное сопротивление обмотки при комнатной температуре, мОм	Rab	36,4
	Rbc	36,3
	Rca	36,3
Фазное сопротивление обмотки при комнатной температуре, мОм	Ra	21,2
	Rb	22,8
	Rc	18,2
Линейная индуктивность обмотки при комнатной температуре (без ротора), мГн	Lab	0,322
	Lbc	0,321
	Lca	0,320
Линейная индуктивность обмотки при комнатной температуре (с ротором, наименьшая), мГн	Lab	0,542
	Lbc	0,542
	Lca	0,542
Линейная индуктивность обмотки при комнатной температуре (с ротором, наибольшая) мГн	Lab	1,269
	Lbc	1,269
	Lca	1,269
Фазная индуктивность обмотки при комнатной температуре (без ротора) мГн	Lan	0,137
	Lbn	0,137
	Lcn	0,137
Тип соединения	Звезда	
Статор		
Число полюсов, шт.	8	
Число пазов, шт.	48	
Тип обмотки	Hairpin, 7 слоев	

Окончание таблицы

Наименование параметра		Значение
Шаг обмотки, зубцах	Основное	6
	С удлинением	7
	С укорочением	5
Число слоев в пазу, шт.		7
Диаметр проводника, мм		2,1 x 5,5
Внешний диаметр статора, мм		218
Внутренний диаметр статора, мм		144
Высота зубца, мм		16
Ширина зубца, мм		6
Длина наконечника зуба, мм		1
Толщина наконечника зуба, мм		0,5
Тип паза (скругление у ярма)		Трапеция
Высота ярма (спинка статора), мм		18–20 мм
Наличие скоса		нет
Длина статора, мм		150
Толщина пластины, мм		0,25
Тип удержания пластин (сварка, скобы, диски)		Диски
Тип пазовой изоляции		Бумага с пропиткой
Толщина пазовой изоляции, мм		0,15
Воздушный зазор, мм		0,5
Ротор		
Количество полюсов, шт.		8
Внешний диаметр ротора, мм		145 мм
Внутренний диаметр ротора, мм		60
Количество пакетов ротора		6
Длина магнитопровода		150 мм
Толщина пластины, мм		0,25
Тип постоянного магнита		NdFeB
Магниты первого слоя (ВхШхД)		5 x 17 x 25
Магниты второго слоя (ВхШхД)		3,8 x 12,5 x 25
Угол скоса пакетов		5 градусов (–2,5; 0; 2,5; 2,5; 0; –2,5)
Тип ротора		двухслойные V-образные магниты

Ротор электродвигателя состоит из сердечника и расположенных на его внутренней поверхности высокоэнергетических постоянных магнитов. Магниты представляют собой сегменты, что позволяет делать скос пазов на роторе для подавления высших гармоник. Их крепление производится с помощью термостойкого композитного клея, который обеспечивает надежное крепление при высоких оборотах вращения и способствует эффективному отводу тепла от магнитов. Конструкция ротора представлена на рис. 3.



Рис. 3. Ротор электродвигателя Xiaomi V6s

Отверстия под установку постоянных магнитов имеют V-образную форму, а в зонах их размещения предусмотрены прорезы сложной нестандартной геометрии. Указанная форма конструктивных элементов вызвана необходимостью оптимизации конструкции активной части, направленной на обеспечение требуемой плотности магнитного потока, снижение массы и повышение механической прочности конструкции ротора. Кроме того, вентиляционные отверстия имеют специальную спроектированную форму, которая увеличивает механическую прочность. Статор электрического двигателя имеет 48 пазов, в которых размещена обмотка типа Hairpin, выполненная в семислойной конфигурации. Применение нечетного числа слоев, в частности семи, является не стандартным решением, так как в большинстве случаев для Hairpin-обмоток применяют четное количество проводников. Один из слоев в каждом пазу реализован с укороченной длиной, при этом последний слой обладает увеличенной длиной, что, скорее всего, нацелено на упрощение технологических операций, например процесса сварки выводных концов обмотки. Конструкция статора электродвигателя представлена на рис. 4, а чертеж обмотки – на рис. 5.

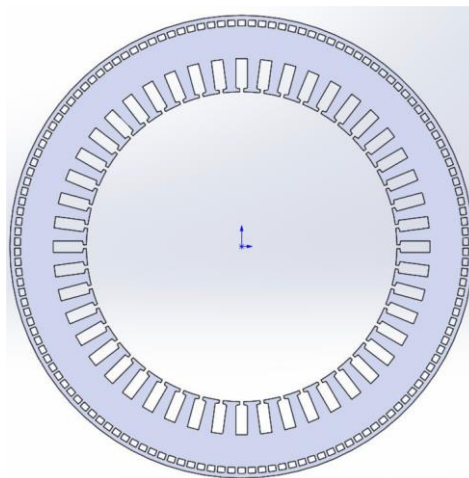


Рис. 4. Статор электромотора Xiaomi V6s



Рис. 5. Чертеж обмотки электромотора Xiaomi V6s

Методы исследования. В связи с отсутствием технической документации на исследуемый электрический двигатель был реализован комплексный подход к его изучению. Для получения первичных экспериментальных данных и последующей верификации расчетной модели

проведено предварительное испытание образца в генераторном режиме. Методика эксперимента включала механическое вращение ротора с одновременной регистрацией противоЭДС. Осциллограммы индуцированной электродвижущей силы представлены на рис. 6, 7, что дает возможность сделать качественный и количественный анализ электромагнитных процессов в исследуемом электродвигателе.

В результате экспериментального исследования электромеханических характеристик получены следующие данные: при частоте вращения вала 77 Гц зарегистрированное амплитудное значение противоЭДС достигло 97,5 В, в то время как увеличение частоты вращения до 110 Гц привело к возрастанию амплитудного значения до 140 В.

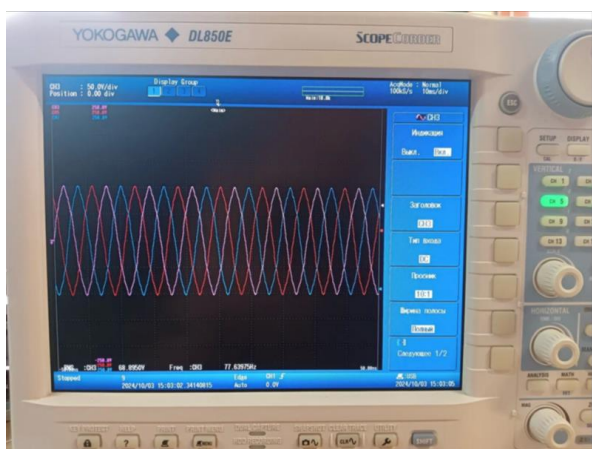


Рис. 6. Вращение электромотора на частоте 77,7 Гц

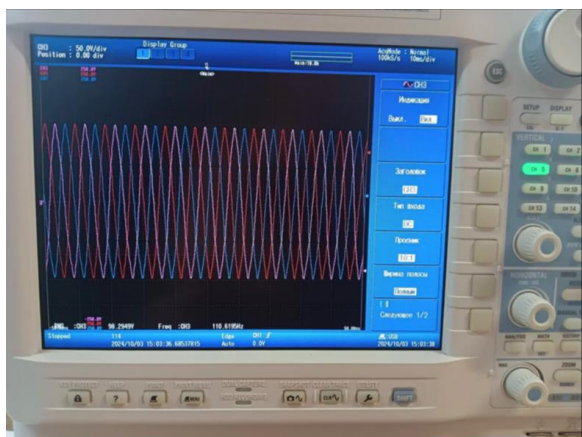


Рис. 7. Вращение электромотора на частоте 110 Гц

Для верификационного анализа разработана комплексная имитационная модель электродвигателя Xiaomi V6s и проведено исследование его работы в генераторном режиме. На рис. 8 представлена геометрия расчетной модели.

Одним из методов оптимизации вычислительных ресурсов является разделение полной геометрии на симметричные в магнитном плане сектора с соответствующими граничными условиями на линиях симметрии.

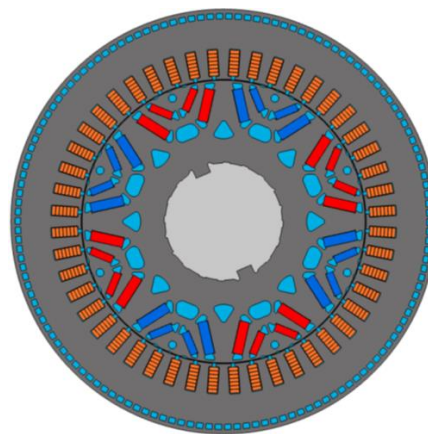


Рис. 8. Полная модель электродвигателя Xiaomi V6s

Сектор расчетной модели электродвигателя представлен на рис. 9.

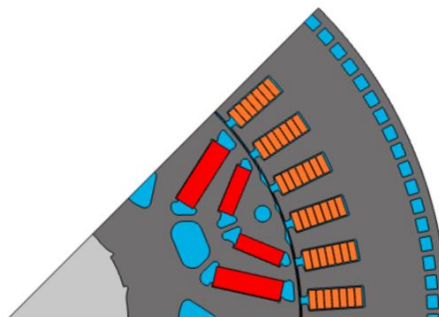


Рис. 9. 1/8 Модели электродвигателя

Граничные условия для расчета модели можно записать в следующем виде:

$$A_{src} = -A_{dst}; \quad (1)$$

$$V_{m.src} = -V_{m.dst}. \quad (2)$$

Уравнение (1) описывает распределение векторного магнитного потенциала на границе, а уравнение (2) – распределение скалярного потенциала (сохранение магнитного потока).

Результаты исследования. Результаты численного моделирования представлены на рис. 10, 11.



Рис. 10. Распределение ЭДС в генераторном режиме при частоте вращения 77 Гц

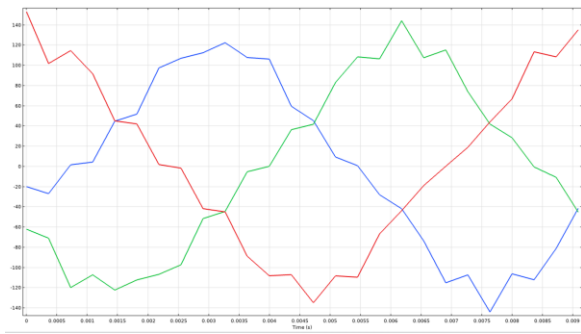


Рис. 11. Распределение ЭДС в генераторном режиме при частоте вращения 110 Гц

Сравнение с полученными экспериментальными данными подтверждает корректность и адекватность разработанной имитационной модели. Для определения предельных электромагнитных характеристик исследуемого электродвигателя проведен комплекс параметрических расчетов с изменением токовых нагрузок при фиксированной частоте вращения 1000 об/мин, что позволило определить максимальное значение тока. Результаты расчета представлены на рис. 12.

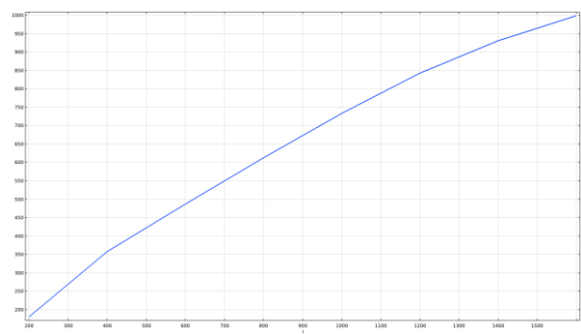


Рис. 12. Зависимость момента ротора от тока в обмотках статора

Анализ результатов расчета позволяет определить максимальное значение тока, достигающее 600 А, при этом плотность тока составляет 28 А/мм². Исходя из того, что при масляной системе охлаждения допустимая плотность тока составляет 15 А/мм², номинальный ток будет равен 300 А.

В рамках дальнейшего исследования динамических характеристик электродвигателя получены зависимости электромагнитного момента и выходной мощности от угловой скорости вращения при ограниченном значении питающего напряжения 567 В.

Результаты численного моделирования для условий пикового режима работы представлены на рис. 13, для номинального режима – на рис. 14. Представленные характеристики дают возможность выполнить комплексную оценку энергетической эффективности исследуемого электродвигателя в различных режимах работы.

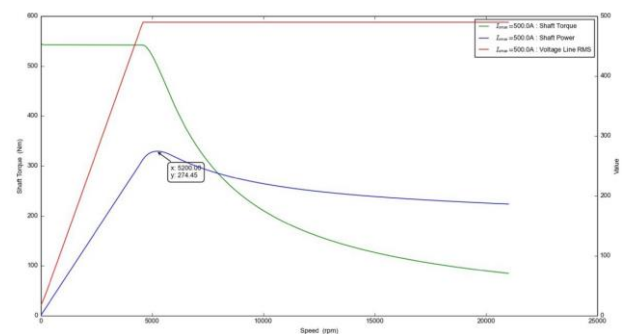


Рис. 13. Электромеханическая характеристика пиковая

По результатам расчета номинальная частота вращения составляет 5000 об/мин, а номинальный момент 340 Н·м.

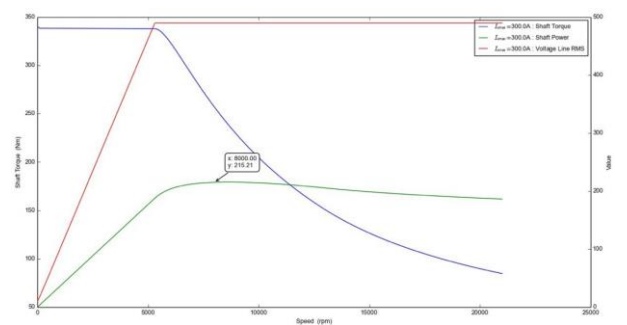


Рис. 14. Электромеханическая характеристика номинальная

Выводы. По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Электродвигатель Xiaomi благодаря применению передовых технологий в конструкции ротора и магнитной системе обеспечивает высокую скорость вращения и стабильную работу при различных нагрузках. Это решение позволяет достичь высокой мощности при компактных геометрических размерах и снизить энергозатраты, что является ключевым в разработке современных электроприводов.

2. В процессе модернизации тяговых электродвигателей все чаще применяются Hairpin-обмотки, которые обладают более лучшим теплоотводом и работают с высокой плотностью тока.

3. В рамках исследования синтезированы функциональные зависимости электромагнитного момента и выходной мощности от угловой скорости вращения при ограниченном значении питающего напряжения 567 В.

Список литературы

1. Wu H. Topology optimization of electric motors based on finite element computation: dr. tech. sci. diss.: 05.09.01 / The Hong Kong Polytechnic University. – Hong Kong, 2023. – 175 p.

2. **Rahmanov I., Koniushenko E.V., Fomin E.I.** Investigation of the Influence of the Geometric Dimensions of Permanent Magnets on the Magnitude of the Back Electromotive Force in Synchronous Machines with Sensorless Control // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk, 2023. – P. 573–577. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291109.

3. **Стасенко И.С., Герасименко Н.В., Савицкий В.С.** Методика проектирования тягового электродвигателя для транспорта // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1(58). – С. 24–30. DOI: 10.46864/1995-0470-2022-1-58-24-30.

4. **Taghavi S.** Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications: dr. tech. sci. diss. / Concordia University. – Montreal, 2015. – 173 p.

5. **Performance** Comparison of Permanent Magnet and Electrically Excited Motors for Electric Vehicles / D.Q. Vuong, B.M. Dinh, N.T.M. Hien, D.T. Bao // Journal Européen des Systèmes Automatisés. – 2023. – Vol. 56, No. 3. – P. 501–506. DOI: 10.18280/jesa.560318.

6. **Kimiabeigi M.** On the Design of a Low-Cost High-Performance Traction Motor with Ferrite Magnets: dr. tech. sci. diss. / Newcastle University. – Newcastle upon Tyne, 2017. – 133 p.

7. **Puranen J.** Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study: dr. tech. sci. diss. / Lappeenranta University of Technology. – Lappeenranta, 2006. – 147 p.

8. **Torque** Analysis in Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comparative Study / J.A. Güemes, A.M. Iraolagoitia, J.I. Del Hoyo, P. Fernández // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2011. – Vol. 26, No. 1. – P. 55–63.

References

1. Wu, H. Topology Optimization of Electric Motors Based on Finite Element Computation: dr. tech.

sci. diss.: 05.09.01. The Hong Kong Polytechnic University. Hong Kong, 2023. 175 p.

2. Rahmanov, I., Koniushenko, E.V., Fomin, E.I. Investigation of the Influence of the Geometric Dimensions of Permanent Magnets on the Magnitude of the Back Electromotive Force in Synchronous Machines with Sensorless Control. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Magnitogorsk, 2023, pp. 573–577. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291109.

3. Stasenka, I.S., Gerasimenko, N.V., Savitskiy, V.S. Metodika proektirovaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya transporta [Design methodology of traction electric motor for transport]. Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta, 2022, no. 1(58), pp. 24–30. DOI: 10.46864/1995-0470-2022-1-58-24-30.

4. Taghavi, S. Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications: dr. tech. sci. diss. Concordia University. Montreal, 2015. 173 p.

5. Vuong, D.Q., Dinh, B.M., Hien, N.T.M., Bao, D.T. Performance Comparison of Permanent Magnet and Electrically Excited Motors for Electric Vehicles. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 2023, vol. 56, no. 3, pp. 501–506. DOI: 10.18280/jesa.560318.

6. Kimiabeigi, M. On the Design of a Low-Cost High-Performance Traction Motor with Ferrite Magnets: dr. tech. sci. diss. Newcastle University. Newcastle upon Tyne, 2017. 133 p.

7. Puranen, J. Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study: dr. tech. sci. diss. Lappeenranta, 2006. 147 p.

8. Güemes, J.A., Iraolagoitia, A.M., Del Hoyo, J.I., Fernández, P. Torque Analysis in Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comparative Study. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 55–63.

УДК 621.313.84

Данил Сергеевич Тарицын

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: TaritsynDS@mpei.ru

Олег Николаевич Молоканов

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: MolokanovON@mpei.ru

Магнитная передача с магнитной системой Хальбаха для вспомогательных приводов¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. На тепловозе от одного дизельного двигателя необходимо с минимальным расходом энергии приводить значительное число агрегатов, имеющих разную номинальную частоту вращения. Используемые в настоящее время механические и гидравлические приводы требовательны к обслуживанию и качеству масла, электрические приводы громоздки и имеют меньший КПД. На примере тормозного компрессора предлагается внедрить в привод вспомогательных агрегатов бесконтактную магнитную передачу с магнитной системой Хальбаха для повышения надежности и энергоэффективности. При этом вспомогательные приводы, и в частности привод компрессора, должны иметь небольшое передаточное число ($u = 2...5$) для обеспечения необходимой частоты вращения. Исследования магнитных передач такого рода уже проводились, однако ни в одном исследовании не были представлены рекомендуемые относительные значения параметров геометрии магнитной системы, по которым можно было бы спроектировать магнитную передачу на заданный номинальный момент.

Материалы и методы. Электромагнитные явления в магнитной передаче исследованы с помощью плоской полевой модели с использованием уравнений Максвелла. Расчет выполнен методом конечных элементов. Для получения максимально компактной конструкции применена многофакторная оптимизация геометрических параметров магнитной передачи с магнитной системой Хальбаха по методу Нелдера–Мида.

Результаты. Исследованы электромагнитные явления в магнитной передаче. Выполнен их расчет. Определены оптимальные относительные геометрические параметры магнитной системы. Проведено сравнение стоимости активных материалов, в результате которого установлено, что стоимость единицы момента в передаче с магнитной системой Хальбаха ниже на 4,4 %.

Выводы. В результате внедрения магнитной системы Хальбаха плотность момента удалось повысить на 39,4 %, что позволяет пропорционально уменьшить магнитную передачу в объеме для получения того же момента на выходе. Полученные оптимальные геометрические параметры магнитной системы могут быть использованы как рекомендуемые для проектирования магнитных передач с высокой плотностью момента. Достигнута плотность момента 330 кН·м/м³. Магнитную систему Хальбаха наиболее эффективно размещать на статоре: она позволяет отказаться от магнитопровода, и, таким образом, уменьшить объем магнитной передачи без снижения передаваемого момента.

Ключевые слова: магнитная передача, постоянный магнит, магнитная система Хальбаха, плотность момента, диагностика электрических машин

Danil Sergeevich Taritsyn

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Postgraduate of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: TaritsynDS@mpei.ru

Oleg Nikolaevich Molokanov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: MolokanovON@mpei.ru

A Halbach array magnetic gear for auxiliary drives

Abstract

Background. A diesel locomotive must drive a significant number of units with different rated rotation speeds from a single diesel engine with minimal energy consumption. The mechanical and hydraulic drives currently in use demand high maintenance and specific oil quality, while electric drives are bulky and have lower efficiency. This study proposes the implementation

¹ Результаты получены при выполнении проекта «Комплексная система мониторинга технических, энергетических и воздействующих на человека параметров энергетического объекта» в рамках реализации стратегического технологического проекта «От микросхемы до системы» при поддержке программы «Приоритет 2030» нацпроекта «Молодежь и дети».

The results have been obtained during the implementation of the project "Integrated system for monitoring technical, energy and human-impacting parameters of an energy facility" within the framework of the strategic technological project "From microcircuit to system" with the support of the "Priority 2030" program of the national project "Youth and Children".

of a contactless magnetic gear with a Halbach array in the auxiliary unit drive system, using the brake compressor as an example, to improve reliability and energy efficiency. At the same time these auxiliary drives, particularly the compressor drive, require a low gear ratio ($u = 2...5$) to ensure the required rotation speed. While studies of such magnetic gears have been conducted, none of the existing studies have provided recommended relative values for the magnetic system geometric parameters that could be used to design a magnetic gear for a specified rated torque.

Materials and methods. Electromagnetic phenomena in the magnetic gear have been studied using a 2D field model based on Maxwell's equations. The calculations have been performed using the finite element method. To achieve a maximum compact design, multi-factor optimization of the geometric parameters of the magnetic gear with the Halbach array has been carried out according to Nelder-Mead method.

Results. Electromagnetic phenomena in magnetic gear have been studied. Their calculations have been performed. The optimal relative geometric parameters of the magnetic system have been determined. A comparison of the cost of active material has been conducted, revealing that the cost of a unit of torque in the gear with the Halbach array is 4,4 % lower.

Conclusions. As a result of the implementation of the Halbach array, the torque density has been increased by 39,4 %, allowing for a proportional reduction in the volume of the magnetic gear while maintaining the same output torque. The obtained optimal geometric parameters of the magnetic system can be used as recommendations to design magnetic gear with high torque density. A torque density of 330 kN·m/m³ has been achieved. Placing the Halbach array on the stator is the most effective configuration. It allows us to eliminate magnetic circuit, thereby reducing the volume of the magnetic gear without compromising the transmitted torque.

Key words: magnetic gear, permanent magnet, Halbach array, torque density, electrical machine diagnostics

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.066-074

Введение. В различных транспортных машинах существует необходимость привода множества различных агрегатов от одного двигателя, при этом каждый из этих агрегатов может иметь свою номинальную частоту вращения. Габариты машинных отсеков чаще всего стеснены, а передаваемые мощности в связи с развитием науки и техники непрерывно увеличиваются. Растут также и требования к надежности транспортных машин, к их невосприимчивости к тяжелым условиям работы.

Например, на тепловозах серии ТЭ10 всех индексов от ДВС приводятся тяговый генератор, тормозной компрессор, вентиляторы охлаждения тяговых электродвигателей и теплового двигателя, возбуждатель, подвозбудитель и вспомогательный генератор. Эти механизмы в настоящее время исполняются в виде зубчатых или гидромеханических редукторов, а на некоторых тепловозах – в виде отдельных электроприводов [1, 2].

Среди проблем зубчатых редукторов можно выделить механический износ, потребность в смазке. Гидропередачи требовательны к качеству масла, для них в некоторых случаях требуется предусматривать охлаждение рабочей жидкости, а также следить за состоянием уплотнений и герметичностью корпуса. Электроприводы имеют большой вес, дороги и материалоемки. В случае электропривода постоянного тока повышенного внимания требует коллектор [3]². В случае электропривода переменного тока требуется сложный преобразователь, который может создавать электромагнитные помехи [4].

Одним из возможных путей повышения надежности и экономичности вспомогательных приводов является внедрение бесконтактных магнитных передач. Конструкция магнитной передачи показана на рис. 1. Она состоит из

неподвижного статора с числом пар полюсов – постоянных магнитов p_s , тихоходного колеса – модулятора с числом магнитопроводящих сегментов z_m , и быстроходного колеса – ротора с числом пар полюсов p_r . У таких передач отсутствует механический контакт в области зацепления, они функционируют благодаря бесконтактному силовому взаимодействию магнитных полей. Эта особенность позволяет магнитным передачам обеспечивать принципиально более высокие эксплуатационные характеристики – надежность, стойкость к неблагоприятным погодным условиям и перегрузкам, бесшумность.

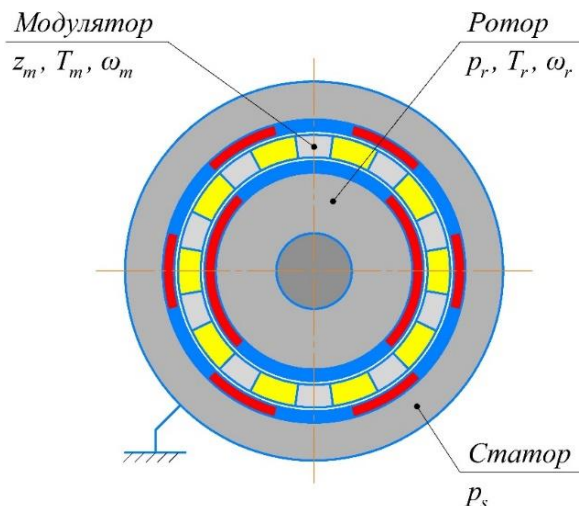


Рис. 1. Коаксиальная магнитная передача

Основные задачи по адаптации конструкции магнитных передач для использования на тепловозе – достижение высокой плотности момента для вписывания в стесненный габарит, обеспечение небольшой величины пульсаций и высокого

² Руководство по техническому обслуживанию и текущему ремонту тепловозов 2ТЭ25КМ. В 4 ч. – Брянск: Брянский машиностроительный завод, 2015.

КПД [5]. Достижение высоких технических характеристик магнитной передачи достигается в первую очередь оптимизацией геометрии магнитной системы – подбором таких размеров конструктивных элементов, при которых достигается наивысшая плотность момента [6]. Ранее была рассмотрена задача по нахождению оптимальных параметров магнитной системы, которая состояла только из радиально-намагниченных магнитов, и получена максимальная плотность момента по активным частям $200 \text{ кН} \cdot \text{м}/\text{м}^3$ [7].

Однако следует заметить, что полученная в [7] плотность момента рассчитана исходя из объема только активных частей магнитной передачи, если же для расчета принимать весь объем передачи с корпусными элементами, она может быть в 2–4,5 раза меньше в зависимости от особенностей конструкции [8, 9].

По чертежам и техническим данным [1] локомотива ТЭ10М требуемая плотность момента с учетом корпусных элементов была оценена в $105\text{--}110 \text{ кН} \cdot \text{м}/\text{м}^3$, что при достаточно высоком уровне проектирования будет требовать плотности момента по активным частям передачи $250\text{--}400 \text{ кН} \cdot \text{м}/\text{м}^3$. Этим обосновано продолжение поиска оптимальных вариантов геометрии магнитной системы для достижения заданных массогабаритных показателей.

В [10] приводится вариант магнитной системы, в котором магниты с радиальным намагничиванием чередуются с магнитами, намагниченными тангенциально – магнитная система Хальбаха (рис. 2).

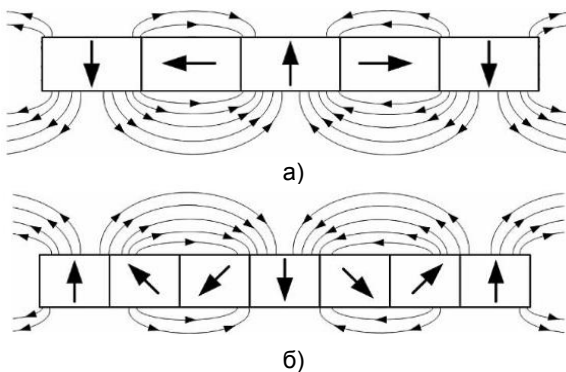


Рис. 2. Варианты расположения магнитов в магнитной системе Хальбаха: а – два сегмента на полюс; б – три сегмента на полюс

Преимущество данной конструкции в том, что тангенциальные магниты выполняют по сути роль сердечника, поэтому его размеры можно принимать минимальными. Это позволит в тех же габаритах увеличить диаметры воздушных зазоров и, таким образом, повысить плотность момента [11]. Вариант б сложен для производства и потому рассматриваться не будет. Для варианта а будет проведено сравнение стоимости единицы момента с аналогичным показателем передачи с обычной магнит-

ной системой в целях определения целесообразности применения передач с магнитной системой Хальбаха на производстве.

В [12] описывается циклоидальная магнитная передача с магнитной системой Хальбаха и плотностью момента $475 \text{ кН} \cdot \text{м}/\text{м}^3$. Диапазон исследуемых передаточных чисел – от 10 до 40. Однако авторы обращают внимание на наличие больших некомпенсированных радиальных сил в данной конструкции. Кроме того, такие передаточные числа не подходят для рассматриваемых в настоящем исследовании приводов. В [13] описывается коаксиальная магнитная передача, в которой неподвижным является модулятор, а внешнее магнитное колесо, которое в настоящем исследовании определено как статор, является подвижным и ведомым звеном. При этом на роторе применена магнитная система Хальбаха, на внешнем колесе магниты расположены в виде спиц и намагничены тангенциально. Плотность момента составила $73,44 \text{ кН} \cdot \text{м}/\text{м}^3$.

Цель исследования: теоретическое обоснование целесообразности применения магнитной системы Хальбаха в магнитной передаче для привода вспомогательных устройств в стесненных габаритах на примере тепловоза.

Задачи.

1. Используя ранее полученный в [7] оптимальный вариант геометрии магнитной системы передачи с радиально-намагниченными магнитами в качестве начального приближения, выполнить оптимизационное моделирование для комбинации магнитной системы Хальбаха на статоре и обычной магнитной системы на роторе.

2. Аналогично предыдущему пункту провести моделирование для комбинации магнитной системы Хальбаха на роторе и обычной магнитной системы на статоре.

3. Провести моделирование магнитной системой Хальбаха и на роторе, и на статоре с использованием результатов из пп. 1 и 2.

4. Для пунктов 1–3 выбрать геометрию, позволяющую получить наибольшую плотность момента, и для нее рассчитать стоимость единицы момента по активным материалам, сравнить с аналогичным показателем для магнитной передачи с радиальными магнитами.

Исходные данные. Исследование нацелено на улучшение предложенной в [7] магнитной передачи для привода тепловозного компрессора КТ-6 [14]. Типичные параметры: передаточное число $2,2 \pm 0,1$ и максимальный момент $2 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Высота вала компрессора – 335 мм, а осевая длина – 500 мм, соответственно, габариты магнитной передачи с учетом корпуса не должны превышать эти величины.

Уменьшение габаритов передачи позволит использовать ее в еще более компактных приводах, например приводе главного вентилятора дизеля.

Методы исследования. В настоящем исследовании механические потери рассматриваться не будут, поэтому плотность момента будет определяться исходя из электромагнитного момента. Для оценки массогабаритных показателей магнитных передач используется такой показатель, как плотность момента [5].

Плотность момента, $\text{Н} \cdot \text{м} / \text{м}^3$, рассчитывается как

$$\rho_T = \frac{T_{em}}{V_a}, \quad (1)$$

где T_{em} – электромагнитный момент тихоходного звена, $\text{Н} \cdot \text{м}$; V_a – объем магнитной системы:

$$V_a = \frac{\pi D^2}{4} l, \quad (2)$$

где l – осевая длина магнитной системы, м; D – внешний диаметр статора, м.

В [15] рассматривается метод аналитического расчета магнитной передачи, однако рассчитать с его помощью поля сложной конфигурации и возникающие от их взаимодействия моменты затруднительно. В связи с этим расчет будет проводиться по следующей методике [5].

Электромагнитный момент определяется по формуле

$$\mathbf{T}_{em} = \int_{S_r} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times \mathbf{f} dS, \quad (3)$$

где S_r – замкнутая поверхность, для которой определяется электромагнитный момент (в нашем случае – цилиндр, боковая поверхность которого проходит посередине воздушного зазора); \mathbf{r}_0 – координата центра вращения относительно начала системы координат, м; \mathbf{r} – координата рассматриваемого элементарного участка поверхности относительно начала системы координат, м; \mathbf{f} – вектор плотности силы, $\text{Н} / \text{м}^2$:

$$\mathbf{f} = \mu_0 ((\mathbf{nH})\mathbf{H} - 0,5\mathbf{nH}^2), \quad (4)$$

где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля, $\text{А} / \text{м}$.

Параметры магнитного поля определяются исходя из магнитных свойств материалов, входящих в магнитную систему, и геометрии магнитной системы по следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{pm} = \mu_0 \mu_{rec} \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \\ \mathbf{B}_{mc} = \mu_0 \mu(\mathbf{H}) \mathbf{H}, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \\ \nabla \times \mathbf{H} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где \mathbf{B}_{pm} – индукция в теле постоянного магнита, Тл; \mathbf{B}_{mc} – индукция в участках магнитопровода, Тл; \mathbf{B} – индукция в точке магнитной системы, Тл; μ_{rec} – магнитная проницаемость магнита (для сплава N45 – 1,05); $\mu(\mathbf{H})$ – магнитная проницаемость участка магнитной цепи в функции напряженности поля; \mathbf{B}_r – остаточная магнитная индукция (для сплава N45 – 1,35 Тл).

В расчете были приняты следующие допущения:

- расчет выполнялся в 2D постановке;
- не учитывались краевые эффекты;
- характеристика намагничивания стали принята нелинейной – учитывалось насыщение стали;
- потери в стали не учитывались.

Для большего удобства представления и анализа результата от внедрения магнитной системы Хальбаха будем оперировать такими параметрами магнитной системы, как ширина магнитопровода статора h_s , ширина модулятора h_m , (рис. 3), относительная ширина сегментов модулятора k_b , коэффициент заполнения полюса радиальными магнитами k_{fr} , а также число пар полюсов и сегментов.

Для выбора оптимального числа пар полюсов и сегментов удобно пользоваться формулами [5]:

$$u = \frac{z_m}{p_r}; \quad (6)$$

$$p_s = z_m - p_r, \quad (7)$$

где p_s – число пар полюсов статора; p_r – число пар полюсов ротора; z_m – число сегментов модулятора; u – передаточное число.

Для получения таких чисел пар полюсов и сегментов, которые обеспечат передаточное число в заданных исходными данными пределах, в первом приближении можно использовать выражения:

$$p_s = p_r + 3; \quad (8)$$

$$z_m = p_s + p_r. \quad (9)$$

Оптимальное с точки зрения максимальной плотности момента число пар полюсов ротора выбирается по результатам однофакторного расчета.

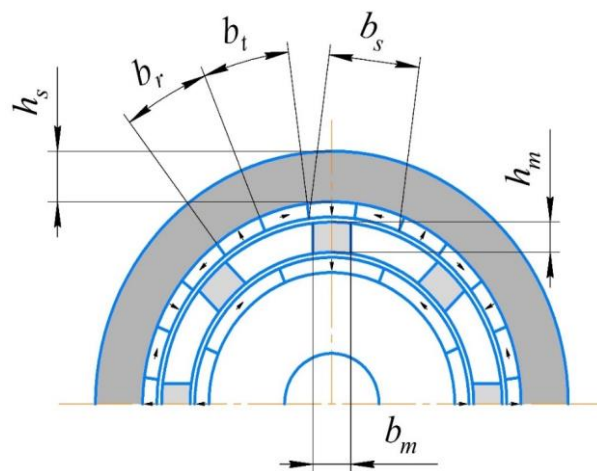


Рис. 3. Оптимизируемые параметры магнитной системы

Коэффициент ширины сегмента модулятора относительно длины хорды полюса статора равен

$$k_b = \frac{b_m}{b_s}, \quad (10)$$

где b_m – ширина сегмента модулятора, м; b_s – длина хорды полюса статора, м.

Из (10) следует:

$$b_m = k_b b_s. \quad (11)$$

Наибольший интерес представляет коэффициент заполнения полюса радиальными магнитами:

$$k_{fr} = \frac{b_r}{b_r + b_t}, \quad (12)$$

где b_r – ширина радиально намагниченного полюсного сегмента, м; b_t – ширина тангенциально намагниченного полюсного сегмента, м.

Результаты исследования. Применение магнитной системы Хальбаха на статоре. Определение начальных приближений для оптимизационного расчета. На первом этапе выполнено построение геометрии с произвольными параметрами для оценки плотности момента до оптимизации. Картина магнитной индукции показана на рис. 4.

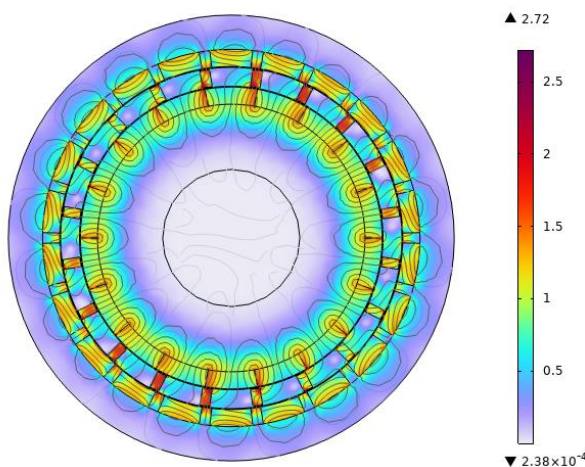


Рис. 4. Картина магнитной индукции до оптимизации

Предварительные значения геометрических параметров представлены в табл. 1. Максимальный момент составил $92 \text{ кН} \cdot \text{м}/\text{м}^3$.

Предварительные параметры передачи с магнитной системой Хальбаха на статоре для привода вспомогательного механизма. Анализ достигнутых в [7] результатов позволяет сделать вывод, что для достижения максимальной плотности момента ширину модулятора h_m следует делать минимально возможной по условиям прочности и технологичности. В настоящем исследовании она будет принята равной 8 мм.

Таблица 1. Предварительные параметры передачи с магнитной системой Хальбаха на статоре для привода вспомогательного механизма

Параметр	Значение
Передаточное отношение u	2,222
Число пар полюсов ротора p_r	9
Число пар полюсов статора p_s	11
Число сегментов модулятора z_m	20
Внешний диаметр статора D_s , м	0,26
Относительная ширина сегментов модулятора k_b	0,2
Ширина модулятора h_m , м	0,01
Коэффициент заполнения полюса радиальными магнитами k_{fr}	0,2
Ширина магнитопровода статора h_s , м	0,02

По результатам исследования зависимости среднего электромагнитного момента на модуляторе от числа пар полюсов ротора при изменении чисел пар полюсов статора и сегментов модулятора по зависимостям (8) и (9) (рис. 5) выявлено, что оптимальные числа пар полюсов и сегментов будут больше, чем у магнитной передачи с обычной системой радиально намагниченных магнитов – 15 против 9 на роторе, 18 против 11 на статоре и 33 против 20 на модуляторе.

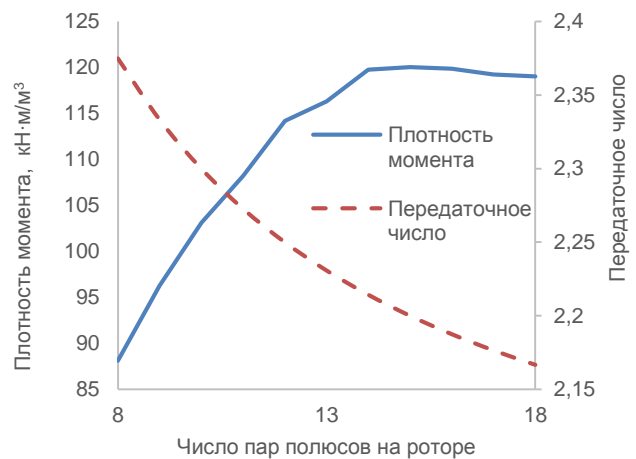


Рис. 5. Зависимость электромагнитного момента модулятора от числа пар полюсов ротора

Также были построены однофакторные зависимости среднего электромагнитного момента от относительной ширины сегментов модулятора (рис. 6), коэффициента заполнения полюса радиальными магнитами (рис. 7) и ширины магнитопровода статора (рис. 8). Во всех случаях наружный диаметр статора и осевая длина магнитной системы поддерживались постоянными.

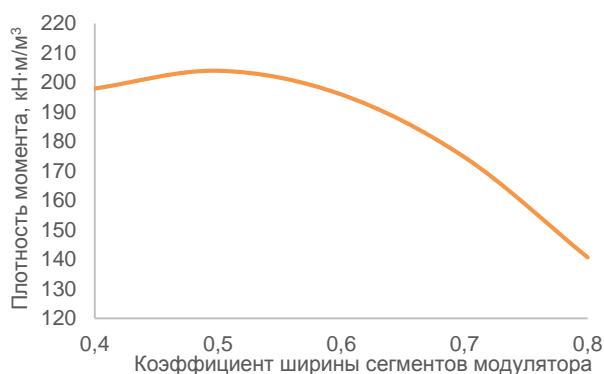


Рис. 6. Зависимость электромагнитного момента модулятора от относительной ширины сегментов модулятора

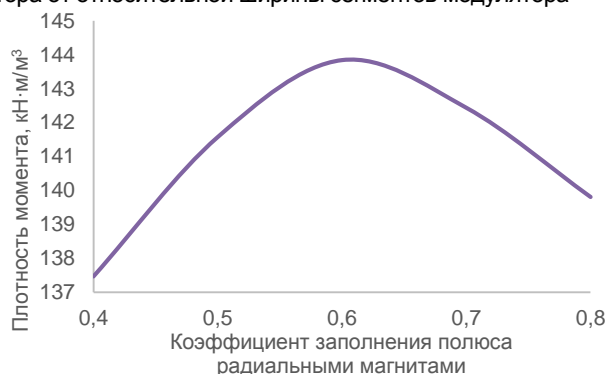


Рис. 7. Зависимость электромагнитного момента модулятора от коэффициента заполнения полюса радиальными магнитами



Рис. 8. Зависимость электромагнитного момента модулятора от ширины магнитопровода статора

По данным графикам были выбраны оптимальные интервалы параметров, которые использовались в качестве начального приближения (табл. 2). Анализ полученных зависимостей (рис. 8) показывает, что при установке магнитной системы Хальбаха магнитопровод статору не требуется.

Оптимизационный расчет. На третьем этапе выполнена многомерная оптимизация геометрических параметров магнитной системы по методу Нелдера–Мида для определения максимально достижимой плотности момента и выбора габаритов с учетом требуемого момента. В качестве целевой функции было задано условие максимизации плотности электромагнитного момента. Изменяемыми параметрами стали относительная ширина сегментов модулятора k_b , коэф-

фициент заполнения полюса радиальными магнитами k_{fr} . Картина магнитной индукции показана на рис. 9, параметры геометрии по результатам оптимизации сведены в табл. 2 (правый столбец).

Таблица 2. Параметры передачи с магнитной системой Хальбаха на статоре для привода вспомогательного механизма

Параметры	Начальное приближение	Результат оптимизации
Неизменяемые параметры		
Передающее отношение u	2,2	
Число пар полюсов ротора p_r	15	
Число пар полюсов статора p_s	18	
Число сегментов модулятора z_m	33	
Внешний диаметр статора D_s , м	0,26	
Ширина модулятора h_m , м	0,008	
Оптимизируемые параметры		
Относительная ширина сегментов модулятора k_b	0,4–0,6	0,557
Коэффициент заполнения полюса радиальными магнитами k_{fr}	0,5–0,7	0,501

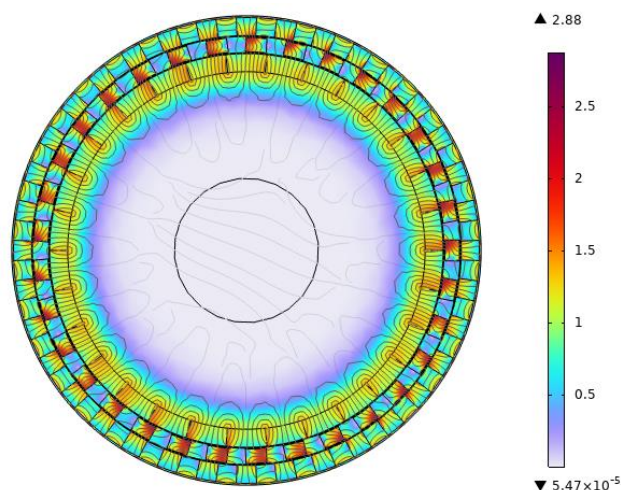


Рис. 9. Картина магнитной индукции

Поскольку тангенциально намагниченные магниты на статоре выполняют функцию магнитопровода, статору не требуется сердечник и магниты могут быть закреплены непосредственно на корпус. За счет этого достигается как увеличение объема магнитов при том же объеме передачи, так и увеличение средних диаметров магнитных колес. Согласно (3), при увеличении расстояния от центра вращения до места приложения электромагнитных сил увеличивается развиваемый ими момент. Благодаря этому в меньшем объеме передачи может быть

получен больший передаваемый момент. В данном варианте конструкции плотность момента достигла $330 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$, что больше первоначального результата ($92 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$) в 3,6 раза. По сравнению с высокооптимальной магнитной передачей с обычной магнитной системой объем устройства может быть уменьшен на 39,4 %.

Моделирование передачи с магнитной системой Хальбаха на роторе. При моделировании магнитной системы Хальбаха на роторе и обычной магнитной системы на статоре еще на этапе определения начальных приближений было выяснено, что со снижением коэффициента заполнения полюсов ротора радиально намагниченными магнитами плотность момента будет падать (рис. 10).

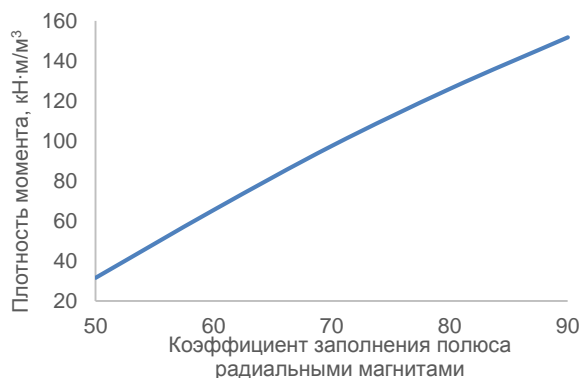


Рис. 10. Зависимость электромагнитного момента модулятора от коэффициента заполнения полюса радиальными магнитами для ротора

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что установка тангенциально намагниченных магнитов на ротор не даст выигрыша по плотности момента, поэтому нет смысла усложнять конструкцию ротора.

Итоговые параметры геометрии магнитной системы. Таким образом, для дальнейшей разработки имеет смысл принять конструкцию, включающую магнитную систему Хальбаха на статоре и обычную магнитную систему на роторе. Оптимальные геометрические параметры, отраженные в табл. 2, представим в относительном виде, отнесенном к внешнему диаметру статора (табл. 3).

Таблица 3. Итоговые параметры передачи с магнитной системой Хальбаха в относительном виде

Параметр	Абсолютное значение, мм	Относительное значение
Ширина сегментов модулятора k_b	11,6	0,56
Ширина радиальных магнитов k_r	10,4	0,5
Средний диаметр внутреннего воздушного зазора D_{IAGM}	109,5	0,84
Средний диаметр внешнего воздушного зазора D_{OAGM}	118,5	0,91

С учетом полученной плотности момента для выполнения требований, представленных в исходных данных, был принят наружный диаметр статора 220 мм и осевая длина 170 мм.

Оценка материалоемкости магнитной системы Хальбаха. С точки зрения практического применения интерес представляет не только высокий удельный момент, но и итоговая стоимость единицы момента. В настоящем исследовании проведено сравнение стоимости активных материалов, необходимых для изготовления приведенной в [7] магнитной передачи и передачи с магнитной системой Хальбаха. Для расчетов стоимость 1 кг магнитного сплава N45 принята равной 90 \$, а стали 2421 – 1,41 \$. Стоимость рассчитывалась для двух вариантов, предназначенных для передачи максимального момента $2 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнение стоимости магнитных передач

Магнитная система	Масса активных материалов, кг	Стоимость активных материалов, \$	Стоимость единицы момента, \$/кН·м
Обычная	57,4	1406,9	703,4
Хальбаха	35,7	1345,7	672,8

Таким образом, масса активных материалов снизилась на 37,8 %, стоимость единицы момента – на 4,4 %, что говорит о целесообразности внедрения предлагаемой конструкции.

Диагностика эксцентриситета ротора в магнитной передаче с магнитной системой Хальбаха. Важным вопросом нормального функционирования магнитной передачи в составе привода является своевременная диагностика неисправностей. Одним из вариантов таких неисправностей может стать эксцентриситет ротора, появившийся в результате изгиба быстрого вала. Такая неисправность может появиться в результате работы привода в условиях сильных вибраций, например как в рассматриваемом приводе, при разбалансировке дизеля. Для изучения поведения магнитной передачи при проявлении такой неисправности в выше описанную модель был введен эксцентриситет. Как показали расчеты, вращающие моменты не изменились, но появилась несбалансированная радиальная сила (рис. 11).

Анализ графика показывает, что по мере увеличения эксцентриситета увеличивается величина и пульсации некомпенсированной радиальной силы. Данная сила возникает в результате одностороннего магнитного тяжения и создает нагрузку на подшипники. Внешне это будет проявляться в виде вибрации, шума и нагрева подшипников в результате их перегрузки. Отслеживать эти параметры можно на слух, на ощупь и при помощи пирометра.

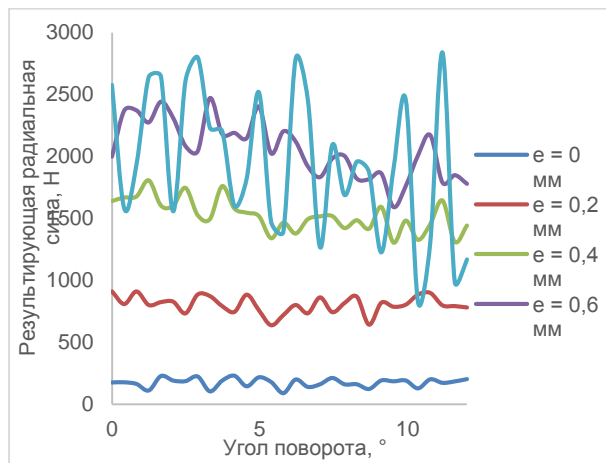


Рис. 11. Форма кривых радиальных сил при различном эксцентриситете ротора

Выводы. Анализ результатов расчета показывает, что внедрение магнитной системы Хальбаха на статор позволяет сократить объем магнитной системы на 39,4 %, массу на 37,8 %, стоимость единицы момента на 4,4 %. То есть применять такую магнитную систему на статоре целесообразно – благодаря этому можно отказаться от магнитопровода статора. Установка же такой конструкции на ротор не дает увеличения плотности момента и потому нецелесообразна. Отмечено, что в рассматриваемых условиях эксплуатации может возникать такая неисправность, как эксцентриситет ротора. В качестве возможных путей оперативной диагностики следует отметить осмотр и прослушивание магнитной передачи в работающем состоянии, а также термометрию подшипников.

Список литературы

1. Филонов С.П., Зиборов А.Е., Ренкунас В.В. Тепловозы 2ТЭ10М, 3ТЭ10М: Устройство и работа. – М.: Транспорт, 1986. – 288 с.
2. Филонов С.П., Гибалов А.И., Никитин Е.А. Тепловоз 2ТЭ116. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1996. – 334 с.
3. Шаройко П.М., Середя В.Т. Гидравлические передачи тепловозов. – М.: Транспорт, 1969. – 160 с.
4. Анализ особенностей эксплуатации частотно-регулируемого электропривода компрессора вагона метро / В.Н. Остриров, А.С. Анучин, А.А. Габидов, Д.В. Репецкий // Промышленная энергетика. – 2013. – № 9. – С. 14–16.
5. Молоканов О.Н. Разработка оптимальной конструкции и методов расчета бесконтактной магнитной передачи. – М.: на правах рукописи, 2017. – 153 с.
6. Magnetic gear: Radial force, cogging torque, skewing and optimization / G. Jungmayr, J. Loeffler, B. Winter, et al. // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Montreal, QC, Canada, 2015. – P. 898–905. DOI: 10.1109/ICEM.2016.7475900.
7. Taritsyn D.S., Molokanov O.N., Orlov D.A. Development of Magnetic Transmission for Auxiliary Drives // 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering

(REEPE). – Moscow, 2025. – P. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10970764.

8. Experimentally Testing a Halbach Rotor Coaxial Magnetic Gear With 279 Nm/L Torque Density / H.Y. Wong, H. Baninajar, B.W. Dechant, et al. // IEEE Trans. Energy Convers. – March 2023. – Vol. 38, issue 1. – P. 507–518. DOI: 10.1109/TEC.2022.3208320.

9. Design, Fabrication, Test, and Benchmark of a Magnetically Geared Permanent Magnet Generator for Wind Power Generation / A.B. Kjaer, S. Korsgaard, S.S. Nielsen, et al. // IEEE Transactions on Energy Conversion. – March 2020. – Vol. 35, issue 1. – P. 24–32. DOI: 10.1109/TEC.2019.2951998.

10. Jian L., Chau K.T. A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2010. – Vol. 25, no. 2. – P. 319–328. DOI: 10.1109/TEC.2010.2046997.

11. Johnson M., Gardner M.C., Toliyat H.A. Analysis of axial field magnetic gears with Halbach arrays // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – Coeur d'Alene, ID, USA, 2015. – P. 108–114. DOI: 10.1049/cds2.12023.

12. Huang H., Qu R., Bird J. Performance of Halbach Cycloidal Magnetic Gears with Respect to Torque Density and Gear Ratio // 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – San Diego, CA, USA, 2019. – P. 1977–1984. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785259.

13. An Asymmetric Pole Coaxial Magnetic Gear With Unequal Halbach Arrays and Spoke Structure / L. Jing, Z. Huang, J. Chen, R. Qu // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2020. – Vol. 30, no. 4. – P. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2020.2968043.

14. Меренцев С.П. Компрессоры локомотивов. – М.: Транспорт, 1974. – 80 с.

15. Соколова Е.М., Мощинский Ю.А. Аналитический метод расчета магнитного редуктора // Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий АПЭЭТ-2017: сб. науч. тр. Междунар. конф., Екатеринбург, 13–16 ноября 2017 года. – Екатеринбург, 2017. – С. 127–130.

References

1. Filonov, S.P., Ziborov, A.E., Renkunas, V.V. *Teplivozy 2TE10M, 3TE10M: ustroystvo i rabota* [Diesel locomotives 2TE10M, 3TE10M series: Design and operation]. Moscow: Transport, 1986. 288 p.
2. Filonov, S.P., Gibalov, A.I., Nikitin, E.A. *Teplivoz 2TE116* [Diesel locomotive 2TE116 series]. Moscow: Transport, 1996. 334 p.
3. Sharoyko, P.M., Sereda, V.T. *Gidravlicheskie peredachi teplivozov* [Hydraulic transmissions of diesel locomotives]. Moscow: Transport, 1969. 160 p.
4. Ostrirov, V.N., Anuchin, A.S., Gabidov, A.A., Repetsky, D.V. Analiz osobennostey ekspluatatsii chastotno-reguliruemogo elektroprivoda kompressora vagona metro [Analysis of operational features of a frequency-controlled electric drive for a subway car compressor]. *Promyshlennaya energetika*, 2013, no. 9, pp. 14–16.
5. Molokanov, O.N. *Razrabotka optimal'noy konstruktsii i metodov rascheta beskontaktnoy magnitnoy peredachi* [Development of an Optimal Design and Calculation Methods for a Contactless Magnetic Gear]. Moscow: manuscript, 2017. 153 p.
6. Jungmayr, G., Loeffler, J., Winter, B., Jeske, F., Amrhein, W. Magnetic gear: Radial force, cogging torque, skewing and optimization. *IEEE Energy Conversion*

Congress and Exposition (ECCE). Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 898–905. DOI: 10.1109/ICEM.2016.7475900.

7. Taritsyn, D.S., Molokanov, O.N., Orlov, D.A. Development of Magnetic Transmission for Auxiliary Drives. 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, 2025, pp. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10970764.

8. Wong, H.Y., Baninajar, H., Dechant, B.W., Southwick, P., Bird, J.Z. Experimentally Testing a Halbach Rotor Coaxial Magnetic Gear With 279 Nm/L Torque Density. IEEE Trans. Energy Convers, March 2023, vol. 38, issue 1, pp. 507–518. DOI: 10.1109/TEC.2022.3208320.

9. Kjaer, A.B., Korsgaard, S., Nielsen, S.S., Demsa, L., Rasmussen, P.O. Design, Fabrication, Test, and Benchmark of a Magnetically Geared Permanent Magnet Generator for Wind Power Generation. IEEE Transactions on Energy Conversion, March 2020, vol. 35, issue 1, pp. 24–32. DOI: 10.1109/TEC.2019.2951998.

10. Jian, L., Chau, K.T. A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 319–328. DOI: 10.1109/TEC.2010.2046997.

11. Johnson, M., Gardner, M.C., Toliyat, H.A. Analysis of axial field magnetic gears with Halbach arrays.

2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Coeur d'Alene, ID, USA, 2015, pp. 108–114. DOI: 10.1049/cds2.12023.

12. Huang, H., Qu, R., Bird, J. Performance of Halbach Cycloidal Magnetic Gears with Respect to Torque Density and Gear Ratio. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1977–1984. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785259.

13. Jing, L., Huang, Z., Chen, J., Qu, R. An Asymmetric Pole Coaxial Magnetic Gear With Unequal Halbach Arrays and Spoke Structure. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 1–5.

14. Merentsev, S.P. *Kompressory lokomotivov* [Locomotive Compressors]. Moscow: Transport, 1974. 80 p.

15. Sokolova, E.M., Moshchinskiy, Yu.A. Analiticheskiy metod rascheta magnitnogo reduktora [Analytical Method for Calculating a Magnetic Gear]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy elektromekhaniki i elektrotehnologii APEET-2017»*, Ekaterinburg, 13–16 noyabrya 2017 goda [Proceedings of research papers of international conference “Current issues in electromechanics and electrical technology APEET-2017”, Ekaterinburg, 13–16 November 2017]. Ekaterinburg, 2017, pp. 127–130.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.51, 371.693

Антон Владимирович Голубев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой систем управления, Россия, Иваново, e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Игорь Константинович Муравьев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления, Россия, Иваново, e-mail: muraviev@gapps.ispu.ru

Игорь Анатольевич Пересыпкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры систем управления, Россия, Иваново, e-mail: ispolatov.snip1945@yandex.ru

Анатолий Сергеевич Обуваев

ООО «Тренажеры для электростанций», кандидат технических наук, Россия, Москва, e-mail: inf@fpss.ru

Интерактивный компьютерный тренажер – современное средство подготовки оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время компьютерные тренажеры находят все более широкое применение в подготовке операторов, технического и ремонтного персонала, занятого на тепловых и атомных электростанциях. Применение обучающих тренажеров предоставляет сотрудникам электростанций возможность накапливать ценный практический опыт действий в условиях нештатных ситуаций, возникающих при отклонениях от нормального хода технологических процессов. При этом оперативный персонал цехов тепловой автоматики и измерений и АСУТП выполняет на электростанции важнейшую функцию – обеспечивает контроль работоспособности и поддержание в исправном состоянии всех технических и программных средств АСУТП энергоблока. Однако применяемые на тепловых и атомных электростанциях методы обучения оперативного персонала цехов тепловой автоматики и измерений и АСУТП (теоретическая подготовка, стажировка на рабочих местах ремонтного и оперативного персонала цехов тепловой автоматики и измерений и АСУТП) отстают от современных требований к темпам развития отрасли. Цель исследования заключается в разработке интерактивного тренажера для подготовки оперативного персонала цехов тепловой автоматики и измерений и АСУТП с виртуальным моделированием полевой зоны КИПиА.

Материалы и методы. Функционирование системы обучения обеспечивается программно-аппаратной инфраструктурой, расположенной на серверной части тренажера с операционной системой Linux. Инструментарий программиста представляет собой специализированный программный комплекс SIM-2000. Тестирование и наладка разработанных моделей оборудования полевого уровня (модели датчиков и линий подключений) проведена в среде динамического моделирования SimInTech.

Результаты. Разработана подсистема визуализации средств КИПиА для полевого оборудования ТЭС, в которой модели датчиков, приборов и исполнительных механизмов интегрируются в состав современных компьютерных тренажеров энергоблоков и обеспечивают реалистичное визуальное моделирование полевого оборудования. Разработаны модели устройств КИПиА, которые дают возможность диагностировать состояние датчиков и исполнительных механизмов, при необходимости изменять их технологическое подсоединение к линиям

питания, а также проводить их настройку, проверку исправности, контроль линий подключения к программно-техническому комплексу и другим приборам.

Выводы. Полученные результаты позволяют проводить комплексное обучение персонала оперативной смены блока по решению задач управления, обслуживания, поиска и устранения неисправностей средств КИПиА.

Ключевые слова: система обучения персонала, средства КИПиА, компьютерные тренажеры, операторский интерфейс, диагностика неисправностей

Anton Vladimirovich Golubev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of Control Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Igor Konstantinovich Muraviev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Control Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: muraviev@gapps.ispu.ru

Igor Anatolyevich Peresykin

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant Professor of Control Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Anatoly Sergeevich Obuvaev

LLC "Simulators for Power Plants", Candidate of Engineering Sciences (PhD), Russia, Moscow, e-mail: inf@fpps.ru

Interactive computer simulator as a modern means of training operational personnel of thermal automation and measurement and automated process control systems shops

Abstract

Background. Computer simulators are widely used to train operators, technical and maintenance personnel at thermal and nuclear power plants (TPPs and NPPs). The use of training simulators provides power plant employees with the opportunity to gain valuable practical experience in case of emergency situations when technological processes deviate from normal operation. At the same time, operating personnel in the thermal automation and measurement (TAM) and process control systems (PCS) shops perform a vital function at the power plant. They ensure the performance monitoring and maintenance of all hardware and software components of the PCS of power unit. However, the training methods used at TPPs and NPPs for operating personnel in the TAM and PCS shops (theoretical training, on-the-job training for maintenance and operating personnel in the TAM and PCS shops) lag behind the current pace of industry development. The aim of the study is to develop an interactive simulator for training operational personnel of thermal automation and measurement shops and automated process control systems with virtual modeling of the field instrumentation and automation zone.

Materials and methods. The training system is supported by hardware and software located on the server side of the simulator running the Linux operating system. The programmer toolset is the specialized SIM-2000 software suite. Testing and debugging of the developed field-level equipment models (sensors and connection lines) have been conducted using the SimInTech dynamic simulation environment.

Results. A visualization subsystem for instrumentation and automation equipment (I&A) has been developed for TPP field equipment. This subsystem integrates developed models of sensors, devices, and actuators (AM) into modern computer simulators for power units, providing realistic visual modeling of field equipment. I&A device models have been developed that enable diagnostics of the condition of sensors and AM, adjusting their process connections to power lines, if necessary, as well as configuring them, checking their functionality, and monitoring their connections to the software and hardware suite and other devices.

Conclusions. The obtained results enable comprehensive training for the operational shift personnel of the unit to solve the problem of control, maintenance, and troubleshooting of instrumentation and automation equipment.

Key words: personnel training system, instrumentation and automation, computer simulators, operator interface, fault diagnostics

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.075-083

Введение. Прогресс в области автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) в энергетике стимулируется инновациями в энергетическом оборудовании, ужесточением технических стандартов для систем управления и общим развитием вычислительных технологий. В частности, в последние десятилетия компьютерные тренажеры

стали широко использоваться для обучения операторов, обслуживающего и ремонтного персонала тепловых и атомных электростанций [1–4].

Применение компьютерных тренажеров дает возможность персоналу ТЭС и АЭС накапливать практические навыки реагирования на нестандартные ситуации, обусловленные отклонениями параметров оборудования в ходе

технологических процессов и приводящие к аварийным ситуациям на станции. При этом своевременное и точное диагностирование неисправностей и выбор методов их устранения влияет на выполнение ремонтных работ и определяет время простоя оборудования.

Анализ существующих систем подготовки персонала ТЭС и АЭС, согласно научным публикациям [5–8], указывает на то, что основной причиной ошибок является недостаточная организация обучения оперативного и ремонтного персонала.

В настоящее время тренажеры, оборудованные рабочим местом оператора-технолога, в значительной степени имитируют реальные условия труда. Это способствует практической подготовке персонала. Однако вопрос обучения сотрудников, непосредственно занятых на производственных площадках («полевой уровень»), остается открытым и требует решения.

Оперативный персонал цехов тепловой автоматики и измерений (ТАИ) и АСУТП (дежурный электрослесарь, сменный инженер, начальник смены цеха) выполняет на электростанции важнейшую функцию – обеспечивает контроль работоспособности и поддержание в исправном состоянии всех технических и программных средств АСУТП энергоблока, что, в свою очередь, позволяет оперативному персоналу технологических цехов (котлотурбинный, электрический, химический) управлять оборудованием и режимами работы энергоблока.

При этом применяемые на станциях методы обучения оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП (теоретическая подготовка, стажировка на рабочих местах ремонтного и оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП) отстают от современных требований темпов развития отрасли.

Для обучения и поддержания на высоком профессиональном уровне квалификации оперативного персонала технологических цехов на ТЭС и АЭС используются компьютерные тренажеры по оперативным переключениям, которые представляют собой копии рабочих мест машиниста энергоблока/начальника смены котлотурбинного цеха (КТЦ), начальника смены электрического цеха (ЭЦ).

Регулярные операции дежурного электрослесаря включают в себя обслуживание, проверку работоспособности и устранение неисправностей средств контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), схем управления электроприводом запорной и регулирующей аппаратуры, контроллеров, технологических блокировок и защит, ввод в работу и их вывод в ремонт.

Помимо выполнения оперативных переключений, дежурный персонал должен обладать навыком выявления и устранения дефектов и неисправностей, в частности:

- датчиков КИПиА;
- схем управления электроприводом запорной и регулирующей аппаратуры;

- микропроцессорных средств программно-технического комплекса (ПТК), технологических защит и сигнализации.

Актуальность исследования также обусловлена требованиями по обязательной подготовке оперативного персонала на тренажерах, содержащимися в «Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации», «Правилах работы с персоналом в организациях электроэнергетики Российской Федерации», «Правилах организации работы с персоналом на предприятиях и в учреждениях энергетического производства».

Целью исследования является разработка интерактивного тренажера для подготовки оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП с виртуальным моделированием полевой зоны КИПиА.

Технология реализации тренажерного комплекса полевой зоны АСУТП. Методика создания модульной системы обучения персонала КИПиА представлена в [9]. Примером отработки технологии реализации предлагаемого тренажерного комплекса полевой зоны АСУТП с «плоской» визуализацией интерфейса является внедрение данной подсистемы в состав действующих компьютерных тренажеров энергоблоков:

- 300 МВт сверхкритического давления с газомазутным котлом ТГМП-314 производительностью 960 т/ч, конденсационной турбиной К-300-240 и генератором ТВВ-320;

- 200 МВт с газомазутным котлом ТГМЕ-206 производительностью 670 т/ч с промперегревом, конденсационной турбиной К-210-130 и генератором ТВВ-200-2;

- станции с поперечными связями с двумя газомазутными котлами ТГМ-96 производительностью 460/480 т/ч, паровыми турбинами ПТ-80/130 (470 т/ч) и Т-110/130 (480 т/ч);

- парогазового дубль-блока ПГУ-450Т с двумя газотурбинными установками ГТЭ-160, двумя котлами-утилизаторами естественной циркуляции П-96, теплофикационной паровой турбиной Т-150/125-7,7 и двумя генераторами ТФП-160-2У3.

Для тренировки персонала, занимающегося контрольно-измерительными приборами и автоматикой на тепловых электростанциях, в тренажерном комплексе предусмотрена специализированная система обучения. Эта система позволяет готовить как оперативный, так и ремонтный персонал.

Функционирование системы обучения обеспечивается программно-аппаратной инфраструктурой SIM-2000, расположенной на серверной части тренажера. Операционная система Linux управляет работой серверной части тренажерного комплекса. Веб-браузер, использующий защищенный протокол https, предоставляет доступ к интерфейсу тренажера.

Обобщенная схема тренажерного комплекса с подсистемой КИПиА представлена на рис. 1.

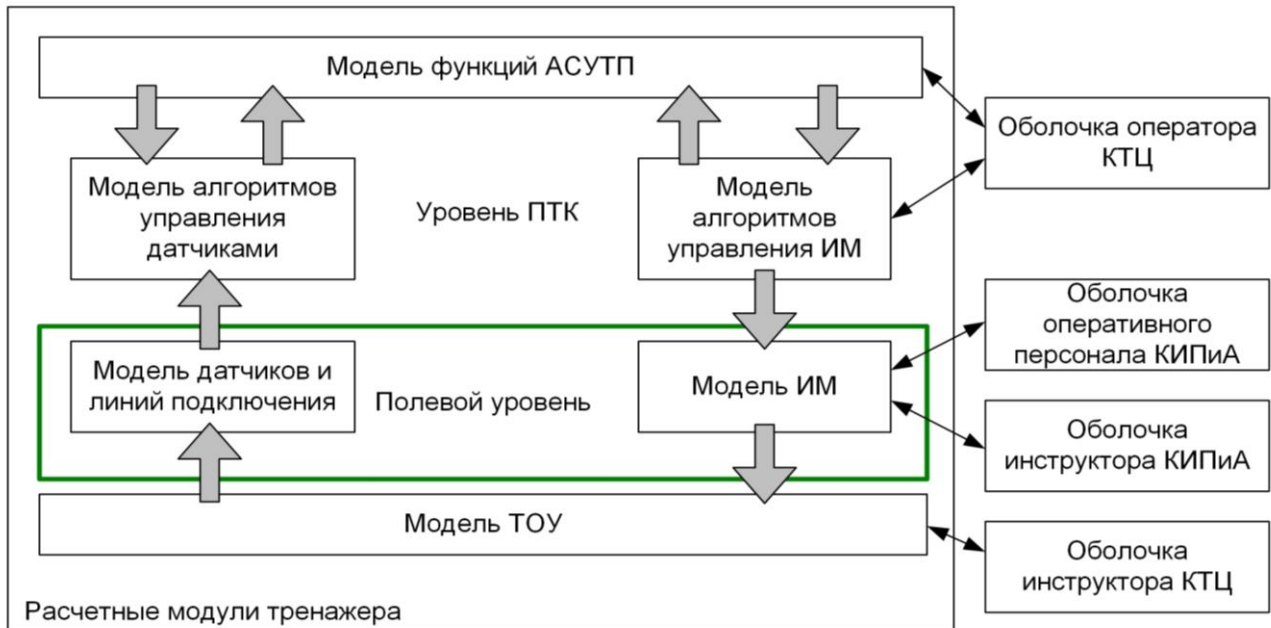


Рис. 1. Обобщенная схема тренажерного комплекса с подсистемой КИПиА: ТОУ – технологический объект управления; ПТК – программно-технический комплекс; ИМ – исполнительный механизм; КТЦ – котлотурбинный цех

В рамках подсистемы обучения оперативного персонала КИПиА реализована имитация полевого оборудования и контуров управления АСУТП.

Для имитации работы различных измерительных устройств в системе реализованы следующие модули:

- моделирование сигналов, генерируемых датчиками температуры на основе термометров сопротивления. Предусмотрены схемы подключения с двумя, тремя и четырьмя проводами. В режиме реального времени воссоздаются электрические сигналы, соответствующие градуировкам ТСП-50, ТСП-100, ТСМ-50 и ТСМ-100;

- эмуляция термопар различного типа (хромель–алюмель, хромель–капель, хромель–константан, платинородий–платина, платинородий–платинородий, вольфрам–рений), при которой формируются соответствующие электрические сигналы, имитирующие показания реальных датчиков;

- модели датчиков расхода измеряемой среды в различных трактах, предусматривающие схему с отдельным источником питания. Моделируется работа с унифицированным сигналом по силе тока в диапазоне 4–20 мА. Система импульсных линий предусматривает управление запорными вентилями, включая уравнивательный. Моделируются неисправности, связанные с возникновением свищей и отложений на внутренних стенках импульсных линий;

- моделирование запорно-регулирующей арматуры в виде визуализации схем контроля и управления задвижек и регулирующих клапанов. Модели предусматривают возможность для контрольных измерений напряжения, силы тока и сопротивления. Подробно представлена релей-

ная часть, что позволяет более детально выявлять и устранять неисправности. Обучаемым предоставлена возможность подключать измерительные приборы в различных участках контуров электрической цепи и на основе показаний измерительных приборов определять характер неисправности и место ее возникновения. Включены модели приводов, силовых шкафов КРУЗАП и блоков управления ФРБУМ, а также соответствующие схемы управления запорной арматурой;

- функции автоматического регулирования, позволяющие оперативно изменять алгоритмы управления, параметры настройки регуляторов и корректирующих устройств в режиме реального времени;

- технологические защиты с функциями, позволяющими оперативно корректировать параметры их работы: изменять настройки, переключать конфигурации каналов, а также осуществлять тонкую настройку самих каналов. Указанные возможности позволяют имитировать нештатные ситуации в работе защит. В частности, можно смоделировать неисправности или спровоцировать ошибочные срабатывания. Такой функционал критичен для тестирования и отладки систем защиты. Он позволяет выявлять потенциальные уязвимости и предотвращать аварийные ситуации.

Методы исследования. Интерактивная модель представляет собой максимально приближенный к реальному визуальный образ физического объекта, включая визуализацию реального изменения положения в пространстве частей и агрегатов прототипа.

Архитектура моделей полевых устройств включает два основных компонента: теплогид-

равлическую модель окружения и электротехническую модель соединения устройства. Более подробно описание архитектуры моделей полевых устройств представлено в [9, 10]. Отметим некоторые особенности ее реализации.

В теплогидравлической модели учитываются типичные неполадки, такие как засорение импульсных линий и их повреждение (например, утечки). При этом принимаются во внимание ошибки измерений, обусловленные некорректной установкой датчиков и другими факторами. В связи с этим для точного моделирования работы устройства необходимо учитывать все аспекты, начиная от конструкции датчика и заканчивая условиями его эксплуатации и потенциальными неисправностями.

Электрическая модель устройства основывается на преобразовании физической величины (давления, температуры или расхода) в электрический сигнал, который передается по электрическим соединениям в ПТК. В основе этой модели лежат законы Ома и Кирхгофа. Она представляет собой систему алгебраических уравнений, описывающих компоненты электрической цепи. К ним относятся: первичный измерительный преобразователь; соединительные линии; клеммные колодки; модуль интерфейса с

объектом (УСО); блок преобразования сигнала и другие элементы.

Помимо типовых компонентов электрической схемы, в модель интегрированы механизмы воздействия на цепь, включая разрывы и обрывы линий, короткие замыкания в линиях и клеммах, дефекты электропитания и прочее. Также предусмотрена возможность подключения измерительных приборов, таких как вольтметр, амперметр и омметр, в контрольных точках цепи.

В качестве примера рассмотрим особенности реализации модели управления задвижкой в составе тренажерного комплекса с подсистемой КИПиА в соответствии с электрической схемой с двумя концевыми выключателями (рис. 2).

Отметим, что функционирование тренажерного комплекса подразумевает его работу в двух основных режимах: «Инструктор» и «Обучаемый».

При работе тренажера в режиме «Инструктор» обеспечиваются возможности по внесению в текущий режим эксплуатации технологического оборудования ТЭС различных тренировочных ситуаций, связанных с неполадками оборудования: короткие замыкания; нарушение контакта соединения проводов; обрывы проводов; неисправности блока питания (БП) и реле и ряд других неисправностей.

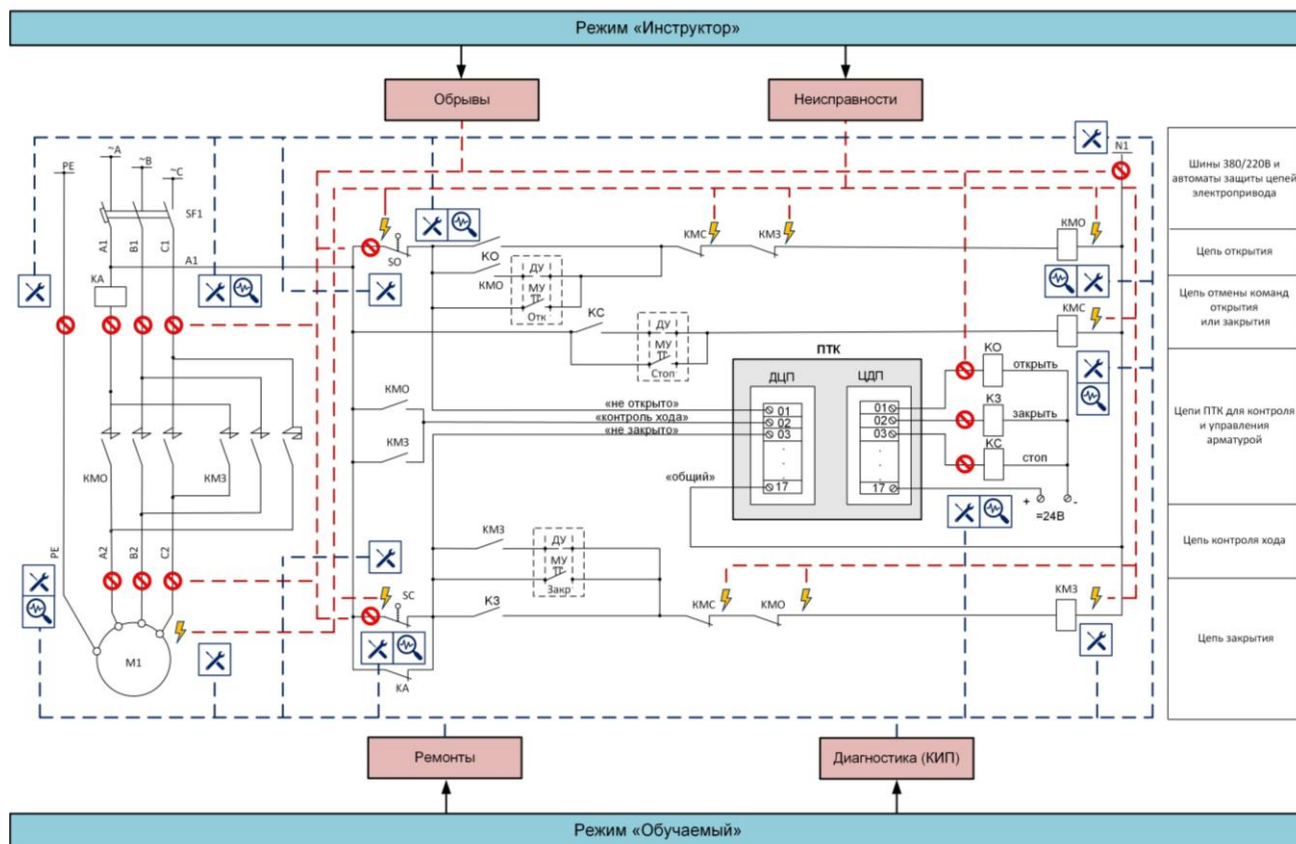


Рис. 2. Особенности реализации модели управления задвижкой в составе тренажерного комплекса с подсистемой КИПиА в соответствии с электрической схемой с двумя концевыми выключателями: ⚡ – замыкание; ⚡ – обрыв; ⚡ – возможность диагностики; ⚡ – возможность ремонта

При работе тренажера в режиме «Обучаемый» обеспечиваются возможности по диагностике: приводов, силовых блоков КРУЗАП, управляющих и контрольных блоков ФРБУМ, а также модулей УСО в ПТК. Обучаемый может выполнять диагностику соответствующей части электрической схемы, например подключать/отсоединять вольтметры для измерения значений величины напряжений на линиях реле концевых выключателей, командных реле, питания ПТК привода или подключать/отсоединять омметры для измерения значений сопротивлений линий реле концевых выключателей. При выявлении неисправностей на

соответствующих участках схемы доступны специальные кнопки выполнения ремонтов. Все функции доступные в режиме «Обучаемый» обеспечиваются также и в режиме «Инструктор».

Результаты исследования. Особенности реализации интерфейса подсистемы визуализации средств КИПиА (полевой зоны) ТЭС в составе компьютерного тренажера рассмотрены ниже на примерах датчика давления и системы управления регулирующей арматуры.

Функциональные возможности датчика давления. Визуализация датчика давления представлена на рис. 3, 4.

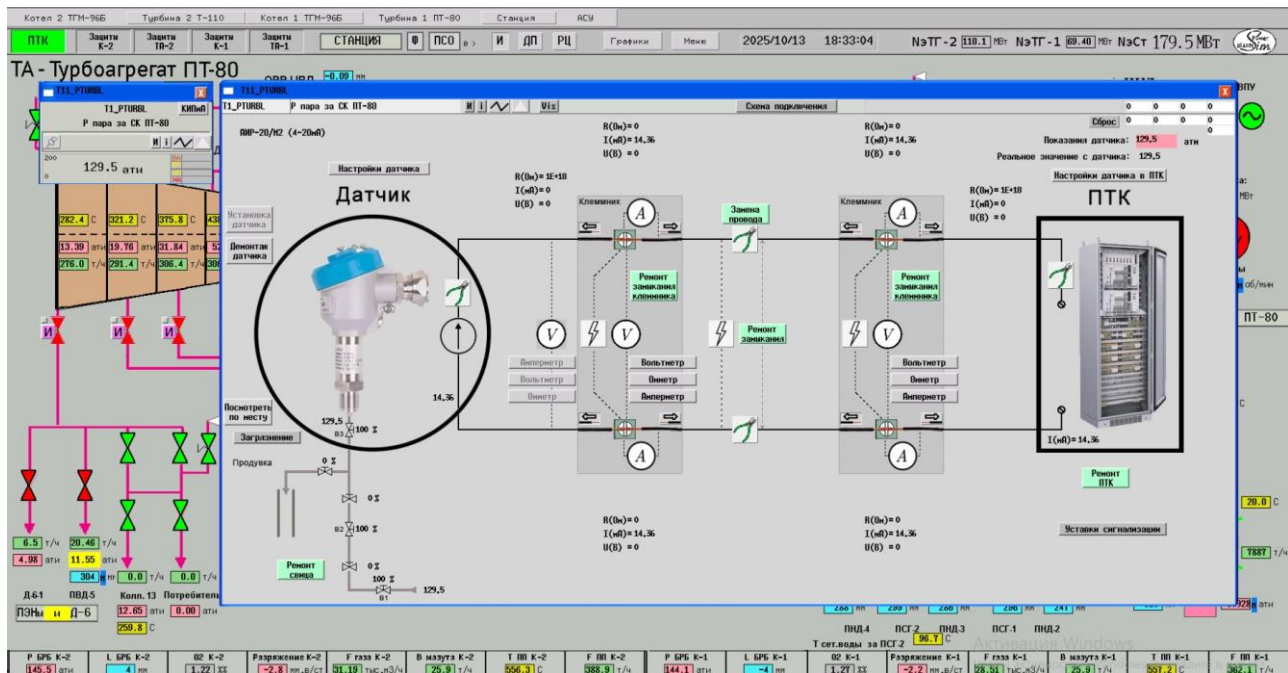


Рис. 3. Вид окна КИПиА для датчика давления в режиме инструктора

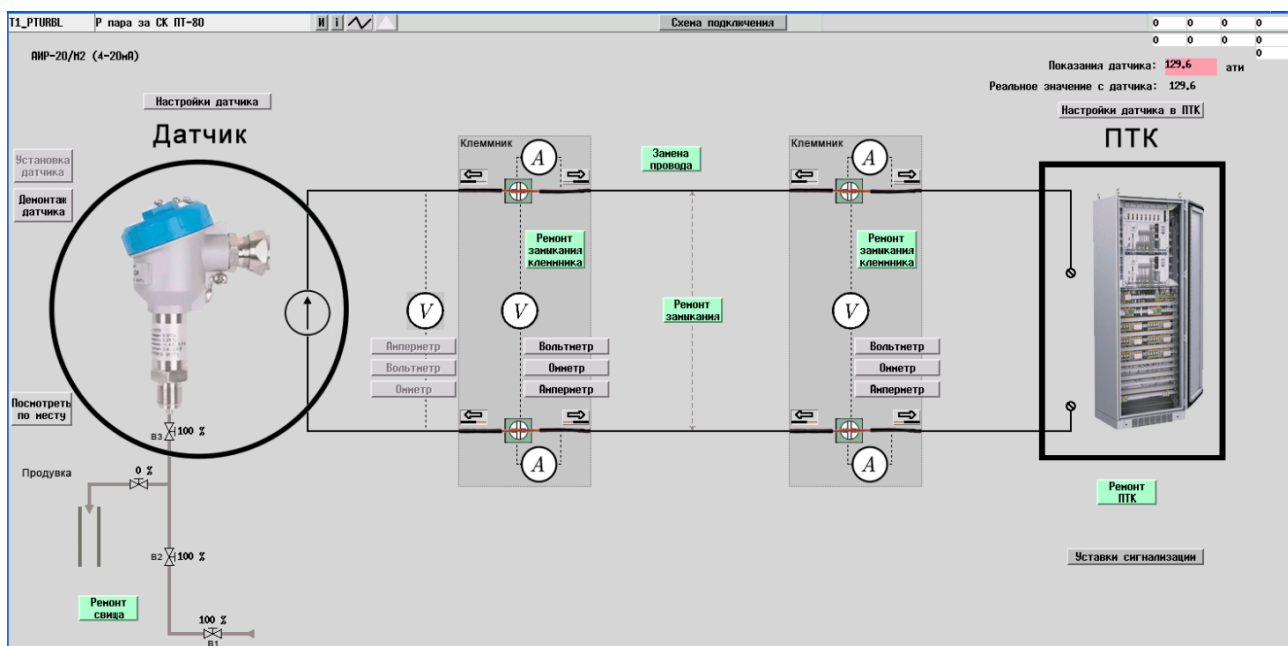


Рис. 4. Вид окна КИПиА для датчика давления в режиме обучаемого

Возможные неисправности и работы по их устранению:

- контроль реального значения с датчика;
- обрывы питания датчика, каждой из соединительных линий и соединения в ПТК;
- короткие замыкания на клеммниках датчика, проводах и клеммниках ПТК;
- задание загрязнения и изменения степени загрязнения;
- проверка и восстановление работоспособности блоков питания датчиков (при наличии внешнего БП), контроль напряжения;
- короткое замыкание линии подключения датчика к ПТК;
- обозначение операций по замене провода подключения датчика к ПТК;
- размыкания и замыкания каждой или нескольких линий подключений на клеммниках датчика и клеммниках ПТК с возможностью подключения амперметра для измерения силы тока;
- подключение и отсоединение вольтметров для измерения значений величины напряжений на линии питания датчика (клеммниках датчика и ПТК);
- подключение и отсоединение омметра для измерения значений величины сопротивления на линии питания датчика (клеммниках датчика и ПТК);
- вывод диалогового окна с настройками датчика, настройками датчика в ПТК и уставок сигнализаций;
- устранение неисправности импульсных линий (свища).

Функциональные возможности системы управления регулирующей арматурой. Визуализация управления регулирующей арматурой представлена на рис. 5, 6.

Возможные неисправности и работы по их устранению:

- поиск и устранение обрывов в силовых кабелях, проверка их функциональности и ремонт. Аналогичные действия производятся и с управляющими линиями: выявление повреждений, тестирование и восстановление работоспособности;
- диагностика и починка неисправностей блоков питания, отвечающих за передачу управляющих команд;
- обрывы и поломки контрольных линий и самих концевых выключателей, включая их проверку и последующее устранение обнаруженных дефектов;
- настройка процентного соотношения срабатывания концевых выключателей исполнительных механизмов (ИМ) при открытии и закрытии; выявление причин неисправностей и их устранение;
- диагностика и ремонт пускателей в комплектном распределительном устройстве с воздушной изоляцией (КРУЗАП);
- перевод управления в дистанционный (ручной) режим и последующая диагностика возникших неполадок;
- изменение времени полного хода ИМ и его настройка в ПТК.

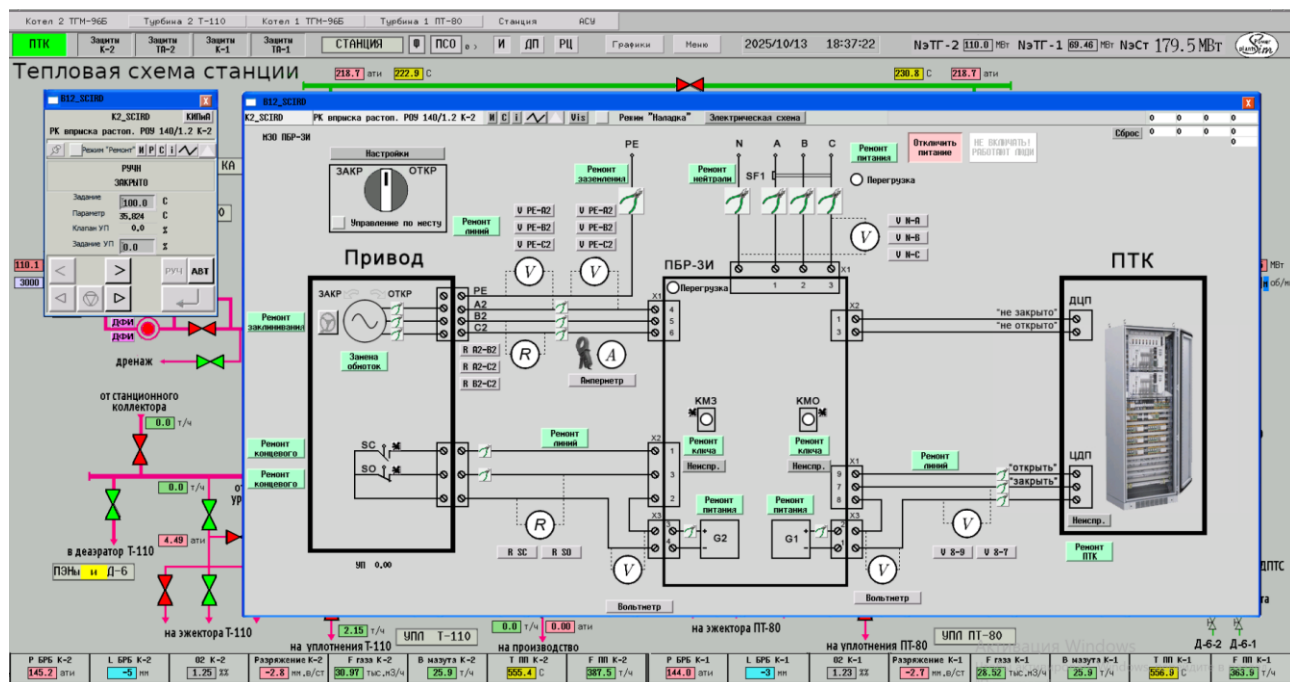


Рис. 5. Вид окна КИПиА для системы управления регулирующей арматурой в режиме инструктора

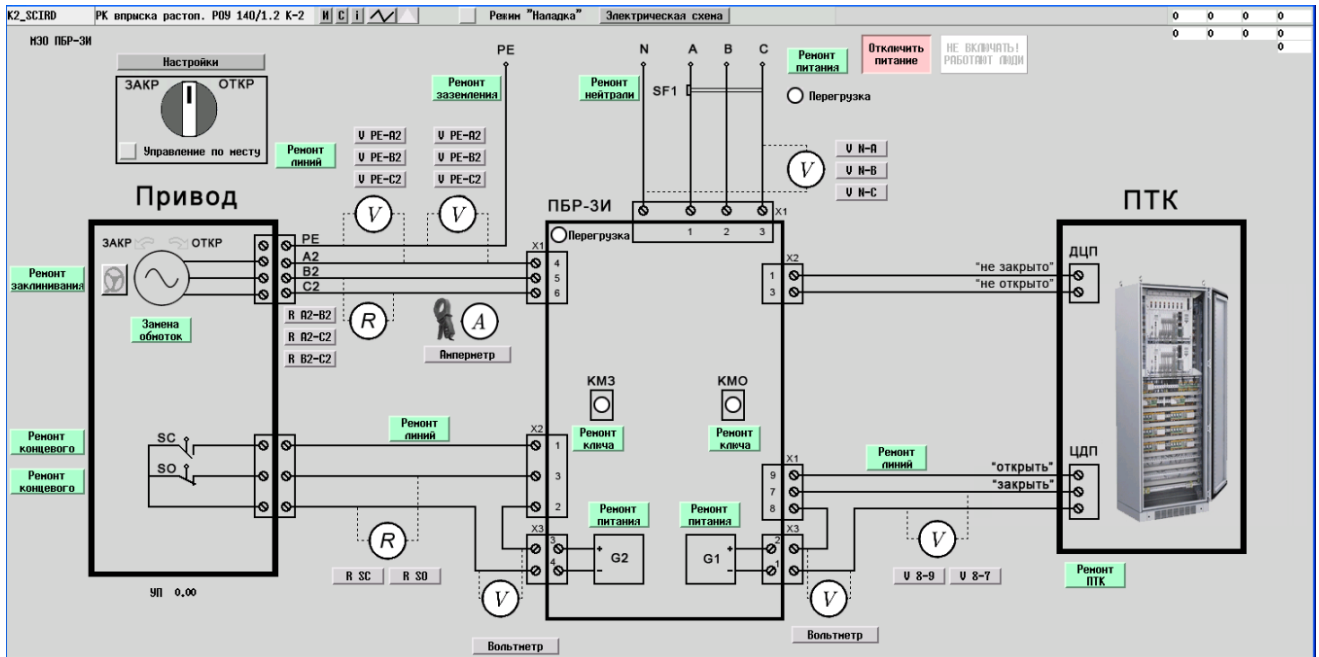


Рис. 6. Вид окна КИПиА для системы управления регулирующей арматурой в режиме обучаемого

В системе управления регулирующей арматурой реализованы следующие неисправности и возможности диагностики:

- обрывы силовых линий;
- обрыв управляющих линий;
- задание неисправности управляющих и силовых линий в КРУЗАП;
- ввод в ремонт реле привода;
- ввод в ремонт линии заземления, питания или нейтрали (при этом устраняется обрыв линии);
- подключение и отсоединение вольтметров для измерения значений величины напряжений на линиях реле концевых выключателей, командных реле, питания ПТК и привода;
- подключение и отсоединение омметров для измерения значений сопротивлений линий реле концевых выключателей;
- вывод диалоговых окон с контролем состояния привода, настройками в ПТК и электрической схемой;
- управление приводом по месту.

Тренажер имеет настраиваемую автоматическую систему оценки испытуемого при тренировке навыков обслуживания средств КИПиА и решении противоаварийных задач. Общая формула вычисления оценки строится на основе следующих критериев:

- баллы за правильно выполненные действия;
- баллы за неправильно выполненные действия;
- баллы за невыполненные действия;
- время на выполнение тех или иных операций по обслуживанию средств КИПиА.

Для системы оценок используются временные и штрафные критерии.

Все операции обучаемого с оборудованием (например, замена реле, подключение измерительных приборов, устранение неисправности и т.д.) переводятся в «рабочее время», основанное на средней продолжительности подобных работ на реальном оборудовании. Суммарное время, затраченное обучающимся на осмотр и ремонт, выводится как временная оценка.

При неправильном проведении ремонтных работ или при проведении работ с нарушением требований техники безопасности обучающемуся начисляются штрафные баллы в зависимости от серьезности ошибки.

По приведенным критериям с определенными коэффициентами формируется итоговая оценка работы обучающегося.

На текущий момент процесс обучения с использованием компьютерного тренажера с подсистемой КИПиА прошли около 1 тыс. сотрудников различных электростанций, которые входят в состав АО «Интер РАО – Электрогенерация» и ПАО «Т Плюс».

Выводы. В разработанной подсистеме визуализации средств КИПиА (полевой зоны) ТЭС разработанные модели датчиков, приборов и исполнительных механизмов интегрируются с действующими компьютерными тренажерами и обеспечивают моделирование полевого оборудования.

Разработанные модели устройств КИПиА позволяют проверить функционирование датчиков и исполнительных механизмов, при необходимости изменять их технологическое подсоединение к линиям питания, а также проводить их настройку, проверку исправности, контроль линий подключения к ПТК и другим приборам.

Результаты исследования позволяют проводить комплексное обучение персонала оперативной смены по решению как задач ведения режимов энергоблока, так и задач управления, обслуживания, поиска и устранения неисправностей средств КИПиА.

Список литературы

1. **Технологии** виртуальной реальности как один из эффективных инструментов обучения на предприятиях энергетики / И.В. Путилова, П.П. Ершевич, Е.В. Скрипкина, К.С. Никишов // Энергия единой сети. – 2024. – № 3-4(74). – С. 46–55.
2. **Volman M.** Computer modeling and simulators as part of university training for NPP operating personnel // 2017 Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 781, No. 1. – P. 012055. DOI:10.1088/1742-6596/781/1/012055.
3. **Operator** training simulators in virtual reality environment for process operators: a review / D.S. Patle, D. Manca, S. Nazir, S. Sharma // Virtual Reality. – 2019. – Vol. 23. – P. 293–311.
4. **Дозорцев В.М.** Технологии виртуальной реальности в обучении операторов технологических процессов // Автоматизация в промышленности. – 2018. – № 6. – С. 42–50.
5. **Рабенко В.С., Мошкарин А.В.** Повышение безопасности, надежности, экономичности и продление срока службы оборудования предприятий тепловой энергетики средствами новых компьютерных технологий подготовки оперативного персонала // Энергосбережение и водоподготовка. – 2002. – № 2. – С. 64–71.
6. **Ишкильдин Р.Р.** Система поддержки процессов разработки тренажеров, автоматизированных технологических комплексов // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13, № 4. – С. 220–225.
7. **Тверской Ю.С., Аракелян Э.К., Кузнецов С.И.** Подготовка и повышение квалификации специалистов в области современных АСУ ТП электростанций // Теплоэнергетика. – 2006. – № 11. – С. 70–74.
8. **Опыт** и особенности инновационной подготовки специалистов по автоматизации на полигоне АСУТП электростанций / Ю.С. Тверской, Е.С. Целищев, А.В. Голубев и др. // Автоматизация в промышленности. – 2019. – № 9. – С. 11–17.
9. **Совершенствование** системы обучения персонала цеха контрольно-измерительных приборов и автоматики на компьютерном тренажере / А.В. Голубев, И.К. Муравьев, А.Н. Никоноров и др. // Вестник Московского энергетического университета. – 2024. – № 3. – С. 107–112.
10. **Разработка** системы обучения персонала КИПиА и ее интеграция с компьютерным тренажером ТЭС / А.В. Голубев, И.К. Муравьев, А.Н. Никоноров и др. // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 4. – С. 3–11. DOI:10.25728/avtprom.2023.04.01.11.

References

1. Putilova, I.V., Ershevich, P.P., Skripkina, E.V., Nikishov, K.S. Tekhnologii virtual'noy real'nosti kak odin iz

effektivnykh instrumentov obucheniya na predpriyatiyakh energetiki [Virtual reality technologies as one of the effective training tools at energy enterprises]. *Energiya edinoi seti*, 2024, no. 3-4(74), pp. 46–55.

2. Volman, M. Computer modeling and simulators as part of university training for NPP operating personnel. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 781, no. 1, p. 012055. DOI:10.1088/1742-6596/781/1/012055.

3. Patle, D.S., Manca, D., Nazir, S., Sharma, S. Operator training simulators in virtual reality environment for process operators: a review. *Virtual Reality*, 2019, vol. 23, pp. 293–311.

4. Dozortsev, V.M. Tekhnologii virtual'noy real'nosti v obuchenii operatorov tekhnologicheskikh protsessov [Virtual reality technologies in training process operators]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2018, no. 6, pp. 42–50.

5. Rabenko, V.S., Moshkarin, A.V. Povyshenie bezopasnosti, nadezhnosti, ekonomichnosti i prodlenie sroka sluzhby oborudovaniya predpriyatiy teplovoy energetiki sredstvami novykh komp'yuternykh tekhnologiy podgotovki operativnogo personala [Improving the safety, reliability, efficiency and extending the service life of equipment at thermal power plants using new computer technologies for training operational personnel]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2002, no. 2, pp. 64–71.

6. Ishkil'din, R.R. Sistema podderzhki protsessov razrabotki trenazherov, avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh kompleksov [System for supporting processes of development of simulators, automated technological complexes]. *Neftgazovoe delo*, 2015, vol. 13, no. 4, pp. 220–225.

7. Tverskoy, Yu.S., Arakelyan, E.K., Kuznetsov, S.I. Podgotovka i povyshenie kvalifikatsii spetsialistov v oblasti sovremennykh ASU TP elektrostantsiy [Training and advanced training of specialists in the field of modern automated process control systems for power plants]. *Teploenergetika*, 2006, no. 11, pp. 70–74.

8. Tverskoy, Yu.S., Tselishchev, E.S., Golubev, A.V., Nikonorov, A.N., Murav'ev, I.K. Opyt i osobennosti innovatsionnoy podgotovki spetsialistov po avtomatizatsii na poligone ASUTP elektrostantsiy [Experience and features of innovative training of automation specialists at the site of automated process control systems for power plants]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2019, no. 9, pp. 11–17.

9. Golubev, A.V., Murav'ev, I.K., Nikonorov, A.N., Naumov, Yu.V., Obuvaev, A.S. Sovershenstvovanie sistemy obucheniya personala tsekha kontrol'no-izmeritel'nykh priborov i avtomatiki na komp'yuternom trenazhere [Improving the training system for personnel of the instrumentation and automation shop on a computer simulator]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo universiteta*, 2024, no. 3, pp. 107–112.

10. Golubev, A.V., Murav'ev, I.K., Nikonorov, A.N., Naumov, Yu.V., Obuvaev, A.S., Tselishchev, E.S. Razrabotka sistemy obucheniya personala KIPiA i ee integratsiya s komp'yuternym trenazherom TES [Development of a training system for instrumentation and automation personnel and its integration with a computer simulator for thermal power plants]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2023, no. 4, pp. 3–11. DOI: 10.25728/avtprom.2023.04.01.11.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.311.22

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Антон Валерьевич Огурцов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: ogurtsovav@mail.ru

Александр Сергеевич Шмелев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: shml.alx@gmail.com

Илья Андреевич Кокулин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13,
e-mail: ilyakokulin@gmail.com

Моделирование разделения дисперсных сред в многоступенчатой установке с рециркуляцией нецелевых продуктов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Процессы разделения сыпучих материалов по крупности зерен широко используются в строительной, химической, обогатительной и энергетической отраслях промышленности. От эффективности процесса классификации часто зависит эффективность производства, в котором используется полученные порошки. В связи с этим повышение качества готовых порошков на основе моделирования и совершенствования технологий их получения представляется актуальной задачей.

Материалы и методы. Моделирование процессов классификации в отдельной ступени и в системе классификаторов выполнено с использованием кривой разделения для отдельной ступени и кривой разделения для анализируемой системы аппаратов.

Результаты. Построена модель для одного-, двух- и трехрядного расположения ступеней с учетом и без учета рециркуляции нецелевых продуктов разделения. Показано, что организация рециркуляции существенно повышает качество целевых продуктов. На базе полученных решений разработаны рекомендации по повышению эффективности процессов разделения сыпучих материалов в многоступенчатых классифицирующих системах.

Выводы. Предложенные алгоритм и метод расчета, позволяют находить оптимальные схемы и режимы работы классифицирующих многоступенчатых установок.

Ключевые слова: дисперсные материалы, классификация по крупности, многоступенчатые системы, кривая разделения, рециркуляция промежуточных продуктов

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Anton Valerievich Ogurtsov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ogurtsovav@mail.ru

Alexander Sergeevich Shmelev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: shml.alx@gmail.com

Ilya Andreevich Kokulin

Ivanovo State Power University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: ilyakokulin@gmail.com

Modeling the separation of dispersed media in a multistage unit with recirculation of non-target products

Abstract

Background. Processes to separate bulk materials by grain size are widely used in the construction, chemical, mineral processing, and energy industries. The efficiency of the production process that uses the resulting powders often depends on the efficiency of the classification process. Therefore, improving the quality of finished powders based on modeling and improving their production technologies is a pressing issue.

Materials and methods. Modeling of classification processes in a separate stage and in a system of classifiers has been performed using a separation curve for a separate stage and the analyzed system of devices.

Results. A model has been developed for single-, dual-, and triple-row stage arrangements, with and without recirculation of non-target separation products. It has been shown that recirculation significantly improves the quality of the target products. Based on the obtained solutions, recommendations have been developed to improve the efficiency of bulk material separation processes in multi-stage classification systems.

Conclusions. The proposed algorithm and calculation method allow us to find optimal schemes and operating modes of classifying multi-stage installations.

Key words: dispersed materials, size classification, multi-stage systems, separation curve, recirculation of intermediate products

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.084-090

Введение. Процессы разделения сыпучих материалов по крупности зерен широко используются в строительной, химической, обогащательной и энергетической отраслях промышленности [1–6]. От эффективности данного процесса часто зависит эффективность основного производства, в котором используется полученный порошок. Например, в энергетике от крупности частиц измельченного топлива зависит эффективность и полнота его сгорания в энергетических установках [7–9]. В химической промышленности размер частиц реагента во многом определяет скорость химической реакции и производительность реактора по готовому продукту [10]. Если разделяемые компоненты на обогащательных фабриках различаются по размерам, то разделение частиц по крупности приводит к обогащению продукта целевым компонентом [11–12]. Следует отметить, что в приведенных примерах повышение качества основного производства напрямую зависит от размеров частиц и качества порошков, что, в свою очередь, обуславливает актуальность исследований, направленных на повышение качества приготовления и классификации дисперсных материалов.

Методы исследования. Моделирование процессов классификации в отдельной ступени и в системе классификаторов выполнено с использованием кривой разделения [2] и известных комбинаторных соотношений [13].

Результаты исследования. Целью исследования является разработка модели многоступенчатого классификатора с рециркуляцией промежуточных нецелевых продуктов, позволяющей решать задачи повышения эффективности разделения путем выбора оптимальных режимов и схем соединения ступеней анализируемых систем.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

1) разработка математической модели многоступенчатой классифицирующей установки, учитывающей структуру соединения ступеней и возможность организации рециркуляции промежуточных нецелевых продуктов;

2) постановка и решение задачи выбора оптимальной структуры многоступенчатой классифицирующей системы;

3) постановка задачи выбора оптимального режима многоступенчатого классификатора.

Наибольший интерес при анализе многоступенчатых классификаторов вызывают вопросы выбора числа ступеней, организации потоков частиц между ступенями, получения при классификации нескольких продуктов заданного качества.

На первом этапе при построении модели рассматриваются многоступенчатые классифицирующие системы без организации рециркуляции нецелевых продуктов. Указанные системы представлены на рис. 1 для однорядного (а), двухрядного (б) и трехрядного (в) расположения ступеней. Каждая ступень классификации условно показана треугольником.

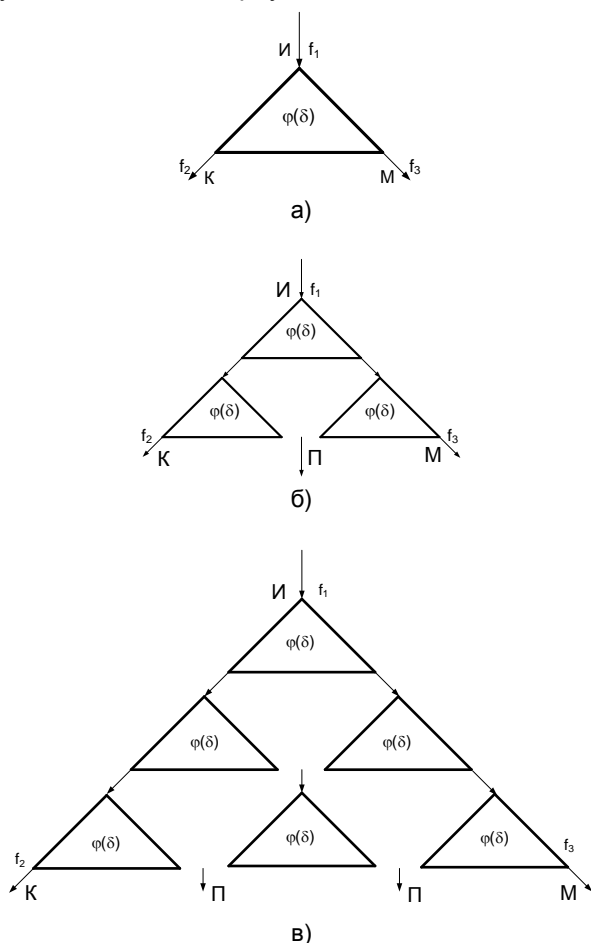


Рис. 1. Структурные схемы систем разделения продуктов при одно- (а), двух- (б) и трехрядном (в) расположении ступеней классификации без организации рециркуляции нецелевых порошков

В однорядной классифицирующей системе (рис. 1,а) исходный продукт (И) подается в ступень сверху и разделяется на мелкий продукт (М) и крупный продукт (К). Вероятность попадания частиц в мелкий продукт традиционно описывается кривой разделения или кривой парциальных выносов $\varphi(\delta)$ [2], каждое значение которой показывает вероятность попадания частиц размера δ в мелкий продукт. Кривая разделения ступени в первом приближении выбирается линейной:

$$\varphi_0(\delta) = 1 - \delta. \quad (1)$$

Гранулометрический состав мелкого $f_3(\delta)$ и грубого $f_2(\delta)$ продуктов разделения определяется согласно известным формулам [2]:

$$f_3(\delta) = \varphi(\delta) * f_1(\delta) / \bar{\varphi};$$

$$f_2(\delta) = (1 - \varphi(\delta)) * f_1(\delta) / \bar{\varphi},$$

где $f_1(\delta)$ – гранулометрический состав исходного продукта; $\bar{\varphi}$ – доля выноса фракций в мелкий продукт разделения, вычисляемая по формуле [2]

$$\bar{\varphi} = \int_0^{\infty} \varphi(\delta) * f_1(\delta) d\delta.$$

В схеме расположения классифицирующих ступеней в два ряда (рис. 1,б) первый ряд содержит один, а второй ряд – два одноступенчатых аппарата. В этом случае кроме мелкого и крупного образуется промежуточный продукт разделения (П). Для мелкого продукта системы (М) кривая разделения определяется произведением вероятностей двух независимых событий попадания в мелкий продукт в первом и втором рядах системы [2, 13, 14]. При одинаковом виде кривых разделения для ступеней значение кривой разделения системы определяется значением кривой разделения ступени во второй степени $(\varphi(\delta))^2$. Вероятность попадания частицы в крупный продукт системы вычисляется как вторая степень вероятности выхода в крупный продукт одной ступени: $(1 - \varphi(\delta))^2$.

Для системы из шести ступеней, расположенных в три ряда (рис. 1,в), вероятность выхода в мелкий продукт определится, соответственно, значением кривой разделения одной ступени в третьей степени $(\varphi(\delta))^3$.

На рис. 2 показаны кривые разделения описанных систем для однорядного, двухрядного и трехрядного расположения ступеней, представленных на рис. 1. Кривая разделения одной ступени отмечена на рис. 2 цифрой 1, для двухрядного расположения ступеней – цифрой 2 и для трехрядного – цифрой 3.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что с увеличением числа рядов граничный размер системы уменьшается, степень проскока крупных частиц в мелкий продукт системы растет, значение коэффициента полезного действия разделения [2] практически не меняется.

Численный расчетный анализ полученных кривых разделения показал, что в схемах без рецикла с увеличением числа ступеней граничный размер системы уменьшается с 0,5 до 0,2 относительных единиц, а КПД разделения остается практически постоянным и равным 0,75.

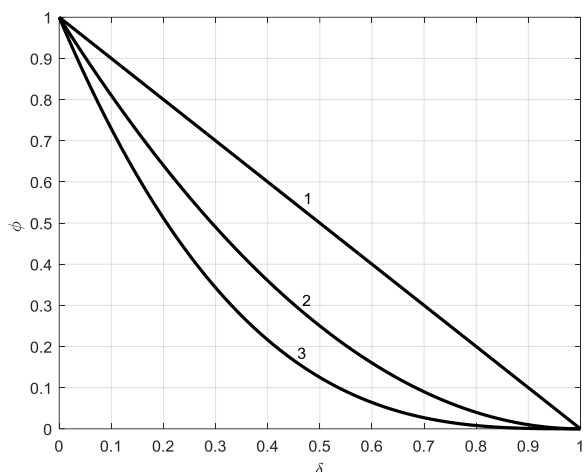


Рис. 2. Кривая разделения системы для однорядного (1), двухрядного (2) и трехрядного (3) расположения ступеней классификации в соответствии со схемами рис. 1, а, б, в

Анализ приведенных зависимостей показывает, что с увеличением числа рядов граничный размер системы уменьшается, степень проскока крупных частиц в мелкий продукт системы растет, значение коэффициента полезного действия разделения [2] практически не меняется. Численный расчетный анализ полученных кривых разделения показал, что в схемах без рецикла с увеличением числа ступеней граничный размер системы уменьшается с 0,5 до 0,2 относительных единиц, а КПД разделения остается практически постоянным и равным 0,75.

Следует отметить, что наряду с крупным и мелким продуктами при классификации порошков в системах на рис. 1, б и рис. 1, в образуются промежуточные продукты (П). Для повышения эффективности классификации данные продукты предлагается возвращать на вход системы или в некоторые промежуточные ее точки. Пример такой организации процесса представлен на рис. 3 трехрядной схемой, на которой промежуточные продукты направляются на рециркуляцию (Р) в первую ступень. Для оценки целесообразности таких мероприятий по организации перечистки промежуточных продуктов разработана специальная математическая модель, учитывающая рециркуляцию промежуточных нецелевых продуктов.

При построении модели дискретно по шагам рассматривается формирование фракционных потоков при организации рециркуляции промежуточных продуктов. На первом шаге моделирования считается, что в начальный момент на вход системы подается единичная порция частиц наблюдаемого размера δ . В мелкий продукт системы выделяется доля подаваемой фракции, равная $(\varphi(\delta))^3$, в крупный продукт разделения – $(1-\varphi(\delta))^3$. Частицы фракции, которые не попали в мелкий или крупный продукты, подаются на рециркуляцию в первую

ступень. Доля рециркуляции фракции на первом шаге определяется как единица минус доля материала мелкого и минус доля материала крупного продуктов, покидающих систему:

$$a = 1 - \varphi^3 - (1 - \varphi)^3 = 3\varphi(1 - \varphi),$$

где a – массовая доля фракции, подаваемая на рециркуляцию на первом шаге.

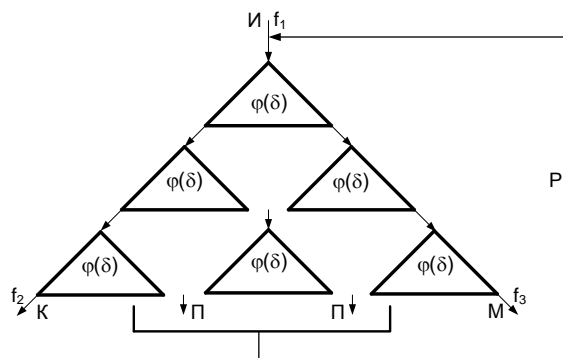


Рис. 3. Трехрядная система классификации с рециркуляцией (Р) двух нецелевых продуктов (П)

На втором шаге на вход в верхнюю ступень подается сумма единичной порции исходного питания и доли фракции, подаваемой на рециркуляцию на первом шаге:

$$1 + a.$$

Аналогичные рассуждения после второго шага при рециркуляции материала позволяют записать следующее выражение для доли наблюдаемой фракции, подаваемой на вход первой ступени:

$$1 + a + a^2.$$

После повторения указанной процедуры n раз на вход в первую ступень подается доля фракции, определяемая суммой n членов геометрической прогрессии. Сумма членов геометрической прогрессии при бесконечном числе слагаемых $n \rightarrow \infty$; $a^2 < 1$ определяется выражением [15]

$$1 + a + a^2 + a^3 + a^4 + \dots + a^\infty = \frac{1}{1 - a}.$$

Кривая разделения для установившегося режима при бесконечном числе членов геометрической прогрессии находится согласно зависимости

$$\varphi_1 = \varphi_0^3 \cdot (1 + a + a^2 + a^3 + a^4 + \dots + a^\infty) = \frac{\varphi_0^3}{1 - a}.$$

После подстановки в полученную формулу выражения для $a(\delta)$ записывается итоговая зависимость для кривой разделения системы с учетом рециркуляции промежуточных продуктов согласно схеме рис. 3:

$$\varphi_1(\delta) = \frac{(\varphi_0(\delta))^3}{1 - 3\varphi_0(\delta)(1 - \varphi_0(\delta))}, \quad (2)$$

где $\varphi_1(\delta)$ – кривая разделения системы или вероятность попадания в мелкий продукт частиц размера δ для классифицирующей системы, представленной на рис. 3.

Предложенное математическое описание (2) положено в основу исследования эффективности работы классифицирующей системы. Результаты расчетных исследований для системы с трехрядным расположением ступеней при рециркуляции нецелевых фракций согласно схеме рис. 3 приведены на рис. 4.

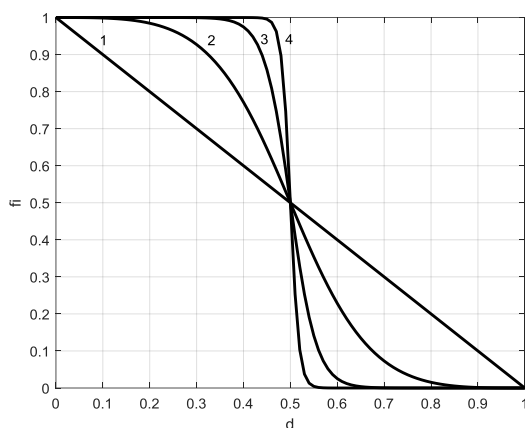


Рис. 4. Кривые разделения трехрядной классифицирующей системы с рециркуляцией промежуточных продуктов с разными кривыми разделения ступени: 1 – линейная кривая разделения ступени (1); 2 – кривая разделения системы при кривой разделения ступени согласно (1); 3 – кривая разделения системы при кривой разделения ступени согласно (2); 4 – кривая разделения системы при кривой разделения ступени согласно (3)

Под цифрой 1 на рис. 4 показана линейная кривая разделения одной ступени (1). Кривая разделения системы с рециркуляцией при трехрядном расположении ступеней, рассчитанная согласно (2), показана на рис. 4 под цифрой 2.

При организации рециркуляции (перечистки) нецелевого продукта существенным образом повышается эффективность разделения по сравнению с базовой одноступенчатой линейной кривой разделения. Так, КПД разделения [2] повышается с 0,75 до 0,87, а степень проскака крупных частиц в готовый продукт [2] уменьшается с 0,25 до 0,1.

В рамках решения задачи по совершенствованию структуры классифицирующей системы дальнейшие исследования проводились по следующему алгоритму. Для дополнительного моделирования повышения эффективности разделения предлагается подход с использованием рекуррентных соотношений [16]. Рекуррентное соотношение – это уравнение, кото-

рое выражает каждый элемент последовательности как функцию предыдущих соотношений [16]. В нашем случае рекуррентное соотношение понимается как использование для расчета кривой разделения ступени кривой разделения системы для предыдущей классифицирующей системы. То есть на первой итерации предлагается для системы классификаторов (рис. 3) выбрать кривую разделения ступени не линейную (1), а рассчитанную ранее для трехступенчатой системы согласно (2). Расчетный анализ в этом случае выполняется достаточно просто через замену кривой разделения одной ступени (1) на кривую разделения, рассчитанную согласно (2). Такая замена по существу является подходом использования рекуррентных соотношений, при котором система, описанная кривой разделения (2), считается соответствующей кривой разделения ступени в трехрядной системе (рис. 3). Тогда кривая разделения такой новой системы может быть рассчитана, если в выражении (2) кривую ступени заменить на кривую разделения согласно (2). Смысл этой замены иллюстрирует выражение

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1^3}{1 - a_1}, \quad (3)$$

где φ_2 – кривая разделения системы (рис. 3), у которой кривая разделения ступени определяется согласно (2); a_1 – комплекс, определяемый выражением

$$a_1 = 3\varphi_1(1 - \varphi_1). \quad (4)$$

Дальнейшее повышение эффективности разделения смоделировано повышением эффективности одной ступени через замену кривой разделения на более эффективную, определенную предыдущим соотношением:

$$\varphi_3 = \frac{\varphi_2^3}{1 - a_2}, \quad (5)$$

где φ_2 – кривая разделения системы (рис. 3), у которой кривая разделения ступени определяется согласно (3); a_2 – комплекс, определяемый выражением

$$a_2 = 3\varphi_2(1 - \varphi_2). \quad (6)$$

Следует отметить, что, согласно (2), система классификаторов включает использование 6 ступеней, соединенных согласно схеме на рис. 3, при этом каждая ступень описывается линейной кривой разделения. На втором уровне (рис. 4, кривая 3) каждый треугольник схемы на рис. 3 включает систему из 6 линейных ступеней, при этом общее число линейных ступеней составляет $6 \cdot 6 = 36$. Для обеспечения кривой разделения 4 (рис. 4) потребуется уже $6 \cdot 6 \cdot 6 = 216$ линейных ступеней классификации. Кривая разделения мелкого продукта, определенная согласно (5)–(6), представлена на рис. 4 под цифрой 4.

Повторение описанной процедуры замены кривой разделения ступени кривой разделения системы может быть выполнено необходимое число раз до достижения требуемого качества готового продукта. Представленная математическая модель позволяет перейти к решению задачи выбора структуры классифицирующего каскада, обеспечивающего заданные требования к готовому продукту. Результаты расчетного анализа по предложенной модели с использованием рекуррентных соотношений при разных структурах и составах классифицирующей системы приведены в таблице.

Влияние структуры системы на показатели эффективности разделения

Схема системы/ число ступеней	Вид кривой разделения ступени	Граничный размер системы	КПД системы [2]	Степень проскока крупных частиц системы [2]
Рис. 1, а /1	ф.(1)	0,5	0,75	0,25
Рис. 1, б /3	ф.(1)	0,28	0,75	0,33
Рис. 1, в /6	ф.(1)	0,2	0,75	0,55
Рис. 3 /6	ф.(2)	0,5	0,87	0,12
Рис. 3 /36	ф.(3)	0,5	0,95	0,05
Рис. 3 /216	ф.(4)	0,5	0,97	0,03

Граничные размеры систем с рециркуляцией продуктов получаются примерно одинаковыми, а эффективность разделения при этом существенно возрастает. Очевидно, что стоимость таких установок с ростом числа элементов будет увеличиваться. Для конкретных случаев необходимость получения более чистых и однородных материалов должна обосновываться технико-экономическими расчетами, учитывающими удорожание продукта с повышением его качества. Представленная модель позволяет проводить такой анализ, учитывая повышение качества продукта с увеличением сложности и числа элементов системы.

Постановка задачи выбора режимов классифицирующей системы возможна на основе представленных моделей путем возможных управлений характеристиками режима каждого элемента системы, которое может быть реализовано на практике, например, управлением распределения потоков воздуха между ступенями или положением и поворотом треугольных вставок. Необходимость данного мероприятия определяется для конкретных технологических условий и требований к получаемому порошку и подробно в настоящем исследовании не рассматривается.

Выводы. Разработанная математическая модель многоступенчатых классифицирующих установок с учетом рециркуляции нецелевых продуктов позволяет оценить повышение эффективности классифицирующей системы и

выбрать структуру системы с учетом заданных требований к качеству готового порошка.

Предложенный подход к моделированию классифицирующих систем позволяет при варьировании режимных характеристик отдельных ступеней получить заданное качество или максимальное количество одного или нескольких целевых продуктов.

Список литературы

1. Барский М.Д., Ревнивцев В.И., Соколкин Ю.В. Гравитационная классификация зернистых материалов. – М.: Недра, 1974. – 232 с.
2. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989. – 160 с.
3. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 416 с.
4. Линч А. Циклы дробления и измельчения. – М.: Недра, 1980. – 343 с.
5. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
6. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
7. Дуда В. Цемент. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
8. Mizonov V., Zhukov V., Bernotat S. Simulation of Grinding: New Approaches. – Ivanovo, 1997. – 108 p.
9. Фоменко Т.Г., Бутовецкий В.С., Погарцева Е.М. Технология обогащения углей: справочное пособие. – М.: Недра, 1985. – 367 с.
10. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.
11. Процессы и аппараты химической технологии. Т. 2. Механические и гидромеханические процессы / под ред. А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2001. – 600 с.
12. Жуков В.П., Каталимов А.В., Мизонов В.Е. Расчетно-экспериментальное исследование разделения разнопрочных материалов в совмещенном распределенном процессе дробления классификации // Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т. 31, № 3. – С. 333–335.
13. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 2006. – 575 с.
14. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. – М.: Изд-во ЛКИ, 2009. – 480 с.
15. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1977. – 224 с.
16. Поликанова И.В. Дискретная математика. – Барнаул: ФГБОУ ВО «АлтГПУ», 2020. – 169 с.

References

1. Barskiy, M.D., Revnitssev, V.I., Sokolkin, Yu.V. *Gravitatsionnaya klassifikatsiya zernistykh materialov* [Gravitational classification of granular materials]. Moscow: Nedra, 1974. 232 p.
2. Mizonov, V.E., Ushakov, S.G. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Aerodynamic classification of powders]. Moscow: Khimiya, 1989. 160 p.

3. Andreev, S.E. *Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh* [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow: Nedra, 1980. 416 p.
4. Linch, A. *Tsikly drobleniya i izmel'cheniya* [Crushing and grinding cycles]. Moscow: Nedra, 1980. 343 p.
5. Sidenko, P.M. *Izmel'chenie v khimicheskoy promyshlennosti* [Grinding in the chemical industry]. Moscow: Khimiya, 1977. 368 p.
6. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.
7. Duda, V. *Tsement* [Cement]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 464 p.
8. Mizonov, V., Zhukov, V., Bernotat, S. *Simulation of Grinding: New Approaches*. Ivanovo, 1997. 108 p.
9. Fomenko, T.G., Butovetskiy, V.S., Pogartseva, E.M. *Tekhnologiya obogashcheniya ugley: Spravochnoe posobie* [Coal enrichment technology: Reference manual]. Moscow: Nedra, 1985. 367 p.
10. Kafarov, V.V., Dorokhov, I.N., Arutyunov, S.Yu. *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Protsessy izmel'cheniya i smeshivaniya sypuchikh materialov* [Systems analysis of chemical engineering processes. Processes of grinding and mixing bulk materials]. Moscow: Nauka, 1985. 440 p.
11. Kutepov, A.M. (ed.) *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. T. 2. Mekhanicheskie i gidromekhanicheskie protsessy* [Processes and apparatuses of chemical technology. Vol. 2. Mechanical and hydromechanical processes]. Moscow: Logos, 2001. 600 p.
12. Zhukov, V.P., Katalymov, A.V., Mizonov, V.E. *Raschetno-eksperimental'noe issledovanie razdeleniya raznoprochnykh materialov v sovmeshchennom raspredelennom protsesse drobleniya klassifikatsii* [Calculation and experimental study of the separation of materials of different strengths in a combined distributed process of crushing classification]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 1997, vol. 31, no. 3, pp. 333–335.
13. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 575 p.
14. Samarskiy, A.A., Vabishchevich, P.N. *Chislennyye metody resheniya obratnykh zadach matematicheskoy fiziki* [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. Moscow: Izdatel'stvo LKI, 2009. 480 p.
15. Dvayt, G.B. *Tablitsy integralov i drugie matematicheskie formuly* [Tables of integrals and other mathematical formulas]. Moscow: Nauka, 1977. 224 p.
16. Polikanova, I.V. *Diskretnaya matematika* [Discrete Mathematics]. Barnaul: AltGPU, 2020. 169 p.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

Правила оформления статьи.

Обязательно указывается УДК.

Фамилия, имя, отчество авторов полностью, место работы, должность, звание, ученая степень, страна и город, контактная информация (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Название статьи (на русском и английском языках), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Основной текст располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **10**.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 9 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черно-белыми**, любые другие цвета недопустимы.

Формулы набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **10**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются пристатейные библиографические списки (на русском языке и References).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:

<http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14>

Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 1

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Реестровая запись от 18.01.2022 г. серия ПИ № ФС77-82616

Подписано в печать 2.02.2026. Выход в свет 28.02.2026. Формат 60x84 ¹/₈.
Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 11,35. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8