



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

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**Научно-технический
и производственный журнал**

(25) 4 / 2023

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

Scientific & Technical Journal

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

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

Главный редактор	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю.
Второй главный редактор	АХМЕТОВА И.Г.
Заместитель главного редактора	STANIMIR VALTCHEV
Ответственный секретарь	ГРАЧЕВА Е.И.
Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	БАЛЕЕВА С.Н.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ВАК:

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

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

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА
РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

РИНЦ:

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи , информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) - ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г.
Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
Сайт:	https://www.energyret.ru/
Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
Адрес издателя:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Адрес редакции:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
Email:	problems_ener@mail.ru
Типография:	ООО "ФОЛИАНТ"
Адрес типографии:	420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Профсоюзная, 17 в

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2023
Т.25, № 4

Июль-Август

ISSN 1998–9903 (Print)

ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

АХМЕТОВА И.Г.
АРАКЕЛЯН Э.К.
БОРУШ О.В.
БОЧКАРЕВ И.В.
БРЯКИН И.В.
ВАНЬКОВ Ю.В.
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.
ГРАЧЕВА Е.И.
ДМИТРИЕВ А.В.
ДОВГУН В.П.
ЗВЕРЕВА Э.Р.
ИВШИН И.В.
КАЛАЙДА М.Л.
КАСИМОВ В.А.

КОРНИЛОВ В.Ю.
ЛАПТЕВ А.Г.
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.
МИНГАЛЕЕВА Г.Р.
НИКОЛАЕВА Л.А.
ПЕТРОВ Т.И.
САФИН А.Р.
СУСЛОВ К.В.
ФЕДОТОВ А.И.
ЯКИМОВ Н.Д.
PENTIUC RADU DUMITRU
KOLCUN MICHAIL

Свидетельство о регистрации СМИ:

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

**Founder: Kazan State Power Engineering University and the Ministry of
Education of the Russian Federation**

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV
Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA
Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

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

Sections:

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES
ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING
METHODS AND DEVICES FOR CONTROLLING AND DIAGNOSING MATERIALS, PRODUCTS,
SUBSTANCES AND PROPANE MEDIA
ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS
ECOLOGICAL SAFETY

Editorial board:

AKHMETOVA IRINA	IVSHIN IGOR	YAKIMOV NIKOLAY
ARAKELYAN EDIK	KALAJDA MARINA	KOLCUN MICHAIL
BORUSH OLESYA	KASIMOV VASIL	ILIYA K. ILIEV
BOCHKAREV IGOR	KORNILOV VLADIMIR	ION V. ION
BRYAKIN IGOR	LAPTEV ANATOLY	PENTIUC RADU DUMITRU
VANKOV YURY	MESHCHERYAKOV VIKTOR	STANIMIR VALTCHEV
GRACHEVA ELENA	MINGALEEVA GUZEL	
VAFIN DANIL	NIKOLAEVA LARISA	
GOLENISHCHEV-KUTUZOV	SUSLOV KONSTANTIN	
ALEXANDER		
DMITRIEV ANDREY	SAFIN ALFRED	
DOVGUN VALERY	SHCHINNIKOV PAVEL	
ZVEREVA ELVIRA	FEDOTOV ALEXANDER	

Address Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Republic of Tatarstan,
Russian Federation
Tel./fax: +7 (843) 527-92-76
Printing House: LLC «FOLIANT»
Address of the printing house 420111, Republic of Tatarstan, g. Kazan, Str. Trade Union, 17 V
Email: problems_ener@mail.ru
Site: <https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ФЁДОРОВА В.А., КИРИЧЕНКО В.Ф., ГЛАЗЫРИН Г.В. Разработка системы автоматического включения генерирующего оборудования на параллельную работу с электроэнергетической системой.	3
ПЕСТЕРЕВ А.А., КОСТИНСКИЙ С.С. Алгоритм распределения по фазам в системах электроснабжения однофазных электроприемников по критерию минимизации коэффициента неравномерности нагрузки фаз, применяемый на этапе проектирования.	18

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

КАПАНСКИЙ А.А., ПАВЛОВ В.В. Влияние статической составляющей сети водоснабжения на изменение мощности электропотребления насосного агрегата при частотном регулировании.	29
КИРШИНА Е.Ю., АНИКИНА И.Д. Внедрение топливных элементов в схемы ТЭЦ для увеличения производственных мощностей.	41
ЧИЧИРОВ А.А., ФИЛИМОНОВА А.А., ЧИЧИРОВА Н.Д., МАЙОРОВ Е.С. Экспериментальные исследования электрических и массообменных процессов при обратном электролизе.	53

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

КОТОВА Е.В., КЛЕБЛЕЕВ Р.М., КУДИНОВ В.А. Об одном методе определения собственных чисел в задачах теплопроводности для цилиндра.	71
ЗЕНКОВ А.В., ГВОЗДЯКОВ Д.В. Водоугольные суспензии: приготовление, свойства, характеристики (краткий обзор).	83

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

АРИСТОВА А.А., НОВИКОВА О.В. Концепция замкнутого ресурсного цикла с использованием инновационной информационной системы развития биоэнергетики.	101
---	-----

C O N T E N T S

ELECTRICITY

FYODOROVA VA, KIRICHENKO VF, GLAZYRIN GV. Development of the automatic system for switching on the generating equipment for parallel operation with the electric power system.	3
PESTEREV AA, KOSTINSKIY SS. Algorithm for phase distribution in power supply systems of single-phase electric receivers according to the criterion of minimization of the coefficient of load ununiformity of the phases used at the design stage.	18

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

KAPANSKY AA, PAVLOV VV. The influence of the static component of the water supply network on the change in the power consumption of the pumping unit with frequency control.	29
KIRSHINA EYU, ANIKINA ID. Study of adaptive control system of asynchronous electric drive belt conveyor.	41
CHICHIROV A.A., FILIMONOVA A.A., CHICHIROVA N.D., MAYOROV E.S. Experimental studies of electrical and mass transfer processes in reverse electrodialysis.	53

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

KOTOVA E.V, KLEBLEEV R.M, KUDINOV V.A. Method for determining eigen numbers in heat conduction problems for a cylinder.	71
ZENKOV A.V, GVOZDYAKOV D.V. Coal-water suspensions: preparation, properties, characteristics (a brief overview).	83

ECOLOGICAL SAFETY

ARISTOVA AA, NOVIKOVA OV. The concept of a closed resource cycle using an innovative information system for the development of bioenergy.	101
--	-----

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-4-3-17

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ С ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Фёдорова В.А.¹, Кириченко В.Ф.¹, Глазырин Г.В.¹

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
win.victoria08@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Синхронизация – это алгоритм действий по включению синхронных генераторов на параллельную работу с энергосистемой, является неотъемлемой частью процесса производства электроэнергии. На практике процесс синхронизации сопряжен с некоторыми трудностями. Разработанное автоматическое устройство синхронизации является цифровым и интегрируется в микропроцессорный терминал комплекса КПА-М, позволяя решить возникающие проблемы посредством выполнения синхронизации различными методами, в том числе разработанным методом ускоренной синхронизации. **ЦЕЛЬ.** Создать комплексную автоматизированную систему синхронизации на базе микропроцессорного терминала КПА-М с вариативностью используемых методов. Проанализировать существующие устройства синхронизации, синтезировать традиционные методы синхронизации, на их базе создать нетрадиционный промежуточный метод и интегрировать его в автоматизированную систему. Разработать алгоритмы работы измерительного и логического органов, а также органа управляющих воздействий системы синхронизации. Провести экспериментальную проверку алгоритмов подачи реальных сигналов от датчиков напряжения на физической модели с вращающейся синхронной машиной (тестируемый генератор мощностью 12 кВт). **МЕТОДЫ.** Проблема исследования изучена с использованием теоретических и практических подходов. Теоретические методы – анализ, синтез и классификация. Практические методы – моделирование в среде MatLab®, сравнение, эксперимент, наблюдение. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье представлено описание архитектуры, принципов построения, выбора уставок системы синхронизации, а также взаимодействия её логической части со смежными блоками (измерительным блоком, блоком выходных воздействий). Работа дает исчерпывающее описание настройки системы и интеграции её измерительной и логической части в микропроцессорный терминал КПА-М с последующим испытанием работоспособности частей на физическом объекте. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разрабатываемая система обладает расширенным по сравнению с аналогами функционалом, позволяя использовать традиционный метод точной синхронизации и разработанный метод ускоренной синхронизации. Прогнозируется снижение капитальных затрат на системы автоматики, так как одно устройство обеспечивает синхронизацию на нескольких выключателях и уменьшение издержек на эксплуатацию генератора (ТОиР), поскольку при включении подходящими методами части машины не подвержены недопустимым термическим и механическим воздействиям. Разработка актуальна для ликвидации аварийных ситуаций в энергосистеме. Социальная значимость проекта заключается в исключении человеческого фактора и необходимости высокой квалификации персонала для ручного осуществления процесса. Перспектива применения разработки – в учебном процессе университета и на реальных объектах энергетики, в частности на крупных синхронных генераторах.

Ключевые слова: синхронизация; параллельная работа; синхронный генератор; устойчивость энергосистемы; автоматическое регулирование; электромагнитные переходные процессы.

Благодарности: Исследование, по результатам которого подготовлена статья, выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00181).

Для цитирования: Фёдорова В.А., Кириченко В.Ф., Глазырин Г.В. Разработка системы

автоматического включения генерирующего оборудования на параллельную работу с электроэнергетической системой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С. 3-17. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-3-17.

DEVELOPMENT OF THE AUTOMATIC SYSTEM FOR SWITCHING ON THE GENERATING EQUIPMENT FOR PARALLEL OPERATION WITH THE ELECTRIC POWER SYSTEM

VA. Fyodorova¹, VF. Kirichenko¹, GV. Glazyrin¹

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

¹win.victoria08@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Synchronization is an algorithm of actions to switch on synchronous generators for parallel operation with the power system and is an integral part of the power generation process. In practice, the process of synchronization involves some difficulties. The developed automatic synchronization device is digital and is integrated into the microprocessor terminal of the CPA-M complex, allowing to solve the arising problems by means of synchronization using different methods, including the developed method of accelerated synchronization. *THE PURPOSE.* Create a comprehensive automated synchronization system based on the CPA-M microprocessor terminal (manufactured by a Novosibirsk company) with a variability of methods. Analyze existing synchronization devices, synthesize traditional synchronization methods, create a non-traditional intermediate method on their basis and integrate it into the automated system. Develop algorithms for the measuring and logical units, as well as for the synchronization system output unit. Experimental testing of algorithms by feeding real signals from voltage sensors on a physical model with a rotating synchronous machine (12 kW generator under test). *METHODS.* The problem of research studied using theoretical and practical approaches. Theoretical methods - analysis, synthesis and classification. Practical methods - modeling in MatLab® environment, comparison, experiment, observation. *RESULTS.* The paper describes the architecture, construction principles, settings selection of the synchronization system, as well as the interaction of its logical part with adjacent units (measuring unit, output unit). The work gives a comprehensive description of the system setup and integration of its measuring and logic parts into the CPA-M microprocessor terminal with a test on a physical object. *CONCLUSION.* The system has extended functionality compared to analogs, allowing the use of traditional methods and the developed method of accelerated synchronization. The results predict reduction of capital costs for automation systems, as one device provides synchronization on several circuit breakers and reduction of generator operation costs, as using this system, machine parts exposed to unacceptable thermal and mechanical effects. The development is relevant for the elimination of emergencies in the power system and reducing thermal and dynamic impacts on the generator. The social importance of the project is the exclusion of the human factor. The prospect of using the development - in the educational process of the university and at real power facilities, in particular on large synchronous generators.

Keywords: synchronization; parallel operation; synchronous generator; power system stability; automatic regulation; electromagnetic transients.

Acknowledgments: The reported study was supported by Russian Science Foundation, research project No. 22-79-00181.

For citation: Fyodorova VA, Kirichenko VF, Glazyrin GV. Development of the automatic system for switching on the generating equipment for parallel operation with the electric power system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):3-17. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-3-17.

Введение (Introduction)

Сегодня электрическая энергия является субститутотом без аналогов. Электроэнергетика России построена таким образом, что наибольший процент электроэнергии вырабатывается синхронными генераторами на электростанциях, объединенных в электроэнергетические системы (ЭЭС). Одна из операций постоянной эксплуатации вращающихся синхронных машин — синхронизация. Синхронизация —

это процесс, который подготавливает генератор к его корректному включению на параллельную работу с остальными частями электрической сети [1]. При синхронизации определенным образом изменяются режимные параметры синхронной машины (напряжение, частота и фаза) для их уравнивания с аналогичными параметрами эквивалентного генератора сети. Данный процесс происходит при любом включении генератора: при плановом, аварийном или при включении после капитального ремонта [2–4].

Данная статья посвящена исследованию процесса синхронизации и особенностей конструирования устройств для её выполнения. Проблема исследования заключается в отсутствии среди имеющихся синхронизаторов полноценной автоматической мультисистемы синхронизации, способной функционировать в условиях неопределенности режима ЭЭС. Дополнительное ограничение накладывает необходимость корректного функционирования подобной системы как в условиях нормального, так и вероятного аварийного режима работы ЭЭС. При этом автоматизированная система синхронизации должна рассматриваться в контексте использования для повышения надёжности электроэнергетических систем при её применении для ликвидации аварийных ситуаций, таких как снижение частоты (небаланс активной мощности). Возможность использования системой не только традиционных методов синхронизации позволит при необходимости производить быстрый пуск резервов генерации, тем самым снижая количество отключаемых для восстановления уровня частоты в энергосистеме потребителей.

На основе описанных проблем определена цель исследования.

Цель исследования – создать комплексную автоматизированную систему синхронизации с вариативностью используемых методов. Система синхронизации должна быть цифровой и интегрирована в микропроцессорный терминал КПА-М (производство новосибирской компании). Цель исследования достигнута с применением теоретических и практических научно-технических решений.

Научная значимость исследования заключается в разработке цифровой математической модели в среде MATLAB и написании алгоритма работы каждого структурного блока системы в виде программного кода. Математическая модель разработана для отображения процесса измерения и фильтрации входных параметров, с которыми в дальнейшем работает устройство в различных режимах. Данное решение необходимо для последующей интеграции системы синхронизации в различные микропроцессорные терминалы.

Теоретическая значимость исследования состоит в разработанных коллективом авторов положениях и структуре алгоритма функционирования предлагаемого метода ускоренной синхронизации (перечень рекомендуемых действий и значений параметров, с которыми генератор должен включаться в сеть). Решение получено на основании анализа особенностей и последствий включения синхронных генераторов на параллельную работу традиционными методами (точной и самосинхронизации), а также математического расчёта термических и динамических воздействий на генератор мощностью 12 кВт при нескольких вариантах синхронизации.

Литературный обзор (Literature Review)

Литературный обзор научных исследований в Российской Федерации (РФ) и за рубежом выполнен по двум ключевым направлениям: методы осуществления и устройства для выполнения процесса синхронизации.

Анализ исследований показал, что большой вклад в конструирование устройств синхронизации нового поколения внесли ученые, разработавшие синхронизаторы с логической частью на базе микроконтроллера PIC. Блок синхронизации выполняет обработку и вычисление необходимых для синхронизации параметров с применением компараторного модуля микроконтроллера [5, 6].

Еще одну систему синхронизации собственной разработки предлагают в [7, 8]. Микросинхронная генераторная установка объединяет блок обработки сигналов и блок усиления мощности, реализующие функции запуска и торможения генератора, автоматического регулирования частоты, напряжения и автоматического квазисинхронизирующего параллельного включения генератора. Мониторинг установки в реальном времени осуществляется PMU Light, а управление процессом — ICIMSG. Кроме того, учеными было разработано соответствующее программное обеспечение.

Также широкое распространение в автономных энергосистемах с большим содержанием микрогенерации получили активные синхронизаторы на базе источников преобразователей напряжения [9–11]. Такие устройства обеспечивают процесс

синхронизации на основе фазовой автоподстройки активным способом, снижая фазовую ошибку, поскольку фаза не регулируется в системе управления генератором, а изменяется в точке его подключения к сети. Таким образом, предложенный синхронизатор может сократить время синхронизации, но не может снизить воздействия на генератор, что является ключевой задачей.

Несмотря на то, что все описанные разработки являются автоматическими, они не объединяют в одном устройстве все необходимые блоки для полноценного выполнения синхронизации. Нерешенным вопросом в приведенных работах является отсутствие данных по эксплуатации предлагаемых устройств в аварийных режимах работы энергосистемы и возможности синхронизации несколькими методами (в том числе нетрадиционными). Таким образом, трудности при разработке темы связаны с выявлением особенностей конструирования устройств синхронизации различных производителей и возможности их применения в нормальных и аварийных режимах работы энергосистемы России.

В части научных исследований о методах осуществления синхронизации ученые РФ, в основном, рассматривают традиционные методы выполнения процесса и их последствия для генерирующего оборудования, а именно переходные процессы, возникающие в генераторе [12, 13]. Различные методы синхронизации оценивались авторами по критериям времени протекания переходного процесса и величине ударного тока, возникающего в момент включения генератора на параллельную работу. Такой вариант оценки является весьма корректным и использован авторами данного исследования.

Авторы [14, 15] исследовали синхронизацию генераторов мощностью от 6 до 1000 МВт и рекомендуют включение методом, исключающим диапазон углов между ЭДС генератора и системы в $130\text{--}140^\circ$, а также при отрицательном угле включения, когда вектор ЭДС генератора отстает от вектора ЭДС энергосистемы.

Зарубежные ученые из Испании исследовали возможность включения генератора на параллельную работу с использованием релейной защиты для предотвращения последствий от неуспешной синхронизации [16]. Данный метод заключается в использовании мгновенной токовой отсечки (МТО), которая активна только во время процесса синхронизации, с уставкой по току ISET выше нормального тока синхронизации на 0,4–0,8 о.е. Защита выводится из действия через регулируемое время TSET (примерно 1–2 секунды) после включения генераторного выключателя. Таким образом, обеспечивается необходимая защита от последствий несинхронного включения, но не предотвращается первопричина возникновения ошибочной синхронизации. Если синхронизация неуспешна, то генераторный выключатель отключается защитой, однако придется еще раз производить синхронизацию, которая снова может быть неуспешной. Решение по использованию устройства синхронизации в совокупности с МТО не представляет принципиально новый подход. Например, на лабораторной электростанции Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) установлена и функционирует токовая отсечка генератора, которая надежно срабатывает при неуспешной синхронизации с большой величиной уравнительного тока.

На основании анализа рассмотренных исследований можно сделать вывод, что каждый из традиционных вариантов синхронизации в той или иной мере оказывает влияние на генератор в момент его включения. Для исключения основных недостатков каждого из двух традиционных методов возникает необходимость разработки некоторого модернизированного метода синхронизации. Таким образом, авторами исследования для интеграции в систему синхронизации разработан специальный метод ускоренной синхронизации, являющийся модернизацией двух традиционных методов, обеспечивающий оптимальные условия включения агрегата.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объект данного исследования — процесс синхронизации. Предмет исследования — методы его осуществления.

Площадка проведения экспериментов — лабораторная электростанция НГТУ, состоящая из следующего электроэнергетического оборудования: явнополюсный синхронный генератор мощностью 12 кВт, приводной электродвигатель постоянного тока, РУ генераторного напряжения и пульт управления. Гипотеза исследования — разрабатываемая система, работая в различных режимах (автономном и ручном), производит синхронизацию с минимальными воздействиями на генераторы (минимальные броски тока в обмотке статора и момент на валу) и корректно выполняет функции даже при аварийных режимах энергосистемы.

Важность исследования состоит в полной автоматизации и упрощении процессов, участвующих в цикле производства электроэнергии, и защите такого важного оборудования, как вращающиеся синхронные машины.

Проблема исследования изучена с использованием теоретических и практических подходов. Теоретические методы – анализ, синтез и классификация. С применением теоретических подходов решены следующие задачи:

1. Проанализированы существующие устройства синхронизации и проведена оценка состояния решаемой проблемы.

2. Синтезированы традиционные методы синхронизации, на их базе создан нетрадиционный промежуточный метод и интегрирован в мультифункциональную систему.

3. Мультифункциональная система синхронизации и её структурные части классифицированы по системным свойствам.

Практические методы – моделирование, сравнение, эксперимент/наблюдение. С применением практических подходов решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель процесса цифровой обработки входных сигналов в среде MATLAB, это помогло обосновать выбора элементов цифрового алгоритма. Ниже будут представлены основные положения его работы.

2. Разработаны алгоритмы работы измерительного и логического органов системы синхронизации и интегрированы в микропроцессорный блок КПА-М. Разработанные алгоритмы сравнены с алгоритмами существующих устройств по критерию точности определения параметров и качества работы системы. Проведена экспериментальная проверка алгоритмов подачи реальных сигналов от датчиков напряжения.

3. Описанные органы системы синхронизации испытаны на физической модели с вращающейся синхронной машиной (тестируемый генератор мощностью 12 кВт) и записью осциллограмм внутренним осциллографом микропроцессорного терминала.

Разработанная система синхронизации должна обладать следующими свойствами:

1. Гибкость – в случае изменения входных параметров система не теряет точность расчёта величин и корректирует выходные управляющие воздействия;

2. Адаптивность – система адаптируется под изменение параметров внешней среды;

3. Функциональность – каждая подсистема выполняет заданную функцию;

4. Эмерджентность – совокупность структурных блоков выполняет цель, которую каждый из блоков не может выполнить по отдельности.

Структурные органы разработанной системы должен обладать следующим функционалом:

1. Процесс синхронизации осуществляется различными способами: автоматически как в нормальном, так и в аварийном режиме, и ручным способом в крайне экстренных условиях, когда режимные параметры энергосистемы быстро изменяются во времени.

2. Процесс синхронизации осуществляется различными методами с учётом внешней ситуации в энергосистеме. При существовании нормального режима синхронизация может быть выполнена традиционными методами, при аварийной ситуации и требовании к быстрому запуску генерирующего оборудования – нетрадиционным промежуточным методом.

3. Возможность оцифровки входных режимных сигналов напряжения. Так как система синхронизации является цифровой входные аналоговые сигналы должны быть конвертированы в цифровые для их дальнейшего использования.

4. Режимные параметры генератора и энергосистемы определяются, не превышая допустимую погрешность, на основе входных оцифрованных сигналов напряжения. Данный процесс выполняется с достаточной точностью даже при отклонении параметров от номинальных значений.

Интерфейс системы должен быть гибким и интуитивно понятным:

5. На дисплее отображены все необходимые параметры: характеристики генератора и ЭЭС, разница в них и формируемые управляющие воздействия. Это нужно для оценки персоналом корректности работы системы и осуществления ручной синхронизации.

На плате дискретных выходов системы должны быть реализованы следующие управляющие воздействия:

6. Формирование сигнала на управление током возбуждения для изменения амплитуды напряжения генератора органом управляющих воздействий (контроллером тока возбуждения).

7. Формирование сигнала на управление частотой вращения первичного двигателя (турбины) для изменения частоты генератора органом управляющих воздействий (контроллером частоты вращения).

8. Формирование сигнала на автоматическое включение генераторного выключателя логическим органом

Результаты (Results)

Разрабатываемая система синхронизации является многофункциональной. Она на основе выборок напряжения генератора и энергосистемы вычисляет определенные параметры, анализирует их и определяет момент времени, в который нужно выдать особое управляющее воздействие.

Обобщенное описание разрабатываемой системы синхронизации и каждой из её структурных частей ранее публиковалось и представлено в статье [1]. В рамках данной статьи требуется частичное повторение информации из [1] для полного и комплексного восприятия работы и взаимодействия органов системы синхронизации. Также следует отметить, что в отличие от [1], представленное в данной работе описание структурных частей системы является развёрнутым и включает в себя анализ функционирования органов в рамках экспериментальной проверки на реальном генераторе мощностью 12 кВт.

Для осуществления комплексного процесса синхронизации система включает в себя следующие структурные части (органы) [17]:

1. Измерительный орган. Орган на основании мгновенных значений напряжения рассчитывает действующие значения напряжений генератора и энергосистемы, их частоты вращения и угол δ между векторами их ЭДС;
2. Логический орган. Орган по полученным из предыдущего органа выборкам определяет разницу в режимных параметрах генератора и энергосети, сравнивает её с интегрированными в блок уставками и принимает определенное решение по управляющим воздействиям;
3. Орган управляющих воздействий. Орган физически формирует выходные воздействия: подает импульсы на генераторный выключатель, либо на регуляторы тока возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧ).

Измерительный орган конструктивно разделяется на две части: физическую и программную. Физическая часть – это два измерительных датчика (АЦП), каждый из которых получает выборки мгновенных значений напряжения (рис.1). Для этой функции могут быть применены датчики любого типа с измерениями в классе точности не хуже 0,2 [18, 19].

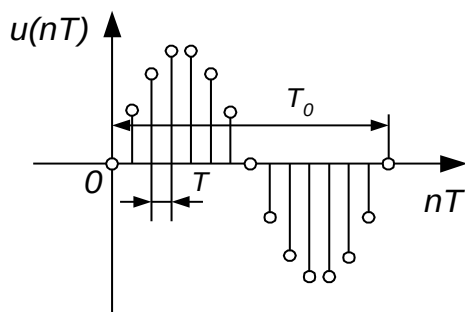


Рис. 1. Процесс цифрового преобразования аналогового синусоидального сигнала

Fig. 1. The process of digitally converting an analog sinusoidal signal

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Процесс представляет собой получение 24 выборок напряжения за период (частота дискретизации = 1200 Гц) и передачу их в комплекс КПА-М по интерфейсу RS-485.

Далее выборки попадают в программную часть, реализованную в терминале КПА-М с названием РМУ. РМУ – это алгоритм, который осуществляет цифровую фильтрацию сигнала и из одного сигнала напряжения выделяет три контролируемые параметра: амплитуду, частоту и фазу (рис.2). Элементами алгоритма является набор математических операций и цифровой фильтр низких частот (ФНЧ).

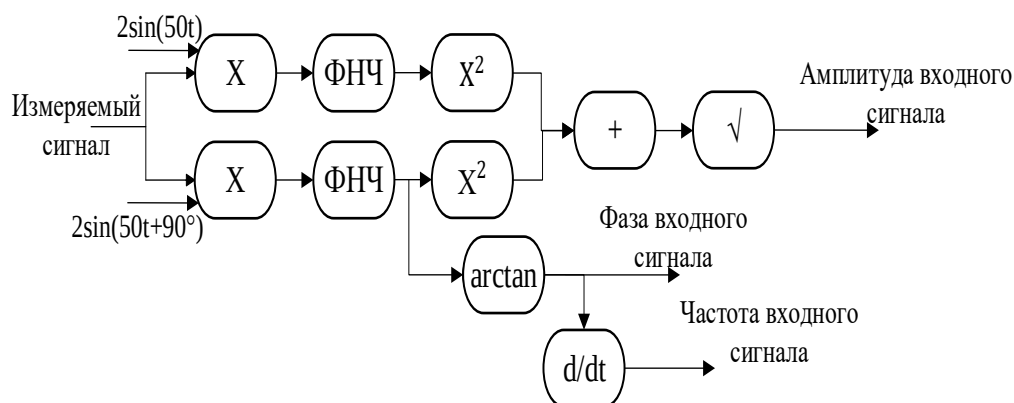


Рис. 2. Процесс цифровой фильтрации сигнала и получения контролируемых параметров

Fig. 2. The process of digital signal filtering and obtaining controlled parameters

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Работа алгоритма PMU смоделирована в среде MATLAB для визуализации процесса и обоснования выбора типа ФНЧ. Ниже представлены основные положения его работы.

Входной сигнал моделируется с параметрами: амплитуда – 5 В, фаза – 0°, частота – 50 Гц. Сигнал умножается на значения двух опорных синусоид, одна синусоида сдвинута относительно другой на 90° с частотой 50 Гц и амплитудой, равной двум. Одновременно ведутся вычисления в двух каналах.

Сигнал X_1 после вычисления первого канала, имеет двойную частоту и амплитуду, равную $2A = 10$ В (рис. 3). Сигнал X_3 – двойную частоту и амплитуду, равную $A = 5$ В (рис. 3).

В качестве ФНЧ может быть рассмотрено два возможных варианта фильтра. Первый вариант – цифровой фильтр-имитация аналогового R-C фильтра (ФИ). Работа фильтра заключается в том, что при быстрых изменениях входного сигнала, выходной сигнал стремится ко входу по экспоненте с постоянной времени T , и колебания входного сигнала фильтруются. К установке принимается три последовательных фильтра. Массив X_f формируется для фильтрации сигнала X_1 , а массив X_i формируется для фильтрации сигнала X_3 (рис.4).

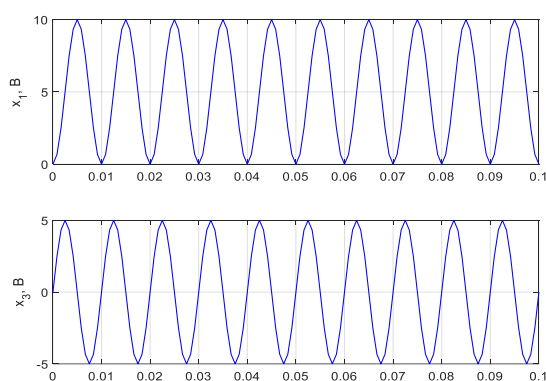


Рис. 3. Сигналы X_1 и X_3 после вычисления первого и второго канала

Fig. 3. X_1 and X_3 signals after calculating the first and second channels

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

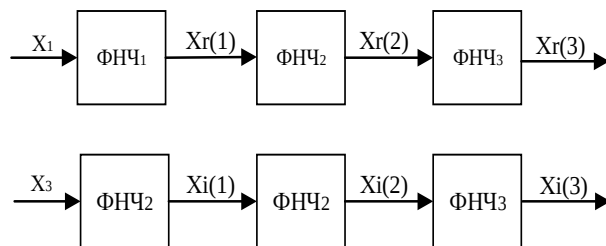


Рис. 4. Структурная схема работы трех последовательных фильтров-имитации

*Источник: составлено автором.

Fig. 4. Structural diagram of the operation of three consecutive simulation filters

Source: compiled by the author.

Второй вариант – цифровой фильтр скользящего среднего. Принцип действия фильтра заключается в усреднении выборок входного сигнала на периоде промышленной частоты. К установке принимаются два фильтра, по одному на период промышленной частоты (рис. 5).

Для данного фильтра формируются два массива размерностью N. При запуске алгоритма на каждом i-м шаге значения будут сдвигаться на одно, то есть второе – на место первого, третье – на место второго и т.д.

Далее необходимо выбрать фильтр, наиболее подходящий для поставленной задачи. Поведение фильтров при входном сигнале частотой 50 Гц (нормальный режим работы энергосистемы) представлен на рис. 6.

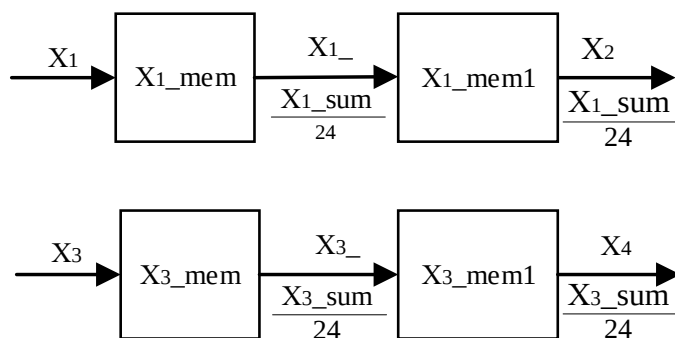


Рис. 5. Структурная схема работы фильтра скользящего среднего

*Источник: составлено автором.

Fig. 5. Block diagram of the moving average filter

Source: compiled by the author

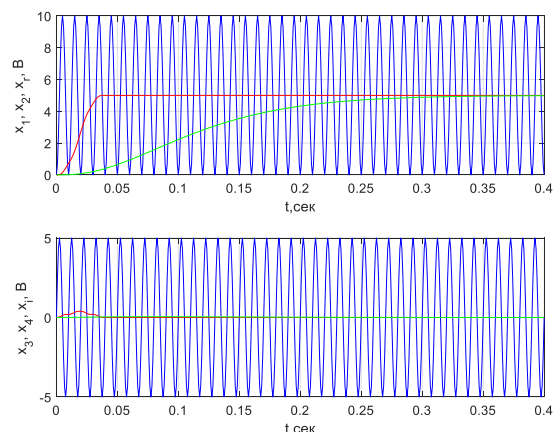


Рис. 6. Поведение фильтров в нормальном режиме работы энергосистемы

*Источник: составлено автором.

Fig. 6. Behavior of filters in normal power system operation

Source: compiled by the author.

При сигнале с частотой 50 Гц оба фильтра работают корректно и преобразуют сигнал X_1 до значения 5 В, а сигнал X_3 до значения 0 В. Работа фильтра-имитации вызывает слишком большую задержку во времени, что недопустимо для функционирования устройства автоматической синхронизации. Далее необходимо проанализировать работу фильтров при входном сигнале в аварийном режиме работы энергосистемы (с частотой 51 Гц), представленную на рис. 7.

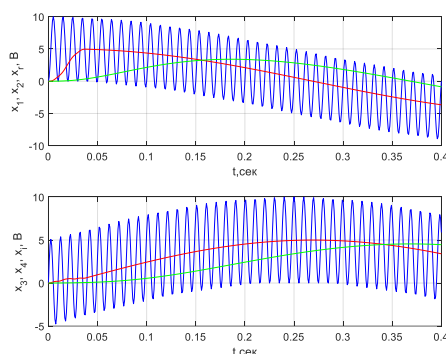


Рис. 7. Поведение фильтров в аварийном режиме работы энергосистемы

Fig. 7. Behavior of filters in emergency operation of the power system

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

При входном сигнале с частотой отличной от номинальной фильтр-имитация ведет себя некорректно и не фильтрует сигнал до нужного значения, в отличие фильтра скользящего среднего. Таким образом, наиболее подходящим для данной задачи оказался фильтр скользящего среднего. Визуализация процесса цифровой обработки входного сигнала в среде MATLAB и визуализация расчёта режимных параметров генератора и энергосистемы приведена на рис. 8.

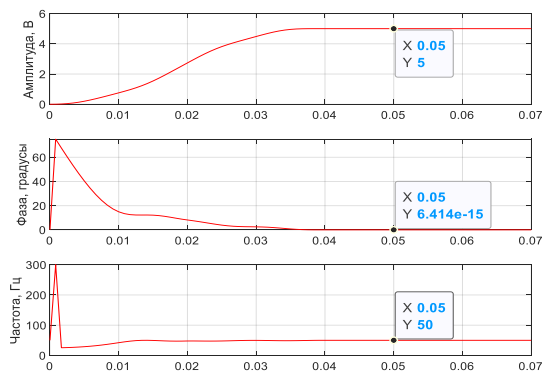


Рис. 8. Результат работы алгоритма по определению необходимых параметров входного сигнала напряжения

Fig. 8. The result of the algorithm for determining the necessary parameters of the input voltage signal

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Корректность работы всего алгоритма подтверждается полученными значениями амплитуды (5 В), фазы (0 градусы) и частоты входного сигнала напряжения (50 Гц), поскольку они совпадают с параметрами смоделированного сигнала (табл. 1).

Логический орган системы реализован программно, его главная задача – выполнять синхронизацию вариативно (автоматически традиционным и нетрадиционным методами или с переводом системы в режим ручного выполнения). Для логического органа разработан алгоритм с названием «Syn» и интегрирован в микропроцессорный терминал КПА-М.

Традиционный метод, которым система может выполнять синхронизацию,

является метод точной синхронизации (ТС). При методе ТС необходимо обеспечить равенство режимных параметров генератора и энергосистемы. То есть разница амплитуд электродвижущих сил (ЭДС), частот, фаз ЭДС (угол δ между векторами ЭДС) в пределе должны стремиться к нулю [1–3].

Существует еще один традиционный метод синхронизации – самосинхронизация. Выполнение процесса системой данным методом не предусмотрено в следствии большой величины уравнильных токов в момент включения.

Традиционные методы синхронизации не могут обеспечить успешный быстрый запуск генераторов (в аварийном режиме), поэтому возникла необходимость в разработке промежуточного метода синхронизации. Он является усовершенствованием существующих методов. Уставки для данного метода: угол δ в пределах от 0 до 30–40°, ток возбуждения – около 60 % от номинального тока (для тестируемого генератора от 6 до 10 А). Усовершенствованный метод назван ускоренным (УС), его алгоритм выполнения, моделирование и опробование подробно описаны в [1].

Логический орган использует рассчитанные в алгоритме PMU режимные параметры как входные величины, они нужны для получения разницы в параметрах генератора и энергосистемы (угол δ , скольжение s и разницы напряжений ΔU). Эти величины формируют условия включения генератора. Если их значение меньше уставки, то условия включения считаются оптимальными и логический орган формирует выходной сигнал на включение выключателя, что означает окончание цикла синхронизации.

Дополнительно в алгоритм вводятся переменные, отражающие неоптимальные условия включения аналогичные дискретным сигналам (текущее значение контролируемых параметров превышает заданную уставку).

После расчета параметров логический орган приступает к выполнению цикла синхронизации. Все методы синхронизации имеют идентичную структурой выполнения алгоритма и для его успешного окончания должны сочетаться несколько условий [20, 21]. Автоматическая синхронизация выполняется в случае, если:

- Ключ на лицевой панели терминала КПА-М находится в положении «автоматическая точная/ускоренная синхронизация»;
- Отсутствует блокировка по неоптимальным условиям включения. Величина текущих параметров скольжения s , угла δ и ΔU ниже уставок для данного метода;
- Отсутствие блокировки по напряжению (при исчезновении или снижении напряжения энергосистемы ниже 50 % от номинального);
- Нахождение угла опережения в допустимом диапазоне. Команда на включение должна подаваться заблаговременно с некоторым опережением. Это связано с инерционностью и ненулевым временем включения генераторного выключателя.

Величины, рассчитываемые в алгоритме SYN
Values calculated in SYN algorithm

Величина	Расчётная формула	Единица измерения
Скольжение s	$s = f_c - f_r$	Гц
Угол δ	$\delta = \varphi_c - \varphi_r$	°
Угол $\delta_{\text{опер}}$	$\delta_{\text{опер}} = s \cdot t_{\text{ВВ}} \cdot 2\pi$	°
ΔU	$\Delta U = U_c - U_r$	В
$s_{\text{неопт}}$	$s_{\text{неопт}} = s_{\text{max}} < s $	1/0 (дискр.)
$\Delta U_{\text{неопт}}$	$\Delta U_{\text{неопт}} = \Delta U_{\text{max}} < \Delta U $	1/0 (дискр.)
$\delta_{\text{неопт}}$	$\delta_{\text{неопт}} = \delta_{\text{max}} < \delta $	1/0 (дискр.)

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Метод ускоренной синхронизации является нетрадиционным и для него к описанному перечню добавляется дополнительное условие:

- Разница текущего тока возбуждения и уставки по току (6 А) не должна составлять более чем 0.5 А. Условие вводится во избежание ситуации синхронизации с пониженным током возбуждения.

Орган управляющих воздействий конструктивно объединяет два типа регуляторов: АРВ и АРЧ. При работе регуляторов в составе системы синхронизации АРВ необходимо работать в режиме выполнения заданий по напряжению и току возбуждения, а регулятору АРЧ – по частоте.

Основная цель взаимодействия регуляторов и логического органа с алгоритмом

синхронизации – приведение объекта (синхронного генератора) к заданному состоянию с режимными параметрами близкими к параметрам энергосистемы (рис. 9).

Логический орган системы формирует два типа выходных сигналов: первый дискретный, разрешающий регуляторам работу в качестве органа управляющих воздействий в составе системы синхронизации, второй тип сигнала – величина, к которой должны быть приближены параметры синхронизируемого генератора (задание на регулятор).

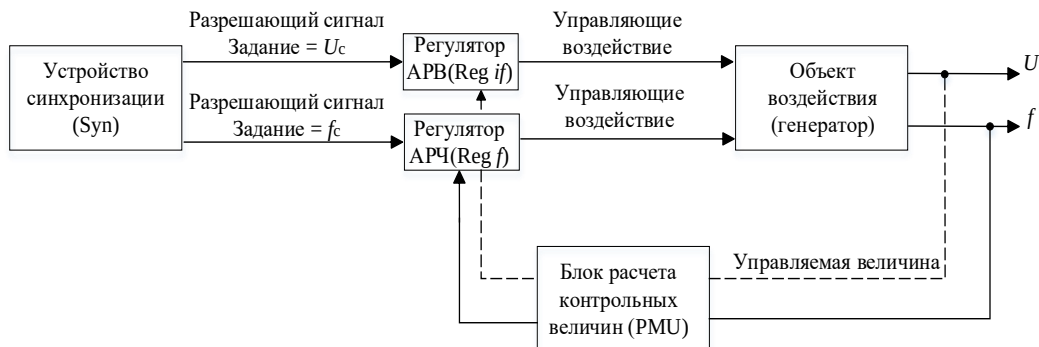


Рис. 9. Совокупность устройства синхронизации и регуляторов APЧ и APB

Fig. 9. A set of synchronization device and regulators of rotational speed and excitation current

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Обсуждение (Discussions)

После разработки алгоритмов измерительного и логического органов осуществляется их программная реализация на языке программирования C++ и интеграция в терминал КПА-М. Операция интеграции выполнена с помощью формирования и загрузки в комплекс специальных конфигурационных файлов, описывающих группы сигналов, с которыми взаимодействует система синхронизации.

После реализации предложенных алгоритмов была произведена экспериментальная проверка корректности их работы на физической модели — синхронном генераторе мощностью 12 кВт с записью осциллограмм для метода точной и ускоренной синхронизации.

Представленные на рис. 10, 11 осциллограммы охватывают весь процесс синхронизации методом ТС от начала работы системы до втягивания агрегата в синхронизм. Действующее значение напряжения повторяет изменение кривой мгновенных значений. Фаза напряжения генератора изменяется пилообразно, что связано с изменением частоты вращения генератора. Частота генератора незначительно изменяется в течение процесса, а частота вращения эквивалентного генератора энергосистемы постоянна в течение всего времени процесса и составляет 50 Гц. На этапе выполнения цифровой фильтрации входных сигналов метод ускоренной синхронизации не имеет отличительных особенностей от метода ТС.

Измерительный орган работает корректно, поскольку рассчитанные действующие значения повторяют форму мгновенных значений, диапазон изменения фазы не превышает 180 градусов, а отклонение частоты не превышает $\pm 0,5$ Гц.



Рис. 10. Фрагмент осциллограммы с входными

Fig. 10. A fragment of an oscillogram with voltage

сигналами напряжения из алгоритма PMU

input signals from the PMU algorithm

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

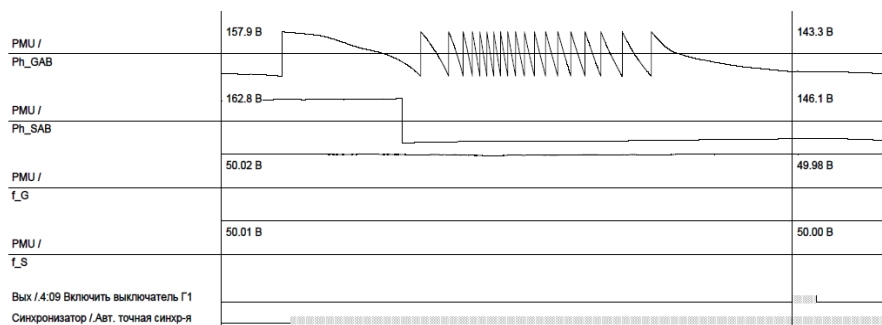


Рис. 11. Фрагмент осциллограммы с входными сигналами фазы и частоты из алгоритма PMU

Fig. 11. A fragment of an oscillogram with input phase and frequency signals from the PMU algorithm

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

На рисунке 12 приведены сигналы, рассчитываемые в алгоритме Syn логического органа на основании режимных параметров из алгоритма PMU (s , ΔU , δ). В момент времени, когда данные сигналы превышают выбранную уставку, формируются дискретные сигналы. Также в алгоритме синхронизации определяется угол опережения, форма которого повторяет форму скольжения.

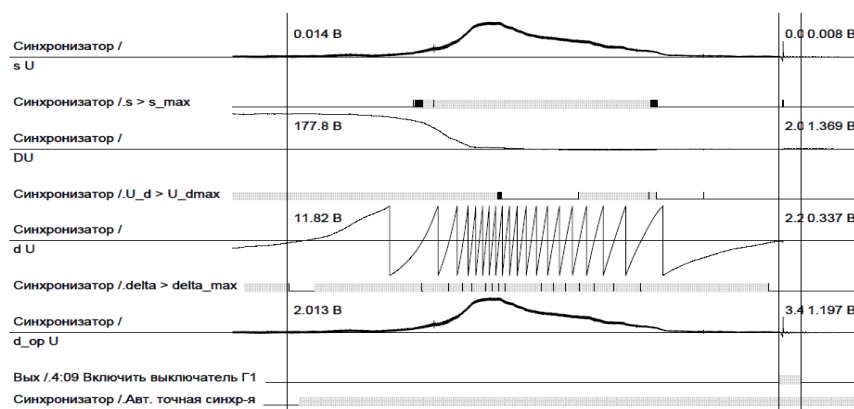


Рис. 12. Фрагмент осциллограммы с внутренними сигналами из алгоритма PMU

Fig. 12. Fragment of an oscillogram with internal signals from the PMU algorithm

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

При выполнении логическим органом синхронизации методом точной синхронизации в момент подачи команды на включение каждая из представленных величин не превышает принятых уставок для данного метода ($s = 0,21$ Гц, $\Delta U = 4,16$ В, $\delta = 7,26^\circ$, $\delta_{\text{опер}} = 30,1^\circ$). Логический орган корректно выдает сигнал на включение и при выполнении метода ускоренной синхронизации ($s = 0,035$ Гц, $\delta = 1,82^\circ$, $\delta_{\text{опер}} = 5,08^\circ$).

Это подтверждает корректность работы логического органа, поскольку он верно идентифицирует оптимальные условия и выдает команду на включение привода генераторного выключателя. После подачи команды ни один из дискретных сигналов неоптимальных условий не формируется.

Заключение (Conclusions)

Проект находится на стадии разработки, для логического и измерительного органов подсистемы сформированы алгоритмы работы. Практическая значимость и ожидаемые характеристики конечного варианта системы синхронизации:

- Расширенный по сравнению с аналогами функционал: использование традиционного метода точной синхронизации и разработанного метода ускоренной синхронизации;

- Автоматизация процесса синхронизации, снижение капитальных затрат на системы автоматики, так как одно устройство обеспечивает синхронизацию на нескольких выключателях;

- Стоимость устройства почти в 3 раза ниже по сравнению с аналогами, поскольку оно является цифровым и интегрируется в микропроцессорный терминал КПА-М, который параллельно может быть использован для решения других задач автоматизации;

- Уменьшение издержек на эксплуатацию генератора (ТОиР) в 1,5 раза, так как при включении подходящими методами части машины не подвержены недопустимым термическим и механическим воздействиям.

Социальная значимость проекта – исключение человеческого фактора и необходимости высокой квалификации персонала для ручного осуществления процесса [1].

Испытание работоспособности частей разрабатываемой системы проведено на генераторе мощностью 12 кВт. Алгоритм измерительного органа показывает корректную работу и высокую точность определения параметров (погрешность не превышает 0,6 %). Алгоритм синхронизации в момент подачи команды на включение верно идентифицирует условия (s , ΔU , δ не превышают принятых уставок). Это подтверждает корректность работы логического органа системы и успешность втягивания генератора в синхронизм.

Перспектива применения разработки – в учебном процессе университета и на реальных объектах энергетики. Потребителями данной системы могут быть электростанции (ТЭЦ, ГЭС и т.д), а также крупные промышленные предприятия с собственной генерацией.

Литература

1. Фёдорова В. А. Разработка автоматического устройства ускоренной синхронизации генераторов // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 3. С. 32–48.
2. Фёдорова В. А., Корнилович Д. В., Кириченко В. Ф., Глазырин Г. В. Разработка цифрового устройства синхронизации для автоматического включения в сеть генераторов различными методами // Электроэнергетика глазами молодежи-2021. 12 междунар. научно-техническая конференция. 2022. Ч. 1. С. 193–196.
3. Стогов А.Ю., Беляев А.Н. Повышение динамической устойчивости автономной энергосистемы на основе управления по взаимным параметрам // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. №21(1-2). С. 55-66.
4. Amin M., Rygg A., Molinas M. Self-synchronization of wind farm in an MMC-based HVDC system: A stability investigation // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2017. Vol. 32. No. 2. Pp. 458-470.
5. Bekiroglu E., Bayrak A. Automatic synchronization unit for the parallel operation of synchronous generators // IEEE EUROCON 2009. 2009. Pp. 766–771.
6. Bolf A. et al. Synchronization device for the model of distribution grid 22 kV // 2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE). IEEE. 2017. Pp. 1–4.
7. Li H., Zhang H., Xu Q. Design and implementation of integrated control instrument for micro synchronous generation unit // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE. 2017. Pp. 1–6.
8. Lee S. B. et al. Condition monitoring of industrial electric machines: State of the art and future challenges // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2020. Vol. 14. No. 4. Pp. 158–167.
9. Shah S. et al. VSC-based active synchronizer for generators // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2018. Vol. 33. No. 1. Pp. 116-125.
10. Wen B. et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. Vol. 31. No. 1. Pp. 26-38.
11. Zhan W. et al. Synchronization Process and a Pre-synchronization Method of the Virtual Synchronous Generator // 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). IEEE. 2020. Pp. 197-203.
12. Коновалов Ю. В. и др. Исследование электромеханических комплексов с синхронными генераторами при различных методах синхронизации // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2018. №. 12. С. 54–57.
13. Садовский С. А., Алафьева М. А. Исследование переходных процессов при включении синхронных генераторов на параллельную работу // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2017. Т. 1. №. 1. С. 208–215.
14. Углов А. В., Гусева Е. В., Углова М. Б. Влияние факторов синхронизации на качество переходного процесса при включении синхронного генератора на параллельную

работу с энергосистемой // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3. №. 4. С. 71–76.

15. Ревякин Е. Е., Власова Е. П. Анализ систем автоматики включения синхронных генераторов на параллельную работу // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе. 2018. С. 303–306.

16. Tian P., Platero C. A., Blázquez F. Protection method for synchronous machine during the paralleling connection process // 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE. 2018. Pp. 2385–2390.

17. Фёдорова В. А. Автоматическое устройство для включения в сеть генераторов методом ускоренной синхронизации // Наука. Технологии. Инновации. 15 Всерос. науч. конф. молодых ученых, посвящ. Году науки и технологий в России. 2021. Ч. 4. С. 196–200.

18. Burova A. Reducing the error of digital algorithms for deductive signal processing based on their multi-stage discrete Fourier transform by the difference digital filters // 2020 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). IEEE. 2020. Pp. 1–3.

19. Kovalenko P. Y. et al. Synchrophasor Evaluation based on point-on-wave Measurements // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). IEEE. 2020. Pp. 155–158.

20. Fyodorova V. et al. Application of Automatic Device for Generator Connection to the Network by Method of Accelerated Synchronization // IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2022. Pp. 461–466.

21. Fyodorova V. et al. Synchronization Digital Device Development for Generators Automatic Connection to the Network by Various Methods // 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC). 2021. Pp. 89–93.

Авторы публикации

Фёдорова Виктория Александровна - аспирант, младший научный сотрудник лаборатории ЛДвЭЭС, Новосибирский государственный технический университет. Email: win.victoria08@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9607-5713>.

Кириченко Виктор Фёдорович - аспирант, Новосибирский государственный технический университет. Email: glazyring@gmail.com.

Глазырин Глеб Владимирович - канд. техн. наук, доцент кафедры электрических станций, Новосибирский государственный технический университет. Email: viktorkirichenko-v@mail.ru.

References

1. Fyodorova V. A. Development of automatic device for generator accelerated synchronization. *Smart electrical engineering*. 2022; 3: 32–48.

2. Fyodorova V. A., Kornilovich D.V., Kirichenko V.F., Glazyrin G.V. Synchronization digital device development for generators automatic connection to the network by various methods. *Electric power industry through the eyes of youth-2021. 12 International Scientific and Technical Conference*. 2022. 1: 193–196.

3. Stogov A.Y., Belyaev A.N. Increasing the dynamic stability of an autonomous power system based on control by mutual parameters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21: 55–66.

4. Amin M., Rygg A., Molinas M. Self-synchronization of wind farm in an MMC-based HVDC system: A stability investigation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2017; 32: 458–470.

5. Bekiroglu E., Bayrak A. Automatic synchronization unit for the parallel operation of synchronous generators. *IEEE EUROCON 2009*. 2009: 766–771.

6. Bolf A. et al. Synchronization device for the model of distribution grid 22 kV. *2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)*. 2017: 1–4.

7. Li H., Zhang H., Xu Q. Design and implementation of integrated control instrument for micro synchronous generation unit. *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2017: 1–6.

8. Lee S. B. et al. Condition monitoring of industrial electric machines: State of the art and future challenges. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2020; 14: 158–167.

9. Shah S. et al. VSC-based active synchronizer for generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018; 33: 116–125.

10. Wen B. et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. 31: 26-38.
11. Zhan W. et al. Synchronization Process and a Pre-synchronization Method of the Virtual Synchronous Generator. 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). 2020: 197-203.
12. Konovalov U.V. et al. Research of electromechanical complexes with synchronous generators with various methods of synchronization. *Vestnik Angarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2018; 12: 54–57.
13. Sadovskij S. A., Alaf'eva M. A. Issledovanie perekhodnyh processov pri vklyuchenii sinhronnyh generatorov na parallel'nuyu rabotu. *Sbornik nauchnyh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017; 1: 208–215.
14. Uglov A. V., Guseva E. V., Uglova M. B. Synchronization factors influence on the transitional process quality of synchronous generator powering on parallel work with powerful network. *Power plants and technologies*. 2017; 3: 71–76.
15. Revyakin E. E., Vlasova E. P. Analiz sistem avtomatiki vklyucheniya sinhronnyh generatorov na parallel'nuyu rabotu. *Energoberezhenie i innovacionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse*. 2018: 303–306.
16. Tian P., Platero C. A., Blázquez F. Protection method for synchronous machine during the paralleling connection process. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2018: 2385–2390.
17. Fyodorova V. A. Разработка мультифункциональной системы синхронизации генераторов. *Nauka. Tekhnologii. Innovacii. 15 Vserossiyskaya nauchnaya konferenciya molodyh uchenykh*. 2021; 4: 196–200.
18. Burova A. Reducing the error of digital algorithms for deductive signal processing based on their multi-stage discrete Fourier transform by the difference digital filters. 2020 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). 2020: 1–3.
19. Kovalenko P. Y. et al. Synchrophasor Evaluation based on point-on-wave Measurements. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). 2020: 155–158.
20. Fyodorova V. et al. Application of Automatic Device for Generator Connection to the Network by Method of Accelerated Synchronization. IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2022: 461–466.
21. Fyodorova V. et al. Synchronization Digital Device Development for Generators Automatic Connection to the Network by Various Methods. 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC). 2021: 89–93.

Authors of the publication

Viktoriya A. Fyodorova - Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia. Email: win.victoria08@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9607-5713>.

Gleb V. Glazyrin - Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia. Email: glazyring@gmail.com.

Viktor F. Kirichenko - Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia. Email: viktorkirichenko-v@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика».

Получено 26.06.2023г.

Отредактировано 17.07.2023г.

Принято 24.07.2023г.

**АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ФАЗАМ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПО
КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА НЕРАВНОМЕРНОСТИ
НАГРУЗКИ ФАЗ, ПРИМЕНЯЕМЫЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Пестерев А.А., Костинский С.С.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)

им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

pesterevaa@srspsu.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Несимметрия нагрузок отрицательно сказывается как на работе потребителей, так и на самой электрической сети. Указанное явление приводит к снижению эффективности процессов передачи и распределения электрической энергии вследствие появления дополнительных потерь. Симметрирование нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ производят как на стадии проектирования сетей, так и при их эксплуатации. На стадии проектирования стараются равномерно распределить нагрузки по фазам. Авторами статьи решается актуальная задача распределения однофазных электропотребителей на стадии проектирования системы электроснабжения для анализа суммарной доли дополнительных потерь от несимметрии в структуре суммарных потерь в распределительных сетях 0,4 кВ. **ЦЕЛЬ.** Рассмотреть проблему несимметрии нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ, вызывающие дополнительные потери электроэнергии. Произвести анализ существующих методов симметрирования при распределении по фазам линий L_1 , L_2 , L_3 однофазных электроприемников на этапе проектирования электрических сетей. Разработать алгоритм распределения однофазных электроприемников, использующий в качестве исходных данных массивы мгновенных значений силы тока отдельных электроприемников, который заключается в поиске наилучшего решения распределения электроприемников по фазам линий L_1 , L_2 , L_3 , по критерию минимизации влияния несимметрии нагрузки на потери в элементах системы электроснабжения, используемых для транспортировки электрической энергии. **МЕТОДЫ.** Для решения поставленной задачи в работе использован метод полного перебора, реализованный с помощью троичной системы счисления, применяемой для кодирования распределения электроприемников по фазам системы электроснабжения. В качестве целевой функции используется коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по фазам системы электроснабжения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Приведены результаты использования разработанного алгоритма, применяемого в виде стороннего плагина для программного комплекса по проектированию, для распределения электроприемников одного из кабинетов, разрабатываемой ВМ офисного здания. Выполнено сравнение разработанного алгоритма с существующими наиболее широко применяемыми подходами к распределению однофазных электроприемников в системах электроснабжения. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработанный алгоритм позволил получить принципиально новые технические решения на этапе разработки проектной документации системы электроснабжения (стадия ПД и РД), способствующие повышению энергоэффективности передачи электрической энергии, за счет снижения дополнительных потерь от несимметричной нагрузки.

Ключевые слова: *коэффициент неравномерности нагрузки фаз; несимметричные нагрузки; однофазные потребители электрической энергии; троичная система счисления; проектирование систем электроснабжения; ВМ технологии.*

Для цитирования: Пестерев А.А., Костинский С.С. Алгоритм распределения по фазам в системах электроснабжения однофазных электроприемников по критерию минимизации коэффициента неравномерности нагрузки фаз, применяемый на этапе проектирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С. 18-28. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-18-28.

**ALGORITHM FOR PHASE DISTRIBUTION IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF
SINGLE-PHASE ELECTRIC RECEIVERS ACCORDING TO THE CRITERION OF
MINIMIZATION OF THE COEFFICIENT OF LOAD UNUNIFORMITY OF THE
PHASES USED AT THE DESIGN STAGE**

AA. Pesterev, SS. Kostinskiy

**South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov,
Novocherkassk, Russia
pesterevaa@srspu.ru**

Abstract: *RELEVANCE.* Unbalance of loads adversely affects both the work of consumers and the electrical network itself. This phenomenon leads to a decrease in the efficiency of the processes of transmission and distribution of electrical energy due to the appearance of additional losses. Balancing of loads in electrical networks of 0.4 kV is carried out both at the design stage of networks and during their operation. At the design stage, they try to evenly distribute the loads across the phases. The authors of the article solve the actual problem of distributing single-phase electrical consumers at the stage of designing a power supply system to analyze the total share of additional losses from unbalance in the structure of total losses in distribution networks of 0.4 kV. *THE PURPOSE.* To consider the problem of unbalance of loads in electrical 0.4 kV networks, causing additional losses of electricity. To analyze the existing methods of balancing when distributing the phases of the lines L1, L2, L3 of single-phase power receivers at the stage of designing electrical networks. Develop an algorithm for single-phase power consumer distribution, using arrays of instantaneous values of the current strength of individual electrical receivers as initial data. It stipulates calculating the best distribution of power consumers across the phases of lines L1, L2, L3 using the minimization of the load unbalance impact on the losses in power grid elements used for the electric power transfer. *METHODS.* To solve this problem, the authors employed the complete enumeration method implemented with a tertiary numerical system used to code power consumer distribution across the power supply grid phases. The coefficient accounting for the unbalance of load distribution across power grid phases is used as the target function. *RESULTS.* The developed algorithm can be applied as an external plug-in for the design software package to distribute the power consumers of one of the rooms in a BIM office building. The developed algorithm is compared to the existing widely-used approaches to single-phase power consumer distribution in power grids. *CONCLUSION.* The developed algorithm allowed producing brand-new engineering solutions while developing a design document for the power supply grid (design and detailed documentation stage). They help improve the efficiency of electric power transmission by reducing additional losses caused by unbalanced loads.

Key words: coefficient the unbalance of load distribution phases; asymmetric loads; single-phase high-power consumers; tertiary number system; design of power supply systems; BIM technologies.

For citation: Pesterev AA., Kostinskiy SS. Algorithm for phase distribution in power supply systems of single-phase electric receivers according to the criterion of minimization of the coefficient of load ununiformity of the phases used at the design stage. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):18-28. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-18-28.

Введение (Introduction)

Переход на более высокий уровень конкурентоспособности в отрасли промышленного и гражданского строительства во многих странах мира, побудил инжиниринговые и консалтинговые компании к созданию полноценных *Building Information Modeling* (далее *BIM*) проектируемых объектов. Наряду с зарубежными странами этому способствует и Правительство Российской Федерации. Начиная с 2017 г., оно начало реализовывать программы, направленные на создание необходимых условий для реализации и развития цифровой экономики. Для этого была разработана и введена в действие соответствующая нормативная база: постановление Правительства РФ № 331 от 5.03.2021 г., ГОСТ Р 57311-2016, ГОСТ Р ИСО 22263-2017, ГОСТ Р 57563-2017, СП 328.1325800.2017, СП 404.1325800.2018, Федеральные законы № 190-ФЗ от 29.12.2004 г, № 149-ФЗ от 27.07.2006 г., № 162-ФЗ от 29.06.2015 г.

Комплексная концепция *BIM* представляет собой информационную модель здания в виде трехмерной модели, связанную с информационной базой данных, где каждому

элементу модели могут присваиваться дополнительные параметры [1]. Основополагающая цель *BIM*, применительно к проектированию систем электроснабжения, создать ее расширенную 3D-модель, а функция цифрового двойника – эмулировать то, что она отражает [2]. Цифровой двойник служит для более качественной проработки проектов за счет интеграции данных и информации на протяжении всего срока службы объекта, что обеспечивает формирование цифрового жизненного цикла объекта [3, 4]. Цифровые двойники позволяют получить не только визуализацию объекта, но и производить экспериментальные исследования по моделированию процесса, получить сведения по наблюдению за моделируемой системой или объектом, а также изучать воздействие каких-либо внешних факторов. Таким образом, цифровой двойник является экспериментальной площадкой, где можно провести исследовательскую работу перед созданием прототипа системы электроснабжения. При этом подразумевается не только зеркальная копия моделируемых объектов, но и учет взаимосвязей между ними [5].

Процесс, связанный с моделированием цифровых двойников систем электроснабжения, подразумевает под собой работу в системе параметрического моделирования, способную самостоятельно выполнять автоматическую координацию любых изменений, происходящих в разрабатываемой модели. Важной составляющей данной технологии является единое информационное пространство, база данных, содержащая всю информацию о технических, энергетических, экологических, коммерческих и другие характеристиках объекта. Высокая точность и детальное описание модели позволяют проводить различные расчеты и анализ полученных результатов.

Передовой метод управления строительством с использованием *BIM* предлагает новые устойчивые подходы к проектированию систем электроснабжений. Это особенно полезно на ранних стадиях проекта, чтобы иметь возможность оценить и уменьшить воздействие электроприемников на систему электроснабжения [6]. *BIM* моделирование зданий включает геометрию, пространственные отношения, географическую информационную систему, а также взаимосвязь между всеми элементами системы электроснабжения в модели [7]. В зависимости от требований, стадии проекта и уровня детализации, к общей информации, включенной в *BIM*, могут быть добавлены конкретные параметры электроприемников, в том числе и в виде массивов мгновенных значений токов и напряжений за период, полученных от поставщиков оборудования и измеренных ими с помощью сертифицированной и поверенной аппаратуры, при проведении приемосдаточных испытаний [8].

Проведенные исследования потенциальности использования *BIM* в направлении развития методов проектирования систем электроснабжения, содержащих однофазные нагрузки, показали, что преимущество *BIM* возникает благодаря разработке цифрового двойника системы электроснабжения, с применением сторонних плагинов, программируемых специально под инженеров электриков, с дальнейшей их установкой в программный комплекс [8]. Концепт цифрового двойника системы электроснабжения заключается в объединении искусственного интеллекта, машинного обучения и аналитики больших данных об электроприемниках, для создания динамической модели системы электроснабжения, при работе в которой инженеры могут получить принципиально новые технические решения [9].

Наблюдаемая в последние десятилетия тенденция роста количества и повышения установленной мощности однофазных электроприемников, способствует увеличению показателей несимметрии нагрузки на объектах как промышленного, так и общественного назначения, что сказывается на качестве электрической энергии в системах электроснабжения [10,11]. Указанное явление приводит к снижению эффективности процессов передачи и распределения электрической энергии вследствие появления дополнительных потерь [12, 13]. Оценка экономического ущерба от снижения качества электроэнергии, из-за несимметрии токов и напряжений, обуславливается ухудшением энергетических показателей и сокращением срока службы электрооборудования, общим снижением надежности функционирования электрических сетей, увеличением потерь активной мощности и потребления активной и реактивной мощностей. Поэтому при проектировании систем электроснабжения необходимо выполнять оценку величины дополнительных потерь мощности, вызванных несимметричным характером нагрузки, в отдельных элементах сети, что позволит выполнить предварительные расчеты экономической эффективности проектируемой системы электроснабжения [14, 15]. Оценка величины указанных дополнительных потерь мощности необходима для анализа суммарной доли дополнительных потерь в структуре суммарных потерь в распределительных сетях 0,4 кВ, что в последующем скажется на выборе и типе

мероприятий по оптимизации режимов энергопотребления [12].

Авторы А.И. Орлов, С.В. Волков [16] представили исследования алгоритмов управления устройствами балансировки нагрузки в их групповой работе. Авторы А.М. Маклецов, И.Ф. Галиев, Р.И. Галиев и Лыу Куок Кьонг [17] были произведены исследования по мониторингу несимметрии нагрузок в сетях 0,4 кВ.

В настоящее время актуальной становится задача по совершенствованию существующих и разработке новых алгоритмов, направленных на снижение дополнительных потерь в распределительных сетях 0,4 кВ, обусловленных несимметричным режимом их работы [18, 19, 20]. Решению указанных задач способствует наращивание вычислительной мощности существующих ПК и повышение требований к проектируемым системам электроснабжения, содержащим однофазные нагрузки. Все выше сказанное, свидетельствует об актуальности исследований направленных на поиск новых алгоритмов для решения задач размещения и оптимального подключения к фазам сети однофазных электроприемников [21]. В немалой степени решению способствует и анализ на стадии проектирования массивов мгновенные значения силы токов и напряжений электроприемников за один период, в рамках реализации концепции *BIM*.

Цель исследования состоит в изучении проблемы несимметрии нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ, вызывающие дополнительные потери электроэнергии.

Научная значимость результатов в представленной работе определяется нахождением оптимального распределения по фазам системы электроснабжения однофазных линейных электропотребителей по критерию минимизации коэффициента неравномерности загрузки фаз, который рассчитывается в разработанной авторами программе, использующей метод полного перебора, которая реализована в виде плагина для программного комплекса *Revit* (номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023610303 от 10.01.2023 г.). Расчеты проводились на примере распределения силовых электроприемников одного из кабинетов проектируемого офисного здания.

Практическая значимость результатов работы определяется получением на стадии проектирования системы электроснабжения детальной оценки величины дополнительных потерь, вызванных несимметрией нагрузки.

Материалы и методы (Materials and methods)

Разработка и использование при реализации *BIM* сторонних плагинов, может способствовать выбору оптимальной схемы электроснабжения, с точки зрения минимизации дополнительных потерь активной мощности в основных элементах системы электроснабжения от несимметрии нагрузки. При этом при проектировании системы электроснабжения необходимо иметь достаточный объем первичной информации об элементах системы и параметров их работы в режиме протекания технологических процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии, что возможно при разработке цифровых двойников проектируемых систем электроснабжения [22 – 25].

Традиционно широко используемые при проектировании систем электроснабжения алгоритмы для распределения электроприемников по фазам, в своем большинстве, основаны на двух подходах.

Первый подход заключается в упорядочивании электроприемников по убыванию значений их номинального действующего значения силы тока, и дальнейшего распределения первых трех электроприемников с максимальными номинальными действующими значениями силы тока по одному на каждую фазу L_1 , L_2 , L_3 . После этого, в порядке уменьшения величины номинального действующего значения силы тока, выполняется пошаговое распределение на менее загруженные фазы оставшихся электроприемников. Указанный подход используется в соответствии с техническим руководством по проектированию электрических установок, предназначенным для специалистов, работающих в конструкторских бюро, разработанным и используемым в виде плагина компаниями *Systeme electric*.

Второй подход, также как и первый, на начальном этапе сводится к упорядочиванию электроприемников по убыванию их номинальной действующей силы тока. В последующем вычисляется сумма значений номинальной действующей силы тока всех электроприемников, и далее она делится на три. Таким образом, вычисляется эталонная величина действующего значения силы тока для каждой фазы, при которой будет отсутствовать несимметрия токов. На следующем этапе в фазу L_1 из упорядоченного набора электроприемников, начиная с наибольшего, электроприемники распределяются в порядке уменьшения номинального действующего значения силы тока, при условии, что их

суммарное действующее значение силы тока в фазе не превышает эталонного значения. Аналогичные действия выполняются для фаз L_2 и L_3 . Оставшиеся нераспределенными электроприемники с минимальными действующими значениями силы тока, распределяются пошагово по одному в порядке уменьшения величины их силы тока на менее загруженные фазы. Указанный подход используется в международной консалтинговой и инжиниринговой компании при разработке цифровых двойников систем электроснабжения на основе *BIM* технологий.

Описанные подходы не позволяют найти оптимальное (наилучшее) решение размещения электроприемников по фазам линий L_1 , L_2 , L_3 , которое бы позволило минимизировать влияние несимметрии нагрузки на элементы системы электроснабжения, используемые для транспортировки электрической энергии.

Одной из показательных величин, отражающих влияние несимметричной нагрузки на изменение соответствующих норм качества электрической энергии и потерь активной мощности в электрических сетях, является коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по фазам [26]. Указанный параметр рекомендуется применять в соответствии приказом Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 года № 326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям» при определении дополнительных потерь электроэнергии в сетях 0,4 кВ, обусловленных неравномерностью распределения нагрузок по фазам. Так же в работе [27], в качестве одного из количественных показателей, характеризующих схему сети, на основе объективных данных, для выведения зависимости дополнительных потерь от несимметрии нагрузки, предлагается использовать соответственно коэффициенты неодинаковости нагрузок фаз и дополнительных потерь от неравномерности нагрузки фаз. Причем, указанные коэффициенты, по своей сути, идентичны коэффициенту неравномерности, формула для расчета которого приведена в приказе № 326 Министерства энергетики [26].

С учетом вышесказанного, итоговым решением, сформулированной ранее задачи, является получение комбинации из общего количества электроприемников, путем распределения их по фазам линий L_1 , L_2 , L_3 , соответствующая минимально возможному значению коэффициента неравномерности нагрузки фаз, на основе массивов мгновенных значений силы токов и напряжений электроприемников за один период, загруженных в *BIM* системы электроснабжения проектируемого объекта.

Алгоритм решения поставленной задачи предлагается следующий:

- во-первых, для нахождения общего количества возможных комбинаций подключения однофазных электроприемников к фазам линий L_1 , L_2 , L_3 , необходимо определиться с видом представления данных о распределении электроприемников по фазам. Рациональным вариантом для представления данных, в рамках решения указанной задачи, служит троичная система счисления. Рациональность обусловлена тем, что троичная система счисления является наилучшим вариантом для кодировки / декодировки при распределении электроприемников по фазам. Указанный вариант заключается в представлении данных в виде комбинации, обозначаемой одной из трех цифр 0, 1, 2. Где цифра 0 обозначает, что электроприемник подключен к фазе L_1 , цифра 1 – к фазе L_2 , а цифра 2 – к фазе L_3 . Существует ряд работ, например [28], в которых предложен подход, основанный на управлении межфазными переключениями однофазных потребителей электроэнергии за счёт применения бинарных алгоритмов. Основу такого подхода составляет применение двоичного кодирования / декодирования при обработке данных для получения комбинаций распределения электроприемников по фазам. При этом указывается, что двоичная система счисления в современном мире широко используется цифровыми устройствами, системами и различными методами оптимизации. Однако, при использовании двоичной системы счисления при кодировании / декодировании данных о подключении электроприемника к одной из трех фаз используется 2 бита или 4 варианта, что приводит к получению дополнительных комбинаций, которые не имеют физического смысла, т.к. для одного электроприемника возможно только 3 варианта. По итогу имеет место нерациональное использование вычислительной мощности ЭВМ или усложнение алгоритма, с целью исключения незадействованных вариантов;

- во-вторых, необходимо выполнить анализ всех возможных вариантов комбинаций распределения электроприемников по фазам, исходя из их общего количества. Каждой комбинации подключения электроприемников к той или иной фазе соответствует порядковый номер в десятичной системе счисления от 1 до $3^n - 1$ где n – общее количество электроприемников. Далее для получения в троичной системе счисления комбинаций подключения к фазам сети электроприемников, необходимо перевести порядковый номер комбинации из десятичной системы счисления в троичную;

- в-третьих, после получения всех комбинаций с вариантами подключения

однофазных электроприемников к фазам линий L_1, L_2, L_3 , необходимо проанализировать каждую комбинацию, сгенерированную при помощи метода полного перебора, на предмет вычисления величины коэффициента неравномерности нагрузки фаз. Формула (1), для расчета коэффициента соответствует формуле (52), приведенной в приказе Министерства энергетики РФ № 326, и является целевой функцией поставленной задачи [29]:

$$K_{\text{нер}} = \frac{I_{L1}^2 + I_{L2}^2 + I_{L3}^2}{3 \cdot \left(\frac{I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N}{3} \right)^2} \left(1 + 1,5 \frac{R_H}{R_\Phi} \right) - 1,5 \frac{R_H}{R_\Phi} \quad (1)$$

где I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} – суммарные действующие величины значений силы тока по каждой фазе, после распределения однофазных электроприемников в соответствии с заданной комбинацией, вычисленные на основе суммирования массивов мгновенных значений силы токов каждого электроприемника, подключенного к соответствующей фазе, причем измерения массивов мгновенных значений силы тока отдельных электроприемников за один период синхронизированы по переходу мгновенных значений напряжения через ноль, и количество мгновенных значений за один период должно составлять не менее чем в два раза больше максимального значения частоты сети в соответствии с теоремой Котельникова-Найквиста;

$I_1, I_2, I_3 \dots I_N$ – номинальные значения силы тока отдельных однофазных электроприемников;

R_H, R_Φ – сопротивления нейтрального и фазного проводников;

- в-четвертых, следует выявить комбинацию с минимальным значением целевой функции, номер указанной комбинации в троичной системе счисления будет соответствовать оптимальному распределению электроприемников по фазам и являться решением задачи. Указанных комбинаций при использовании метода полного перебора будет шесть.

Исходные данные в виде массивов мгновенных значений силы тока отдельных электроприемников, синхронизированные по переходу мгновенных значений напряжения через ноль для выполнения научных исследований, могут быть заимствованы, например, из международной базы *Panda*. База содержит данные в виде массивов мгновенных значений силы токов и напряжений для ряда электроустановок, серийно используемых при проектировании офисных зданий, которые были получены в ходе лабораторных замеров.

Разработанный алгоритм в виде плагина для программного комплекса *Revit*, являющегося интегрированным инструментом среды проектирования системы электроснабжения, на основе данных об электроприемниках, используемых при разработке цифровых двойников на основе *BIM* технологий, был применен в проектной деятельности международной консалтинговой и инжиниринговой компании *ООО Bilfinger Tebodin RUS*. Указанный плагин позволил выполнить оптимизацию подключения к фазам однофазных электроприемников в системе электроснабжения офисного здания компании на этапе проектирования по критерию минимизации коэффициента дополнительных потерь при неравномерной нагрузке фаз. В рамках выполнения проекта была разработана *BIM* офисного здания, являющаяся ядром проекта, которая позволила получить, на этапе разработки рабочей документации, исходные данные в виде массивов мгновенных значений силы токов и напряжений электроприемников за один период, установленных внутри здания.

Результаты (Results)

Рассмотрим результаты работы разработанного плагина, на примере распределения силовых электроприемников одного из кабинетов офисного здания. В кабинете установлено 10 электроприемников: ноутбуки с действующими значениями силы потребляемого тока, рассчитанными на основании загруженных в *BIM* осциллограммам, соответственно 0,165 А, 0,656 А, 0,422 А, 0,571 А и настольные ПК – 0,979 А, 0,468 А, 1,053 А, 0,773 А, 1,113 А, 0,554 А. Для сравнения были выполнены расчеты по двум подходам, широко используемым при проектировании систем электроснабжения, которые ранее были изложены в статье. Результаты расчета полученных суммарных значений силы тока по каждой фазе, а также величин коэффициентов, учитывающих неравномерность распределения нагрузок по фазам, рассчитанные в соответствии с формулой (52), приведенной в приказе Министерства энергетики РФ № 326, отражены в табл. При расчете коэффициента, учитывающего неравномерность распределения нагрузок по фазам, было принято, что для проектируемой системы электроснабжения заложены одинаковые сечения нейтрального рабочего и фазного проводников.

Суммарные значения силы тока по каждой фазе и величин коэффициентов, учитывающих неравномерность распределения нагрузок по фазам
Summary values of current intensity for each phase and values of coefficients taking into account the uneven distribution of loads by phase

Параметры	I_{L1} , А	I_{L2} , А	I_{L3} , А	$K_{\text{нер}}$, о.е.
Первый подход	2,233	2,178	2,339	1,002194
Второй подход	2,331	2,22	2,199	1,001661
Разработанный плагин	2,257	2,245	2,248	1,000013

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Для оценки эффективности разработанного алгоритма, с точки зрения снижения потерь от несимметрии нагрузки, в соответствии с формулой (51), приведенной в приказе Министерства энергетики РФ № 326, воспользуемся формулой (2):

$$\Delta W = 0,7 K_{\text{нер}} \Delta U \frac{\tau}{T_{\text{макс}}}, \quad (2)$$

где ΔU – потеря напряжения в максимум нагрузки сети от шин ТП до наиболее электрически удаленного электроприемника, %;

$T_{\text{макс}}$ – время максимальной нагрузки, ч;

$\tau / T_{\text{макс}}$ – соотношение, значение которого нормируется в соответствии с приведенной в приказе таблицей, был выполнен расчет потерь электроэнергии в проводниках проектируемой системы электроснабжения с номинальным напряжением 0,4 кВ (в процентах от отпуска электроэнергии в сеть) для рассматриваемых подходов. При этом, на основе результатов работы *BIM*, проектируемой системы электроснабжения офисного здания, было установлено, что потеря напряжения в сети от шин ТП до наиболее электрически удаленного электроприемника составит 2,02 % и при $T_{\text{макс}} = 2000$ ч, отношение $\tau / T_{\text{макс}}$ составит 0,46. В рассматриваемом случае, применение разработанного плагина позволило снизить на этапе проектирования дополнительные потери от несимметричной нагрузки соответственно на 0,22 % и 0,16 %, по сравнению с традиционно используемыми подходами.

Заключение (Conclusions)

Разработанный плагин, используемый для проектирования систем электроснабжения на основе концепции *BIM*, содержащих однофазные нагрузки, реализующий разработанный алгоритм, позволяет получить принципиально новые технические решения, способствующие повышению энергоэффективности передачи и качества электрической энергии, при разработке проектной документации (стадия ПД и РД), что соответствует реализации Энергетической стратегии России на период до 2030 года.

Однако сложность решения поставленной задачи методом полного перебора, для нахождения наилучшего распределения электроприемников по фазам с минимальным коэффициентом, учитывающим неравномерность распределения нагрузок по фазам, зависит от общего количества электроприемников и языка программирования, на котором реализован предлагаемый алгоритм. В случаях, когда количество электроприемников становится больше 12 шт. полный перебор может занять значительное время и привести к переполнению памяти, выделяемой для хранения вычисленных значений коэффициентов неравномерности токов фаз для каждой комбинации.

Литература

1. Разов И.О., Березнев А.В., Коркишко О.А. Проблемы и перспективы внедрения *BIM* технологий при строительстве и проектировании // В сб.: *BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры*. Материалы всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29-30 марта 2018 года. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 27-31.
2. Hosamo H.H., Imran A., Cardenas-Cartagena J., et al. A Review of the digital twin technology in the AEC-FM industry // *Advances in civil engineering*. 2022. Vol. 2022. Art. no. 2185170.
3. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., et al. Towards a semantic construction digital twin: directions for future research // *Automation in construction*. 2020. Vol. 114. Art. no. 103179.
4. Zhao Q., Li Y., Hei X., et al. A graph-based method for IFC data merging // *Advances in civil engineering*. 2020. Vol. 2020. Art. no. 8782740.

5. Lu Y., Xu X. A digital twin reference model for smart manufacturing. 48th International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE). 2018. Vol. 2018, Art. no. 144541.
6. Ajayi S.O., Oyedele L.O., Ceranic B., et al. Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment // International journal of sustainable building technology and urban development. 2015. Vol. 6. Is. 1. P. 14-24.
7. Lin Y.C., Hsu Y.T., Hu H.T. BIM model management for BIM-based facility management in buildings // Advances in civil engineering. 2022. Vol. 2022. Art. no. 1901201.
8. Пестерев А.А., Костинский С.С. Концептуальная модель развития метода проектирования систем электроснабжения с применением BIM технологий // В сб.: Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов XLIII международной научно-технической конференции. Новочеркасск, 19-22 октября 2021 года. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2021. С. 103-106.
9. Lu Q., Xie X., Heaton J., et al. From BIM towards digital twin: strategy and future development for smart asset management // Studies in computational intelligence. 2020. Vol. 853. P. 392-404.
10. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н., Грачева Е.И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23, № 3. С. 209-222.
11. Гринкруг М.С., Митин И.А. Управление несимметрией токов в распределительных сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2009. №3-4. С. 80-84.
12. Дед А.В., Паршукова А.В., Халитов Н.А. Оценка дополнительных потерь мощности от несимметрии напряжений и токов в элементах систем электроснабжения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 10-3. С. 421-425.
13. Жежеленко И.В. Проблема качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2001. № 11. С.1-8.
14. Дед А.В., Бирюков С.В., Паршукова А.В. Расчет дополнительных потерь мощности от воздействия несимметрии напряжений и токов в элементах электрических сетей // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 280-282.
15. Л. Куок Кыонг, Маклецов А.М., А. Альзаккар и др. Разработка алгоритма симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кВ при распределенной нагрузке вдоль линии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 87-97.
16. Орлов А.И., Волков С.В. Сравнение алгоритмов управления устройствами выравнивания нагрузки при их групповой работе // Вестник Чувашского университета. 2018. № 3. С. 93–101.
17. Маклецов А.М., Галиев И.Ф., Галиев Р.И. и др. Мониторинг несимметрии нагрузок в сетях 0,4 кВ. // Энергетик журнал. 2019. №5. С. 6-25.
18. Журавлёв Т.А. Оценка качества электроэнергии на стадии проектирования системы электроснабжения // В сб.: Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы. Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. под общей редакцией А.И. Вострецова. Астана, 30 октября 2018 года. Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки», 2018. С. 25-29.
19. Дёмин Ю.В., Елизаров Д. А., Манусов В.З. и др. Совершенствование методов контроля и анализа показателей несинусоидальности напряжения в электроэнергетических системах // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 1. С. 200-206.
20. Оморев Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме математического моделирования трехфазной несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 93-102.
21. Курейчик В.В., Жиленков М.А. Генетический алгоритм для решения оптимизационных задач с явно выраженной целевой функцией // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2014. № 4 (19). С. 1-4.
22. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли // НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ. 2021. Т. 21. № 5. С. 748-754.

23. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital twin: applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP conference on manufacturing systems (CMS)*. 2018. Vol. 72. P. 243-248.

24. Grieves M., Vickers J.; Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, editors. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, Cham. P. 85-113.

25. Uhlemann T.H.-J., Schock C., Lehmann C., et al. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *7th Conference on Learning Factories. Procedia manufacturing*. 2017. Vol. 9. P. 113-120.

26. Дед А.В., Бирюков С.В., Паршукова А.В. Оценка дополнительных потерь мощности в электрических сетях 0,38 кВ на основе экспериментальных данных // *Успехи современного естествознания*. 2014. № 11 (ч. 3). С. 64-67.

27. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. 280 с.

28. Мохов В.А. Применение агентных метаэвристик в реализации технологической цепочки минимизации потерь электроэнергии // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2021. № 1 (209). С. 18-26.

29. Воротников В.Э., Железко Ю.С., Казанцев В.Н., и др. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. Под ред. Казанцева В.Н. М.: Энергоатомиздат, 1983. 386 с.

Авторы публикации

Пестерев Александр Александрович – аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение и электропривод» (ЭиЭ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1683-7521>, pesterevaa@srspu.ru

Костинский Сергей Сергеевич – к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение и электропривод» (ЭиЭ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4209-532X>, mirovingen1987@mail.ru

References

1. Razov IO, Bereznay AV, Korkishko OA. Problems and prospects of introduction of BIM technologies in the building and oil and gas industry. *BIM-modeling for construction and architecture, the proceedings of the all-russian research and practice conference*. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2018. pp. 27–31.

2. Hosamo HH, Imran A, Cardenas-Cartagena J, et al. A Review of the digital twin technology in the AEC-FM industry. *Advances in civil engineering*. 2022; 2022:2185170. doi: 10.1177/1933719113508817.

3. Boje C, Guerriero A, Kubicki S, et al. Towards a semantic construction digital twin: directions for future research. *Automation in construction*. 2020; 114:103179. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103179.

4. Zhao Q, Li Y, Hei X, et al. A graph-based method for IFC data merging. *Advances in civil engineering*. 2020; 2020:8782740. doi: 10.1155/2020/8782740

5. Lu Y., Xu X. A digital twin reference model for smart manufacturing. *48th International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE)*. 2018. 2018, Art. no. 144541.

6. Ajayi SO, Oyedele LO, Ceranic B, et al. Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment. *International journal of sustainable building technology and urban development*. 2015; 6(1):14-24. doi: 10.1080/2093761X.2015.1006708.

7. Lin YC, Hsu YT, Hu HT. BIM model management for BIM-based facility management in buildings. *Advances in civil engineering*. 2022; 2022:1901201. doi: 10.1155/2022/1901201

8. Pesterev AA, Kostinskiy SS. The conceptual development model for the power grid design method using the BIM technology. *Power system cybernetics. The proceedings of XLIII International science and technology conference*. Novocherkassk, October 19-22, 2021. Novocherkassk: South-Russian State Polytechnic University (NPI) n.a. M.I. Platov, 2021. pp. 103-106.

9. Lu Q, Xie X, Heaton J, et al. From BIM towards digital twin: strategy and future development for smart asset management. *Studies in computational intelligence*. 2020; 85:392-404. doi: 10.1007/978-3-030-27477-1_30.

10. Rakhimov OS, Mirzoev DN, Grachieva EI. Experimental study of quality and electricity losses in low voltage rural electric networks. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(3):209-222. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222.
11. Grinkrug MS, Mitin IA. Control of asymmetry of currents in distribution low voltage networks. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2009; 3-4:80-84.
12. Ded AV, Parshukova AV, Khalitov NA. Assessment of additional losses of power from asymmetry of tension and currents in elements of systems of power supply. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2015; 10-3:421-425.
13. Zhezhelchenko IV. The problem of power quality in industrial power supply systems. *Vestnik of Pryazovskyi State Technical University* 2001; 11:1-8.
14. Ded AV, Biryukov SV, Parshukova AV. Calculation of additional power losses from exposure unbalanced voltages and currents cell electric network. *Modern problems of science and education*. 2014; 5:280-282.
15. Luu Quoc Cuong, Makletsov AM, Alzakkar A, et al. Development of an algorithm for symmetrizing loads in networks of 0.4 kv at a distributed load along a line. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2022; 24(2):87-97. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-87-97.
16. Orlov AI, Volkov SV. Comparison of control algorithms for load balancing devices during their group work. *Bulletin of the Chuvash University*. 2018; 3:93–101.
17. Makletsov AM, Galiev IF, Galiev RI, et al. Monitoring of load unbalance in 0.4 kV networks. *Energetik Journal*. 2019; 5:6-25.
18. Zhuravlev TA. Assessing the quality of electric power while designing the power supply system. *The problems of modern science: problems, trends, and prospects. International (virtual) practical research conference, edited by A.I. Vostretsov*. Astana, October 30, 2018. Neftekamsk: Mir nauki, 2018. pp. 25-29.
19. Demin YuV., Elizarov DA, Manusov VZ, et al. Improving the methods of controlling and analyzing the non-sine voltage parameters in electric power systems. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*. 2018; 1:200-206.
20. Omorov TT, Takyrbashev BK, Osmonova RCh. To the problem of mathematical modelling of the three-phase asymmetrical distribution network. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22(1):93-102. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-93-102
21. Kureychik VV, Zhilenkov MA. The genetic algorithm for the optimization with a clear target function. *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie*. 2014; 4 (19):1–4.
22. Shvedenko VN, Mozokhin AE. The concept of managing the network structure of intelligent devices in the digital transformation of the energy industry. *SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS, AND OPTICS*. 2021; 21(5):748-754. (In Russ.). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754
23. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital twin: applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP conference on manufacturing systems (CMS)*. 2018; 72:243-248. doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.139
24. Grieves M., Vickers J.; Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, editors. *Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, Cham. P. 85-113.
25. Uhlemann T.H.-J., Schock C., Lehmann C., et al. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *7th Conference on Learning Factories. Procedia manufacturing*. 2017; 9:113-120. doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.043
26. Ded AV, Biryukov SV, Parshukova AV. Assessment of additional power losses in electric networks 0.38 kv on the basis of experimental data. *Advances in current natural sciences*. 2014; 11 (3):64-67.
27. Zhelezko YuS, Artemyev AV, Savchenko OV. *Calculating, analyzing, and standardizing the power losses in power grids: a practical calculation guidebook*. Moscow: ENAS, 2004.
28. Mokhov VA. The application of agent-based metaheuristics in realization of technological chain of energy losses minimization. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. TECHNICAL SCIENCES*. 2021; 1(209):18-26. (In Russ.). doi: 10.17213/0321-2653-2021-1-18-26.
29. Vorotnitsky VE, Zhelezko YuS, Kazantsev VN, et al; Kazantsev VN., editors. *Energy losses in power system grids*. Moscow: Energoatomizdat, 1983.

Authors of the publication

Aleksandr A. Pesterev - South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov, Novocherkassk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1683-7521>, pesterevaa@srspu.ru

Sergey S. Kostinskiy - South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov, Novocherkassk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4209-532X>, mirovingen1987@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика.

Получено 03.07.2023г.

Отредактировано 17.07.2023г.

Принято 24.07.2023г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-4-29-40

ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СЕТИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НАСОСНОГО АГРЕГАТА ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Капанский А.А., Павлов В.В.

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (Беларусь),
г. Гомель, Республика Беларусь
kapanski@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Эффективное функционирование городских систем водоснабжения играет важную роль в поддержании нормальной жизнедеятельности городов и населенных пунктов. Особенно важным является управление давлением и оптимизация гидравлических режимов в водопроводных сетях, поскольку они напрямую влияют на надежность водоснабжения и эффективное использование ресурсов. Однако, определение оптимальных параметров и методов регулирования в каждом конкретном случае требует тщательного исследования и анализа. В условиях постоянного увеличения требований к автоматизации водоснабжения и растущих инвестиций в её инфраструктуру, проблема корректного технико-экономического обоснования таких вложений приобретает особую актуальность. **ЦЕЛЬ.** Для плавного регулирования напорной характеристики насоса в условиях необходимости поддержания заданного давления сети водоснабжения повсеместно применяются преобразователи частоты. В условиях значимости точной оценки инвестиционных затрат на автоматизацию насосных агрегатов возникает необходимость получения уравнений, которые учитывают особенности эксплуатации водопроводной сети на предпроектной стадии. В связи с этим авторы статьи ставят перед собой цель исследовать степень влияния статической составляющей сети водоснабжения на изменение электропотребления насосного агрегата при частотном регулировании и апробировать полученные зависимости на реальной статистике режимов водо-и энергопотребления водозабора «Союз» Гомельского водоканала. **МЕТОДЫ.** Для решения поставленных задач использовались классические формулы подобия насосного агрегата, отражающие связь между расходом, напором и мощностью потребления. В качестве метрики оценки для верификации модели электропотребления насосного агрегата использовалась среднеквадратическая ошибка (mean squared error), средняя абсолютная ошибка (mean absolute error) и средняя абсолютная ошибка в процентах (mean percentage absolute error). **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проведенное исследование демонстрирует значительное улучшение точности моделирования электропотребления при использовании модифицированного коэффициента, отражающего степень изменения мощности при изменении частоты питающей сети. При применении этого подхода, среднеквадратическая ошибка уменьшается более чем в два раза, с 0,35 до 0,167, средняя абсолютная ошибка снижается с 0,347 до 0,165, и средняя абсолютная процентная ошибка уменьшается с 0,20% до 0,08%. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведенное исследование подтверждает эффективность применения частотного регулирования насосных агрегатов, обеспечивающего нелинейное изменение электрической мощности, и демонстрирует возможность более точного прогнозирования электропотребления, учитывающего специфику работы водопроводной сети. Результаты этой работы могут быть полезны для проектов по оптимизации систем городского водоснабжения, обеспечивая более точное планирование и использование ресурсов.

Ключевые слова: формулы подобия, насосных агрегат, частное регулирование, поддержание давления, статическая составляющая водопроводной сети, энергоэффективность насоса.

Для цитирования: Капанский А.А., Павлов В.В. Влияние статической составляющей сети водоснабжения на изменение мощности электропотребления насосного агрегата при частотном регулировании // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С. 29-40. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-29-40.

THE INFLUENCE OF THE STATIC COMPONENT OF THE WATER SUPPLY NETWORK ON THE CHANGE IN THE POWER CONSUMPTION OF THE PUMPING UNIT WITH FREQUENCY CONTROL

A.A. Kapansky, V.V. Pavlov

Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus
kapanski@mail.ru

Summary: *RELEVANCE.* The effective functioning of urban water supply systems plays an important role in maintaining the normal life of cities and towns. Of particular importance is the management of pressure and the optimization of hydraulic regimes in water-wired networks, since they directly affect the reliability of water supply and the efficient use of resources. However, the determination of the optimal parameters and methods of regulation in each specific case requires careful research and analysis. In the context of a constant increase in requirements for automation of water supply and growing investments in its infrastructure, the problem of a correct feasibility study for such investments is of particular relevance. *PURPOSE.* For smooth regulation of the pressure characteristic of the pump in the conditions of the need to maintain a given pressure of the water supply network, frequency converters are widely used. In the context of the significance of an accurate assessment of investment costs for the automation of pumping units, it becomes necessary to obtain equations that take into account the features of the operation of the water supply network at the pre-design stage. In this regard, the authors of the article set themselves the goal of studying the degree of influence of the static component of the water supply network on the change in the power consumption of the pumping unit with frequency regulation and testing the obtained dependencies on real statistics of the water and energy consumption modes of the Sozh water intake of the Gomel water utility. *METHODS.* To solve the tasks, classical formulas of similarity of the pumping unit were used, reflecting the relationship between flow, pressure and power consumption. The mean squared error, the mean absolute error and the average absolute error in percentages were used as the evaluation metric for verifying the electric power supply model of the pumping unit. *RESULTS.* The study demonstrates a significant improvement in the accuracy of power consumption modeling when using a modified coefficient reflecting the degree of power change when the frequency of the supply network changes. When using this approach, the standard error is reduced more than twice, from 0.35 to 0.167, the average absolute error is reduced from 0.347 to 0.165, and the average absolute percentage error is reduced from 0.20% to 0.08%. *CONCLUSION* The conducted research confirms the effectiveness of the use of frequency control of pumping units, which provides a nonlinear change in electrical power, and demonstrates the possibility of more accurate forecasting of electricity consumption, taking into account the specifics of the water supply network. The results of this work can be useful for projects to optimize urban water supply systems, providing more accurate planning and use of resources.

Keywords: similarity formulas, pumping units, private regulation, pressure maintenance, static component of the water supply network, pump energy efficiency.

For citation: Kapansky A.A., Pavlov V.V. The influence of the static component of the water supply network on the change in the power consumption of the pumping unit with frequency control *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):29-40. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-29-40.

Введение и литературный обзор (Introduction and literature review)

Оптимизация параметров режима в системах городского водоснабжения является важнейшей задачей, способствующей эффективному процессу транспортировки жидкости и исключению избыточного давления, возникающего в водопроводной сети. Превышение фактических значений параметров гидравлики над нормативными обусловлено большим

спектром причин, среди которых можно выделить некорректный выбор технических характеристик электронасосов, изменение конфигурации схемы водоснабжения, старение трубопроводов и оборудования. Регулирование давления осуществляется изменением режимов работы насосных агрегатов за счет трансформации геометрии напорного трубопровода или управлением частотой вращения вала электропривода насоса. Первый метод, называемый в практике дросселированием, реализуется с помощью частичного перекрытия запорной арматуры и не приводит к существенному изменению электропотребления насосного агрегата [1]. В свою очередь, регулирование скорости вращения рабочего колеса центробежного насоса обеспечивает нелинейное изменение электрической мощности, что делает такой метод управления режимами гидравлики эффективным, способствующим экономии электрической энергии при условии снижении частоты вращения электропривода [2, 3, 4].

При проведении литературного обзора по вопросам частотного регулирования насосного агрегата зачастую можно встретить классические формулы подобия. С их помощью уточняются значения основных величин, характеризующих насосный агрегат, таких как расход, напор и мощность. Известно, что снижение угловой скорости электропривода насоса приводит к пропорциональному изменению расхода подаваемой воды и квадратичному изменению напора. В статье [4] авторы Муравлева О.О., Вехтер Е. В. и Жарикова Т.В. приводят пересчет характеристик на другую частоту с помощью классических формул приведения. В работе авторов Мизюрина А.О. и Матвейчука Н.М. [5] для изменения электрической мощности используют строгую кубическую зависимость к отношению угловых скоростей вращения электропривода насосного агрегата. В тоже время, в источниках литературы можно встретить и формулы подобия, заданные с приблизительным нестрогим равенством [6, 7, 8, 9]. Такое отличие обусловлено влиянием разности геодезических отметок точек подачи жидкости и места установки насоса, что характеризует статический напор водопроводной сети.

Фащиленко В.Н. в работе [10] акцентирует внимание на то, что частотная характеристика мощности при статическом напоре равно нулю имеет явную кубическую характеристику, в обратном случае эта зависимость не выполняется. В условиях значимости точной оценки инвестиционных затрат на автоматизацию насосных агрегатов возникает необходимость получения уравнений, которые учитывают особенности эксплуатации водопроводной сети на предпроектной стадии.

В связи с этим *целью работы* является исследование степени влияния статической составляющей сети водоснабжения на изменение электропотребления насосного агрегата при частотном регулировании и апробировать полученные зависимости на реальной статистике режимов водо-и энергопотребления водозабора «Сож» Гомельского водоканала.

Научная значимость работы заключается в систематизации и дополнении существующих теоретических знаний в области регулирования и оптимизации гидравлических режимов в системах водоснабжения. Результаты исследования дополняют существующие подходы к определению оптимальных режимов работы насосных агрегатов и формированию схем водоснабжения.

Практическая значимость исследования связана с возможностью применения полученных результатов при проектировании, эксплуатации и модернизации систем городского водоснабжения. Ожидается, что результаты исследования помогут проводить более точную оценку инвестиционных затрат на автоматизацию насосных агрегатов.

Материалы и методы (Materials and methods)

Современные насосные станции, используемые для первичного подъема воды, оснащаются устройством частотного регулирования [2, 11]. Они функционируют в рамках единой автоматизированной системы водозаборов, что с одной стороны, дает возможность плавного регулирования производительностью насоса, с другой – поддержания установленного давления на оголовке скважины, тем самым предотвращая возникновение избыточного напора. Упрощённое представление схемы управления насосом приведено на рисунке 1.

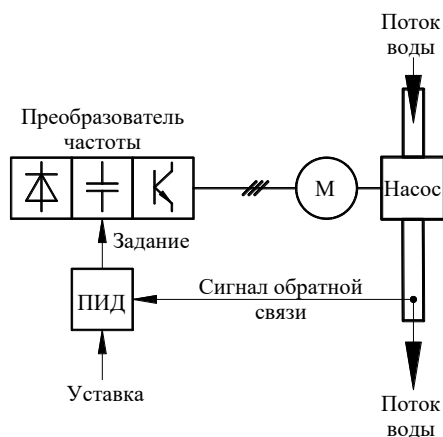


Рис. 1. Упрощённое представление схемы управления насосом

Fig. 1. Simplified representation of the pump control circuit

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Классический расчет экономической эффективности внедрения частотного преобразователя основан на определении величины снижения избыточного напора, который появляется в момент включения или отключения соседних скважин, работающих на общую гидравлическую сеть. Это приводит к изменению характеристики трубопроводной сети и смещению точки баланса режимов (рисунке 2 а). За счет регулирования скорости вращения рабочего колеса насоса меняется его напорная характеристика, в результате чего достигается точность поддержания заданного давления (рисунке 2 б).

Поведение напорной характеристики насоса в момент изменения частоты описывается формулами подбора [10]. Особый интерес представляет более глубокое исследование классических формул для понимания в каких случаях частотная характеристика имеет кубическую форму изменения мощности и как статическая составляющая сети влияет на изменение электропотребления.

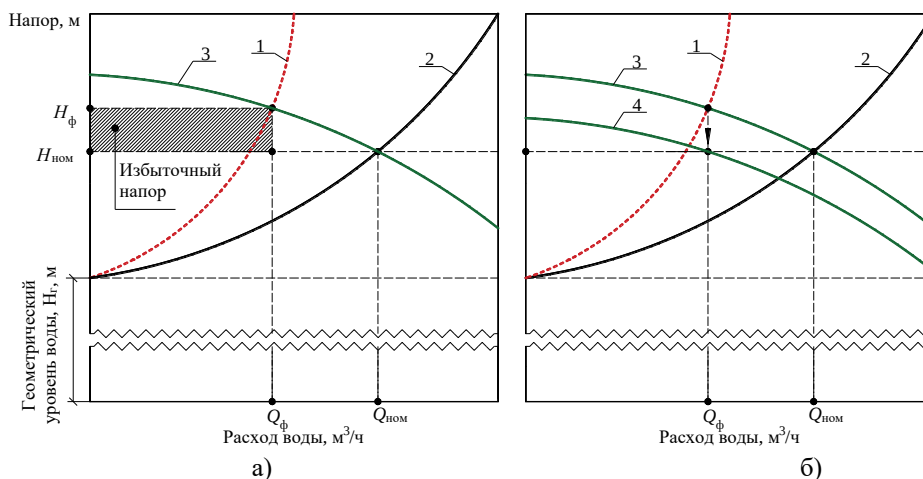


Рис. 2. Пояснение к процессу регулирования режимом работы насоса:
 а – появление избыточного напора при изменении характеристики трубопроводной сети;
 б – изменение характеристики насоса при частотном регулировании
 1 – напорная характеристика трубопроводной сети в номинальном режиме; 2 – напорная характеристика трубопроводной сети в фактическом режиме; 3 – напорная характеристика насоса при номинальной частоте;
 4 – напорная характеристика насоса при снижении частоты

Fig. 2. Explanation of the process of regulating the operating mode of the pump:
 а – the appearance of excess pressure when the characteristics of the pipeline network change; б – change in the characteristics of the pump with frequency regulation
 1 – pressure characteristic of the pipeline network in nominal mode; 2 – pressure characteristic of the pipeline network in the actual mode; 3 – pump head characteristic at nominal frequency; 4 – pressure characteristic of the pump with a decrease in frequency

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Как упоминалось ранее, уравнение для пересчёта величины электропотребления насоса при частотном регулировании называется формулой подобия и имеет следующий вид [10]:

$$\frac{N_1}{N_2} \approx \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^3 \quad \text{или} \quad \frac{N_1}{N_2} \approx \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^3, \quad (1)$$

где ω_1, ω_2 – скорость вращения ротора в 1-м и 2-м режиме работы соответственно, рад/с; N_1, N_2 – потребляемая мощность НА в 1-м и 2-м режиме работы соответственно, Вт [10]:

$$N = \frac{\rho \cdot Q \cdot H \cdot g}{\eta_H}, \quad (2)$$

где ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; Q – подача воды, м³/с; H – напор насоса, м; g – ускорение свободного падения, 9,8 м/с²; η_H – КПД насоса, отн.ед., который может быть представлен зависимостью от скорости вращения электропривода [10]:

$$\eta_H(\omega) = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^{0.36}}, \quad (3)$$

где $\eta_{\text{ном}}$ – номинальный КПД насосного агрегата.

Знак приблизительного равенства в формуле (1) связан с представлением соотношений в виде кубической степени, что является частным случаем, когда расстояние от уровня жидкости до точки подъема, в практике называемое геометрическим напором H_T (рисунок 3), оказывается равным нулю [7].

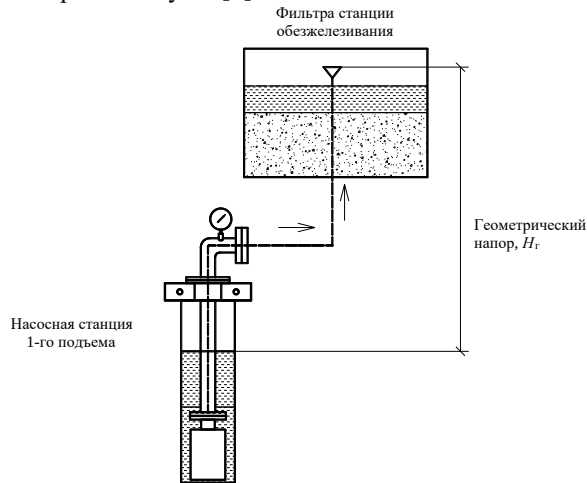


Рис. 3. К понятию геометрического напора насоса

Fig. 3. To the concept of the geometric head of the pump

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

С другой стороны, изменение производительности насоса без регулирования частотой (случай, приведенный на рисунке 2 а) также приводит к изменению гидравлического КПД, что может быть описано уравнением [12]:

$$\eta_H(Q) = \left(\frac{2 \cdot \eta_{\text{max}}}{Q_{\text{ном}}} \cdot Q - \frac{\eta_{\text{max}}}{Q_{\text{ном}}^2} \cdot Q^2 \right), \quad (4)$$

где η_{max} – максимальный гидравлический КПД насосного агрегата.

Сочетание уравнений ((3) и (4) позволяет описать гидравлический КПД насоса как нелинейную функцию угловой скорости и производительности (см. рисунок 4). Этот фактор

также важно учитывать при оценке необходимой величины мощности на валу электропривода в различных режимах работы.

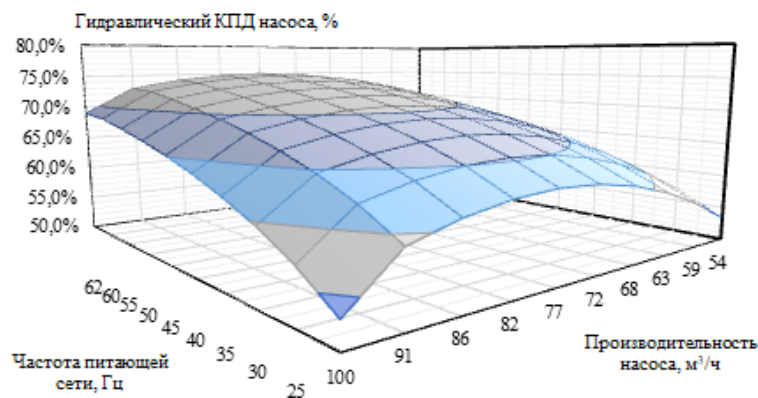


Рис. 4. Изменение гидравлического КПД насосного агрегата при изменении частоты и производительности насоса

Fig. 4. Change in the hydraulic efficiency of the pumping unit with a change in frequency and pump performance

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Для упрощения анализа и практического применения расчетных формул при подготовке технико-экономических обоснований внедрения устройств частотного регулирования или моделирования процессов электропотребления насосных агрегатов, целесообразен переход от угловой скорости вращения ротора электропривода к частоте питания электрической сети [13, 14]. Это объясняется тем, что обычно на панели управления частотными преобразователями предусмотрен вывод преобразованной частоты, которая может быть полезной для дальнейшего анализа. При этом необходимо учитывать известную связь $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f / p$, где f – частота сети; а p – число пар полюсов электродвигателя приводящего в движение подвижные части насоса.

В опубликованных ранее материалах [15, 16] исследовано влияние геометрического напора на изменение мощности электропотребление при снижении частоты питающей сети. В результате сделан вывод, что увеличение H_r приводит к искажению мощностной характеристики, отдаляясь от классического представления в виде кубической зависимости, рассмотренной в уравнении (1). На рисунке 5 представлены зависимости, иллюстрирующие характер изменения мощности насоса при различных соотношениях геометрического напора к максимальному значению, которое определяется при нулевой подаче.

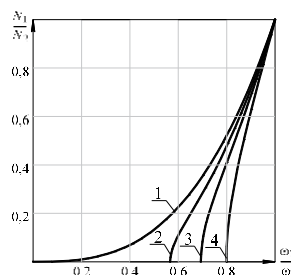


Рис. 5. Влияние относительного геометрического напора на частотную характеристику мощности насосного агрегата

Fig. 5. Influence of the relative geometric head on the frequency response

1 – $H_r / H_\phi = 0$; 2 – $H_r / H_\phi = 0.32$; 3 – $H_r / H_\phi = 0.48$; 4 – $H_r / H_\phi = 0.64$

1 – $H_z / H_\phi = 0$; 2 – $H_z / H_\phi = 0.32$; 3 – $H_z / H_\phi = 0.48$; 4 – $H_z / H_\phi = 0.64$

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Запишем уравнение (1) в общей форме, введя в качестве степени показатель k . Это дает возможность применить строгое равенство соотношений частот и мощностей насоса:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^k. \quad (5)$$

Заменяем f_2 и N_2 на частоту и мощность в номинальном режиме и методом логарифмирования, выразим из уравнения (2) показатель степени k :

$$k = \frac{\ln\left(\frac{N_1}{N_{\text{ном}}}\right)}{\ln\left(\frac{f_1}{f_{\text{ном}}}\right)}. \quad (6)$$

Связь режимов работы насосного агрегата с производительностью и напором, с учетом анализа, приведенного в [10], принимает следующий вид:

$$Q = Q_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{H_{\phi} \cdot \left(\frac{f}{f_{\text{ном}}}\right)^2 - H_{\Gamma}}{H_{\phi} - H_{\Gamma}}}; \quad (7)$$

$$H = H_{\Gamma} + (H_{\text{ном}} - H_{\Gamma}) \cdot \frac{H_{\phi} \cdot \left(\frac{f}{f_{\text{ном}}}\right)^2 - H_{\Gamma}}{H_{\phi} - H_{\Gamma}}; \quad (8)$$

где H_{ϕ} – фиктивный напор, определяемый при нулевой подаче, м; $f_{\text{ном}}$ – номинальная частота, Гц.

Упростим внешний вид формул (5) и (5) заменив $f / f_{\text{ном}}$ на относительную частоту f_* и H_{Γ} / H_{ϕ} на относительный геометрический напор $H_{\Gamma*}$ соответственно. Введя коэффициент, учитывающий тип перекачиваемой жидкости $a = H_{\phi} / H_{\text{ном}}$, итоговые уравнения производительности и напора примут следующий вид:

$$Q = Q_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{(f_*)^2 - H_{\Gamma*}}{1 - H_{\Gamma*}}}; \quad (9)$$

$$H = H_{\phi} \cdot \left[H_{\Gamma*} + (a - H_{\Gamma*}) \cdot \frac{(f_*)^2 - H_{\Gamma*}}{1 - H_{\Gamma*}} \right]; \quad (10)$$

где $a = \frac{H_{\phi}}{H_{\text{ном}}}$ – коэффициент учитывающий тип перекачиваемой жидкости, определяется типом насоса, при отсутствии данных для чистой воды может быть принят $\approx 1,25$ [10].

Рассмотрим подробнее полученное ранее уравнение (6). Для оценки влияния параметров гидравлической сети на коэффициент степени k подставим в формулу (6) выражение (2) раскрыв предварительно параметры производительности и напора полученными зависимостями (9) и (10). С учетом того вышеприведенного получаем следующее выражение:

$$k(f_*, H_{\Gamma*}) = \frac{\ln\left(\sqrt{\frac{(f_*)^2 - H_{\Gamma*}}{1 - H_{\Gamma*}}} \cdot \left[a \cdot H_{\Gamma*} + (1 - a \cdot H_{\Gamma*}) \cdot \frac{(f_*)^2 - H_{\Gamma*}}{1 - H_{\Gamma*}} \right]\right)}{\ln(f_*)}. \quad (11)$$

Полученное уравнение (11) дает представление того, что изменение мощности насоса напрямую зависит от двух величин: электрической частоты питания и геометрического напора сети водоснабжения. Следует отметить проблемные зоны данной формулы:

- при $f_* = 1$, т.е. $f = f_{\text{ном}}$, коэффициент k не определён, так как знаменатель выражения обращается в нуль.
- при $f_* < \sqrt{H_{r*}}$ результатом решения будет являться мнимое число.

Результаты и обсуждения (Results and discussion)

Проверим полученную зависимость (11) на статистических данных, отражающих режим работы скважины №158 водозабора «Сож» Гомельского водоканала. На этом объекте для подъема воды используется насосный агрегат Grundfos SP 77-5, работающий в составе общей гидравлической сети насосных станций первого подъема воды. Исследуемый насос характеризуется номинальным напором 60 м, производительностью 70 м³/ч и мощностью электропривода 18,5 кВт. Комплексная модернизация станции первого подъема воды на предприятии предусматривала автоматизацию работы насосов для поддержания заданного давления на оголовке скважины.

В результате на базе внедренной аналитической системы появилась возможность формировать информационную базу гидравлического и электрического режимов работы насосов для дальнейшего анализа. Исходная статистика включала в себя такие ключевые параметры как расход, напор, мощность и частоту питающей сети в момент измерения. Данные были собраны в течение 42 дней с часовым интервалом. Это позволило получить подробную статистику с глубиной истории равной 1009 значений, которая использовалась для проверки применимости полученных ранее уравнений. Для сравнения реального электропотребления с результатами моделирования были использованы классическая зависимость (5) при $k = 3$ и тоже уравнение с изменяющимся коэффициентом k , который пересчитывался в зависимости от существующей частоты питающей сети. На рисунке 6 представлен поверхностный график степени влияния k с учетом коэффициента $a = 1,67$, учитывающего тип перекачиваемой жидкости, и геометрического напора $H_r = 58$ м.

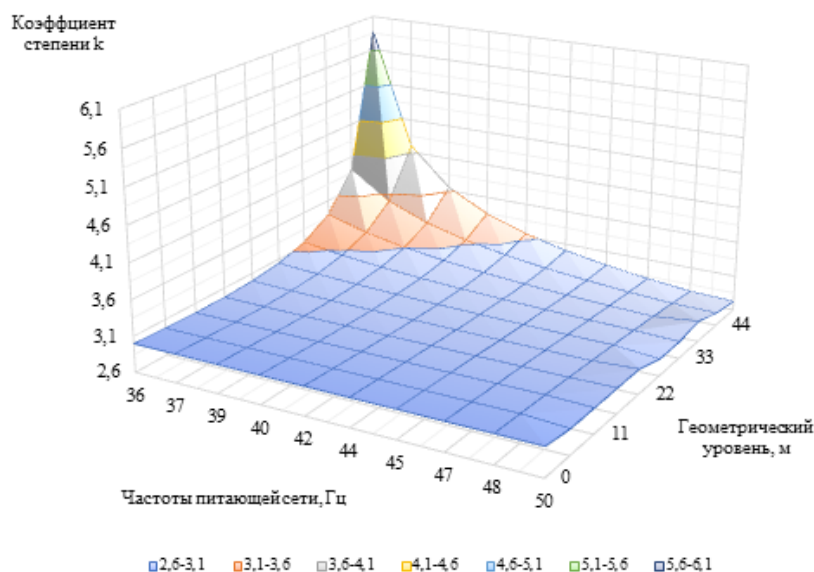


Рис 6. Зависимость коэффициента k от частоты сети и геометрического уровня

Fig. 6. Dependence of coefficient k on network frequency and geometric level

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Оценка качества полученной модели выполнялась путем сравнения истинного электропотребления с результатами моделирования для случая $k = 3$ и $k = \text{var}$. В роли метрик использовались такие показатели как MAPE (Средняя абсолютная процентная ошибка), MAE (Средняя абсолютная ошибка) и RMSE (Корень из среднеквадратичной ошибки) [17, 18]. Для снижения разброса данных использована экспоненциальное сглаживание в виде модели Брауна [19]. В таблице 1 представлены результаты оценки метрик исследуемых моделей.

Таблица 1
Table 1

Результаты оценки метрик модели электропотребления насоса
The results of the evaluation of the metrics of the pump power consumption model

RMSE (среднеквадратическая ошибка), кВт		MAE (средняя абсолютная ошибка), кВт		MAPE (средняя абсолютная ошибка в процентах), %	
$k = 3$	$k = \text{var}$	$k = 3$	$k = \text{var}$	$k = 3$	$k = \text{var}$
0,35	0,167	0,347	0,165	0,20%	0,08%

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Изучив полученные результаты, можно увидеть, что использование модифицированного коэффициента k , который изменяется в зависимости от текущей частоты питающей сети (уравнение (11)), приводит к значительному улучшению качества моделирования электропотребления по сравнению с классическим подходом, где k принимается равным 3. Так, для рассмотренного случая среднеквадратическая ошибка (RMSE) снижается более чем в два раза с 0,35 кВт до 0,167 кВт. Это указывает на значительное уменьшение ошибок предсказания, то есть модель с переменным k лучше описывает реальные данные. Аналогичные улучшения наблюдаются и для других метрик. Средняя абсолютная ошибка (MAE) снижается с 0,347 до 0,165 кВт, а средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) уменьшается с 0,20% до 0,08%.

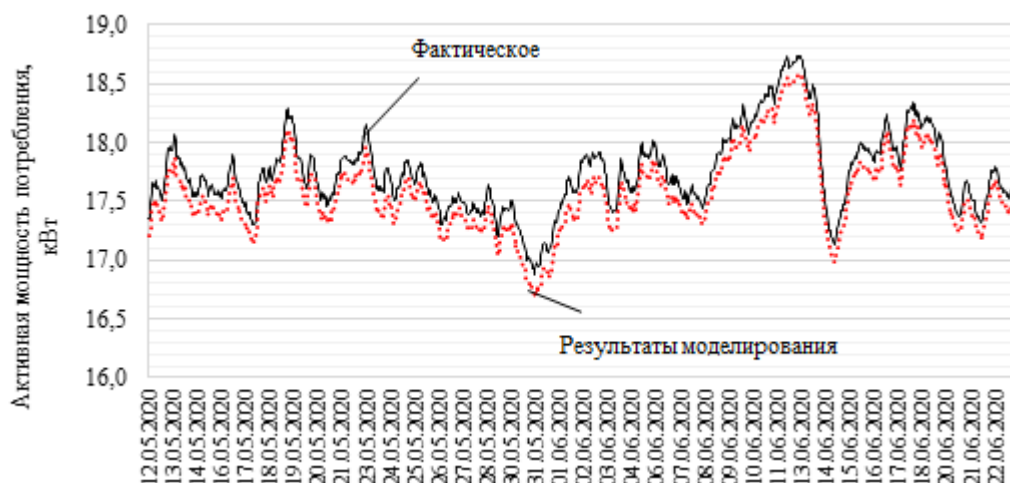


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования с фактическим электропотреблением

Fig. 7. Comparison of simulation results with actual power consumption

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

На основании проведенного анализа результатов метрик можно сделать вывод о значительном улучшении точности моделирования электропотребления насосных агрегатов при использовании переменного коэффициента k , изменяющегося в зависимости от текущей частоты питающей сети.

Заключение (Conclusion)

В работе представлены результаты исследования режимов электропотребления одной из скважины водозабора «Союз» Гомельского водоканала. Научная значимость проведенного исследования заключается в разработке и апробировании модели прогнозирования электропотребления насоса при учете частоты питания и статической составляющей сети водоснабжения. Основное внимание уделено сравнению фактического потребления электрической энергии с результатами моделирования, где использовались как классическое уравнение, отражающее кубическое изменение мощности при изменении частоты, так и предложенная модель, представленная адаптивным коэффициентом k , который пересчитывался в зависимости от текущей частоты питающей сети.

Результаты исследования показали значительное улучшение качества предложенной второй модели по сравнению с альтернативной. Среднеквадратическая ошибка (RMSE) снизилась более чем в два раза с 0,35 кВт до 0,167 кВт, средняя абсолютная ошибка (MAE) снижается с 0,347 до 0,165 кВт, и средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) уменьшается с 0,20% до 0,08%.

На практическом уровне, результаты исследования показывают, что предложенная модель электропотребления насоса, основанная на адаптивном коэффициенте, дает значительно более точные результаты по сравнению с классическими подходами. Наблюдаемое улучшение качества моделирования подтверждает возможность более эффективного технико-экономического обоснования автоматизации скважин в процессе проектирования, эксплуатации и модернизации систем городского водоснабжения.

В целом, проведенное исследование подтверждает эффективность частотного регулирования насосного агрегата, обеспечивающего нелинейное изменение электрической мощности, и показывает возможность более точного прогнозирования электропотребления на основе учета особенностей работы водопроводной сети.

Литература

1. Fedorov O. V. Expedient forecasting of power consumption //2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2017. С. 1-4.
2. Development of customized simulation models for high voltage generators / I. Kirillov, I. Morozov, N. Kuznetsov [et al.] // Sustainable Energy Systems: innovative perspectives : Conference proceedings, Saint-Petersburg, 29–30 октября 2020 года. – Saint-Petersburg: Springer, Cham, 2021. – P. 190-196. – DOI 10.1007/978-3-030-67654-4_21. – EDN GYZBKA.
3. Грачева Е.И. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей / Е.И. Грачева, О.В. Наумов. Москва: Издательство «Русайнс», 2017. – 168 с. – ISBN 978-5-4365-1661-5. – EDN YNMXXT.
4. Муравлева О. О., Вехтер Е. В., Жарикова Т. В. Оценка влияния энергетических характеристик асинхронного двигателя на энергосбережение насосного агрегата //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2005. Т. 308. – №. 1. – С. 174-178.
5. Мизюрин А.О., Матвейчук Н.М. Энергоэффективность использования частотно-регулируемого привода в системах водоснабжения в сельскохозяйственном производстве // Молодежь в науке-2016. – 2017. – С. 407-414.
6. Карелин В. Я., Минаев А. В. Насосы и насосные станции: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Стройиздат, 1986.- 320 с : ил.
7. Грунтович, Н.В., Влияние работающих двигателей на остаточные напряжения узлов комплексной нагрузки станций / Н.В. Грунтович, А.А. Капанский, В.М. Пупин, Д.О. Сафонов, О.В. Федоров // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 2. – С. 78–90.
8. Оптимизация схем электроснабжения промышленных предприятий / Е.И. Грачева, Т.В. Синюкова, Т.В. Табачникова, А. Н. Алимова. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2022. – 135 с. – EDN SMARQD.
9. Камаль С., Сулейман А. М. Особенности работы центробежных насосов с использованием преобразователя частоты вращения //Природообустройство. – 2013. – №. 5. – С. 64-67.
10. Фащенко В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: Учеб. пособие. — М.: Издательство «Горная книга». – 2011. – 260. с.: ил
12. Гришин А.П., Коэффициент полезного действия частотно-регулируемого электронасоса. Автоматизация и информатизация электрифицированного сельскохозяйственного производства. [Текст]/Гришин А.П., Гришин В.А.//Научные труды. Том 89. М.: ВИЭСХ, 2004. с. 118 – 127.
13. Романюк, В.Н. Интенсивное энергосбережение в промышленных теплотехнологиях / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, Т. В. Бубырь // Энергия и менеджмент. - 2013. - № 6. - С. 8-12.
14. Интеллектуальные системы учета как инструмент снижения потерь электрической энергии / Т. А. Мусаев, О. В. Федоров, С. Р. Шагеев, М. В. Прохорова // Строительство: новые технологии - новое оборудование. – 2021. – № 2. – С. 52-55. – EDN GDPLEJ.
15. Павлов В.В. Исследование степени влияния статического напора сети на

изменение активной мощности потребления насоса / В.В. Павлов, А.А. Капанский // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 2 / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С 61-64

16. Hruntovich, N. V., Kapanski, A. A., Baczynski, D., Vagapov, G. V., & Fedorov, O. V. (2019). Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. In E3S Web of Conferences (Vol. 124, p. 05060). EDP Sciences.

17. Chicco, D. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation / D. Chicco, M. J. Warrens, G. Jurman // PeerJ. Computer Science. – 2021. – Vol. 7. – P. 1-24. – doi 10.7717/PEERJ-CS.623. – EDN VSUBGE.

18. Грачева Е. И., Сафин А. Р., Садыков Р. Р. Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей //Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – Т. 10. – №. 1. – С. 48-52.

19. Васильев, А. А. Применение м-оценок для определения начального значения экспоненциальной средней в модели прогнозирования Брауна нулевого порядка / А. А. Васильев // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2021. – № 3(55). – С. 150-165. – doi 10.26456/2219-1453/2021.3.150-165. – EDN AMCGRV.

Авторы публикации

Капанский Алексей Александрович – доцент энергетического факультета «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. ORCID: 0000-0003-2902-2695. Email: kapanski@mail.ru.

Павлов Вадим Вячеславович – студент Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, mcplov24@mail.ru

References

1. Fedorov O.V. *Expeditious forecasting of power consumption*. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2017. С. 1-4.

2. Development of customized simulation models for high voltage generators / I. Kirillov, I. Morozov, N. Kuznetsov [et al.] *Sustainable Energy Systems: innovative perspectives* : Conference proceedings, Saint-Petersburg, 29–30 october, 2020. Saint-Petersburg: Springer, Cham, 2021. P. 190-196. doi 10.1007/978-3-030-67654-4_21. EDN GYZBKA.

4. Muravleva O. O., Vekhter E. V., Zharikova T. V. Evaluation of the study of the energy characteristics of an asynchronous motor on the energy saving of a pumping unit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2005. V.308. No. 1. pp. 174-178.

3. Gracheva, E.I., Naumov, O.V. *Loss of electricity and the efficiency of shop network equipment*. Moscow: Publishing house «Rusigns», 2017. 168 p. ISBN 978-5-4365-1661-5. EDN YNMXXT.

5. Miziuryn A.O., Matveychuk N.M. Energy efficiency of using a frequency-controlled drive in water supply systems in agricultural production. *Youth in science-2016*. 2017. 407-414.

6. Karelin V. Ya., Minaev A. V. *Pumps and pumping stations: Proc. for universities*. 2nd ed., Re-work. and additional. M.: Stroyizdat, 1986.

7. Gruntovich, N.V., Influence of operating engines on the residual stresses of the nodes of the complex load of stations / N.V. Gruntovich, A.A. Kapansky, V.M. Pupin, D.O. Safonov, O.V. Fedorov . *Vestn. Gomel. state tech. un-ta im. P. O. Sukhoi*. 2021. No. 2. pp. 78–90.

8. *Optimization of power supply schemes for industrial enterprises* / E. I. Gracheva, T. V. Sinyukova, T. V. Tabachnikova, A. N. Alimova. Kazan: Kazan State Energy University, 2022. - 135 p. EDN SMARQD.

9. Kamal S., Suleiman A. M. Peculiarities of operation of centrifugal pumps using a frequency converter. 2013. no. 5. -pp. 64-67.

10. Fashilenko V.N. *Regulated electric drive of pumping and fan installations of mining enterprises: Proc. allowance*. M.: Publishing house «Mining Book». 2011. 260. p.

12. Grishin A.P., Efficiency of a frequency-controlled electric pump. Automation and informatization of electrified agricultural production. / Grishin A.P., Grishin V.A. *Scientific works*. Volume 89. M.: VIESKh, 2004. p. 118-127.

13. Romanyuk, V. N. Intensive energy saving in industrial heat technologies / V. N. Romanyuk, A. A. Bobich, T. V. Bubyar. *Energy and management*. 2013. No. 6. pp.8-12.
14. Musaev T. A., Fedorov O. V., Shageev S. R., Prokhorova M. V. Intelligent accounting systems as a tool for reducing electrical energy losses. *Construction: new technologies - new equipment*. 2021. No. 2. P. 52-55. EDN GDPLEJ.
15. Pavlov V.V. Investigation of the degree of influence of the static head of the network on the change in the active power of the consumption of the pump / V.V. Pavlov, A.A. Kapansky. *Modern problems of mechanical engineering* : Sat. scientific tr. At 2 pm, Part 2 / M-formation Resp. Belarus [and others]; under total ed. A. A. Boyko. - Gomel: GSTU im. P. O. Sukhoi, 2023. P 61-64.
16. Hruntovich, N. V., Kapanski, A. A., Baczynski, D., Vagapov, G. V., & Fedorov, O. V. (2019). Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. In E3S Web of Conferences (Vol. 124, p. 05060). EDP Sciences.
17. Chicco, D. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation / D. Chicco, M. J. Warrens, G. Jurman. *PeerJ. Computer Science*. 2021. Vol. 7. P. 1-24. doi 10.7717/PEERJ-CS.623. – EDN VSUBGE.
18. Gracheva E. I., Safin A. R., Sadykov R. R. Application of an analytical method for calculating the reliability of elements of power supply systems based on probabilistic models. *Reliability and safety of energy*. 2017. V. 10. No. 1. S. 48-52.
19. Vasiliev, A. A. Application of m-estimates to determine the initial value of the exponential mean in the zero-order Brown forecasting model / A. A. Vasiliev. *Bulletin of the Tver State University. Series: Economics and Management*. 2021. No. 3 (55). pp. 150-165. doi 10.26456/2219-1453/2021.3.150-165. EDN AMCGRV.

Authors of the publication

Aliaksey A. Kapanski – Ph.D. tech. Sci., Associate Professor, Department of Power Supply, Gomel State Technical University. BY. Sukhoi, kapanski@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2902-2695

Vadim V. Pavlov - a student of the Gomel State Technical University. BY. Sukhoi, mcplov24@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Получено **18.07.2023г.**

Отредактировано **08.08.2023г.**

Принято **09.08.2023г.**

ВНЕДРЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СХЕМЫ ТЭЦ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ

Киришина Е.Ю.¹, Аникина И.Д.²

¹АО «Силовые Машины», г. Санкт-Петербург, Россия

^{1,2}Санкт-Петербургский политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия
kirshina.elena.yu@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Повышение эффективности работы станции с увеличением рабочих мощностей является одной из приоритетных задач развития энергоустановок. Одним из решений данного вопроса является внедрение топливных элементов в качестве основного или дополнительного источника мощности и теплоты. Разработка качественной схемы внедрения топливных элементов на тепловые станции позволит повысить их производственную мощность с возможностью дальнейшего снижения углеродного следа путем уменьшения потребления природного газа. ЦЕЛЬ. Проведение анализа эффективности внедрения топливных элементов для увеличения производственных мощностей ТЭЦ. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся метод, основанный на законе сохранения энергии при стационарных условиях работы схем. Выбранный метод расчета был реализован с применением программного обеспечения MatLab, DvigWT и Microsoft Excel. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье представлены три вида схем ТЭЦ в компоновке с топливными элементами и указанием их конкретных достоинств и недостатков. Выполнен анализ методов добычи водорода с выбором одного из них путем выполнения оценки себестоимости производства водорода. Произведен технико-экономический анализ внедрения топливных элементов на станции с учетом стоимости выработки водорода. Осуществлен расчет углеродного следа от внедрения топливных элементов на станции. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. При внедрении топливных элементов на ТЭЦ увеличивается производственная эффективность выработки электрической энергии на более чем 20 %, а мощность блока по выработке электроэнергии увеличивается на более чем 30 МВт. Расчеты показали, что использование топливных элементов приводит к значительному увеличению производственных мощностей, однако необходимо более подробно изучить методологию расчета самих топливных элементов и пути добычи водорода.

Ключевые слова: топливные элементы; водород; тепловая электрическая станция; парогазовая установка; комбинированная установка; экономическая целесообразность; электролиз..

Для цитирования: Киришина Е.Ю., Аникина И.Д. Внедрение топливных элементов в схемы тэц для увеличения производственных мощностей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С. 41-52. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-41-52.

INCREASING THE PRODUCTION CAPACITY OF THE CHP BY INTRODUCING FUEL CELLS

EYu. Kirshina¹, ID. Anikina²

¹Joint Stock Company «Power machines», Saint-Petersburg, Russia

^{1,2}St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia
kirshina.elena.yu@yandex.ru

Abstract: RELEVANCE. Improving the efficiency of the plant with an increase in operating capacity is one of the priority tasks of the development of power plants. One of the solutions to this issue is the introduction of fuel cells as the main or additional source of power and heat. The development of a high-quality scheme for the introduction of fuel cells into thermal power plants will increase their production capacity with the possibility of further reducing the carbon footprint by reducing the consumption of natural gas. THE PURPOSE. To develop thermal

power plant schemes in combination with fuel cells to increase the thermal efficiency of the thermal power plant. To consider the types of fuel cells and the principle of their operation and to analyze their effectiveness with justification of the choice of a specific type for further calculations. To study the methods and principles of hydrogen extraction with the choice of the optimal solution directly within the framework of this work. Perform a technical and economic analysis of the introduction of fuel cells to the station. **METHODS.** When solving this problem, we used a method based on the law of conservation of energy under stationary operating conditions of the circuits was used. The chosen calculation method was implemented using MatLab, DvigWT and Microsoft Excel software. **RESULTS.** This article presents three types of thermal power plant schemes in a layout with fuel cells and an indication of their specific advantages and disadvantages. The analysis of methods of hydrogen extraction with the choice of one of them by performing an estimate of the cost of hydrogen production is carried out. A technical and economic analysis of the introduction of fuel cells at the plant has been carried out, taking into account the cost of hydrogen production. The carbon footprint from the introduction of fuel cells at the station has been calculated. **CONCLUSION.** Using fuel cells at the CHP increases the production efficiency of electricity generation by more than 20%, and the power of the power generation unit increases by more than 30 MW. Calculations have shown that the use of fuel cells leads to a significant increase in production capacity, but it is necessary to study in more detail the methodology for calculating the fuel cells themselves and the ways of hydrogen production.

Keywords: fuel cells; hydrogen; thermal power plant; combined cycle gas plant; combined plant; economic feasibility; electrolysis.

For citation: Kirshina EYu, Anikina ID. Increasing the production capacity of the CHP by introducing fuel cells. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):41-52. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-41-52.

Введение (Introduction)

Природные ресурсы является наиболее широко применяемыми ресурсами. Их применяют повсеместно, не задумываясь о том, что это наиболее загрязняющее атмосферу и окружающую среду ресурс. Кроме того, природные ресурсы являются исчерпаемыми и невозобновляемыми, что вскоре приведет к их полному исчезновению [1].

На сегодняшний день многие страны озабочены проблемой парниковых газов и глобального потепления из-за них. Россия в том числе. По данным Европейской комиссии Россия занимает пятое место среди стран по наибольшим выбросам CO_2 за год. Это не самый большой показатель, но и не такой маленький. Только 1942,54 млн т за 2021 год парниковых газов было произведено на территории России [2].

Ещё одной главной проблемой энергетики является применение низкопотенциальных энергоустановок. Всё меньший прирост КПД и их единичной мощности достигается в современных энергоустановках [3]. Большая часть разработок направлена на улучшение протекания процесса, но не пересмотр его самого. Последней «прорывной» технологией с пересмотром работы самого цикла является создание цикла Брайтона-Ренкина путем надстройки парового контура (цикл Ренкина) газовым (цикл Брайтона).

Данный цикл до сих пор широко развит и продолжает развиваться, однако его применение позволяет достигать все меньший прирост КПД и единичных мощностей.

Одной из идей создания высокопотенциальной установки принадлежит английскому физiku Вильяму Гроуву, который в 1839 году исследовал электролиз воды в растворах серной кислоты на платиновых электродах. Замкнув электроды ученый реализовал гальванический элемент с двумя газовыми электродами (водород и кислород) и кислотным электролитом (серная кислота) тем самым дав предпосылки к созданию топливных элементов [4].

На данный момент топливные элементы переживают активную стадию развития. Их конструкции совершенствуются, а количество используемых электролитов для протекания процесса с каждым разом растет. Также существует и множество вариантов применения топливных элементов: они широко применяются в машиностроении и в качестве аккумуляторных батарей для ноутбуков и телефонов, предпринимаются попытки применения их в авиации и в энергоустановках.

В данной статье предлагается рассмотреть применение топливных элементов на ТЭЦ с возможностью их дальнейшей реализации на самом объекте.

В работе были выполнены следующие задачи:

1. Разработка схем включения установки с топливными элементами в составе ПГУ-блока;

2. Анализ влияние ТЭ на КПД по выработке электрической энергии каждого из циклов;

3. Выполнение технико-экономического анализа внедрения ТЭ.

В работе представлена классическая схема ПГУ, на базе которой будут приведены три дополнительные схемы с топливными элементами. Для каждой схемы будут представлены их технические параметры и представлена экономическая обоснованность применения той или иной схемы.

Также в работе приведен предварительный анализ добычи водорода для работы топливных элементов и технико-экономический анализ нескольких вариантов электролиза. Дополнительно к этому рассмотрен углеродный след от внедрения каждой из схем с предложениями улучшения данного параметра.

Данная статья может дать импульс к созданию гибридных станций с топливными элементами для повышения КПД энергетических установок и вырабатываемой ими единичной мощности.

Такое решение позволит наиболее эффективно использовать природные ресурсы с наибольшим КПД, а усовершенствование методов добычи водорода позволит производить его не только для работы топливных элементов с наибольшей эффективностью и наименьшим загрязнением окружающей среды, но и для его продажи.

Целью исследования является разработка наиболее работоспособной, экономически и энергетически выгодной в применении схемы станции в компоновке с топливными элементами. Рассчитать технико-экономические параметры каждой предлагаемой схемы и отследить, как внедрение топливных элементов на станцию повлияют на углеродный след.

Научная значимость данного исследования заключается в теоретическом рассмотрении вариантов компоновки ТЭЦ с топливными элементами с целью выявления положительных и отрицательных факторов, которые могут повлиять на работу всей станции. Также изучение углеродного следа позволит оценить возможность применения топливных элементов с дальнейшим изучением рабочего процесса для его улучшения.

Практическая значимость исследования заключается в том, что данные исследования можно применить непосредственно на станции для улучшения технико-экономических показателей с дальнейшим снижением выбросов углеродного газа в атмосферу. Также данные исследования можно применить при разработке мини-ТЭЦ на базе топливных элементов с выбором оптимальной схемы для тех или иных нужд.

Литературный обзор (Literature review)

Наиболее подробно о существующих типах топливных элементов (ТЭ) и их практическом применении рассмотрено в трудах [5, 6]. Авторы статьи уделили большое внимание наиболее распространённым типам ТЭ, их конструкции, основным характеристикам и их применению в различных сферах жизнедеятельности людей.

Авторы статьи отмечают, что при стационарном энергоснабжении наиболее привлекательными выступают высокотемпературные топливные элементы (ТОТЭ), которые позволяют достичь наибольшей эффективности при конверсии природного газа за счет отходящей теплоты. Однако наиболее надёжными считают установки на основе фосфорной кислоты (ФКТЭ) для решения задач децентрализованного энергообеспечения и для транспортных средств.

Более подробно о ТЭ описано в трудах [7], где автором рассмотрены конструкции и варианты их применения в различных отраслях. В данной книге большое внимание уделено механизму работы ТЭ и путям их совершенствованию.

Относительно конструкций ТЭ существует множество вариантов их реализации, которые имеют как свои достоинства, так и недостатки, но многие ученые продолжают разрабатывать все более совершенные установки. Например, в статье [8] предложена конструкция мембранно-электродного блока (МЭБ), изготовленного с помощью технологии трафаретной печати. С помощью численной модели были найдены основные параметры модели и в дальнейшем проведены более качественные расчеты.

На данный момент конструкции ТЭ представляют собой небольшие блоки, которые собирают воедино в пакеты при необходимости получения большей мощности, например, для работы на станциях. Так в статье [9] рассмотрен вариант планарного

пакетного исполнения ТОТЭ и рассчитаны потери устойчивости конструкции. В работе рассчитана рациональная геометрическая характеристика и доказана ее справедливость.

Также для планарных исполнений ТОТЭ в статье [10] рассмотрены трехслойные керамические мембраны на основе стабилизированного диоксида циркония. Данные мембраны были получены методом литья на движущуюся ленту и было доказано, что такая конструкция мембран достаточно большой предел прочности на изгиб и по значению превосходит однослойные мембраны. В статье упоминается, что такие мембраны прошли непосредственно испытания на работающем ТОТЭ и доказали свою эффективность в работе.

Относительно технико-экономической целесообразности применения непосредственно водорода на тепловой электростанции (ТЭС) описано в статье [11], где авторы рассмотрели методику использования избыточной электроэнергии ТЭС для производства водорода. В статье представлен вариант добычи водорода методом электролиза в периоды ежедневных провалов электропотребления на ТЭС. Предлагается применение водорода для перегрева пара в паротурбинных блоках (ПТУ) путем сжигания водорода в паровой среде.

Также наиболее подробно о проблемах и преимуществах применения водорода в энергосистеме описано в трудах [12]. В издании затрагивается вопрос актуальности интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистему, в том числе «зеленый» водород. Авторами приведен обзор всех нюансов при переходе на водородную энергетику и затронуты вопросы снижения углеродного следа на этапах добычи водорода.

Исходя из способа добычи водорода его классифицируют по нескольким видам: зеленый, желтый (оранжевый), бирюзовый, изумрудный, серый, голубой, коричневый (бурый). Исходя из потребностей, выбирается необходимая классификация водорода и под данный тип подбирается технология его получения. Классификация водорода по способам производства представлена в работе [13]. Статья посвящена подробному изучению каждого из типов водорода и представлены варианты их добычи и где тот или иной тип может применяться.

Одной из технологий добычи водорода является электролиз воды. Данной теме посвящены работы [14, 15], в которых представлен анализ последних разработок в данной области включая высокопроизводительные недорогие электролизаторы. В дополнение рассмотрены варианты дальнейшего улучшения процесса электролиза воды с представлением дорожной карты для поддержания разработок, связанных с электролизом.

Также наиболее изученным методом добычи водорода является метод паровой конверсии метана, пропана и других газов. Например, в патенте [16] рассматривается изобретение парового конвертера жидкого углеводородного с охлаждением. Такое решение возникло при изучении процесса протекания реакции, тем самым учеными отмечено, что при повышении концентрации монооксида углерода (угарного газа) в парогазовой смеси приводит к перегреванию катализатора, что приводит к его термической дезактивации. Для исключения такого риска был придуман блок охлаждения катализатора и описан в работе.

Тем не менее, добыча водорода сопровождается большими выбросами диоксида углерода. В статье [17] автор представил результаты сравнительного расчета углеродного следа при различных вариантах опционального оснащения холодильного оборудования. Рассмотрены холодильные машины с полной, частичной и без рекуперации тепла в конденсаторе воздушного охлаждения.

При разработке данной тематики, не смотря на обширные научные труды, возникли трудности с определением конструкции ТЭ. Многие применяемые ТЭ и имеющие открытый доступ к своей конструкции и техническим параметрам на данный момент имеют малые мощности. Более мощные ТЭ, направленные на работу непосредственно на промышленных предприятиях, являются скрытыми в связи с их научной новизной.

Также на данный момент в России нет аналогов производства ТЭ для промышленных предприятий, не смотря на их эффективность.

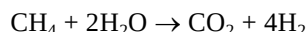
Материалы и методы (Materials and methods)

В связи с вышеуказанной проблемой, при моделировании в качестве ТЭ принимался объект, представляющий собой черный ящик и известными входными и выходными параметрами. В основу расчета принимался закон сохранения энергии, закон Фарадея и уравнение Гиббса-Гельмгольца.

На основе изученных литературных источников было принято, что наиболее подходящим для работы на промышленных предприятиях являются твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), так как они имеют наибольший КПД и рабочие температуры до 1000°C. Однако, при понижении температуры ниже 800°C значительно снижается проводимость, что требует смены типа ТЭ. Тем не менее, применение различного рода электролитов, например, $CE_{1-x}Gd_xO_{2-x/2}$ позволяет увеличить температурный порог проводимости до 600°C [18].

В ходе выполнения работы было разработано три варианта схем ТОТЭ с ПГУ. За основу была принята схема ПГУ-блока, состоящая из паровой турбины SST-300, газовой турбины SGT-800, котла-утилизатора Е-57,5/12,0-7,4/0,6-520/280.

В расчетах принималось, что водород добывается путем применения метода паровой конверсии метана, так как данный метод является одним из наиболее изученных способов добычи водорода и представляет собой протекание простейшей реакции [19, 20]:



Также, выполнив сравнение реакций между паровой конверсией метана, пропана или электролизом можно сделать вывод, что при паровой конверсии метана достигается наибольшая выработка водорода в соотношении $\frac{1}{4}$.

Принципиальная схема ПГУ представлена на рисунке 1.

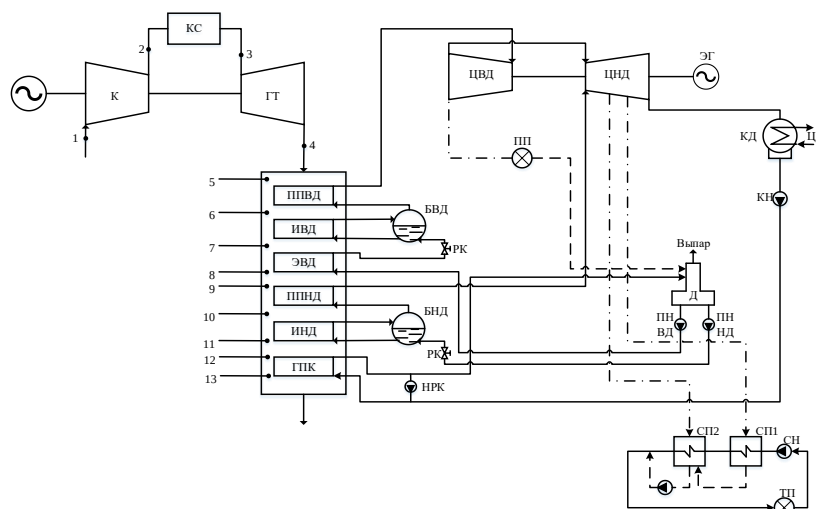


Рис.1 Основной контур парогазовой установки:

К – компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; ППВД – пароперегреватель высокого давления; ИВД – испаритель высокого давления; БВД – барабан высокого давления; РК – регулирующий клапан; ЭВД – экономайзер высокого давления; ППНД – пароперегреватель низкого давления; ИНД – испаритель низкого давления; БНД – барабан низкого давления; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; ЭГ – электрогенератор; ПП – промышленный потребитель; КД – конденсатор; ЦВ – циркуляционная вода; КН – конденсатный насос; Д – деаэратор; ПНВД – питательный насос высокого давления; ПННД – питательный насос низкого давления; СП1, СП2 – сетевой подогреватель; СН – сетевой насос; ТП – тепловой потребитель; НРК – рециркуляционный насос.

Fig. 1 The main circuit of the combined cycle plant:

К – compressor; CC – combustion chamber; GT – gas turbine; HPSS – high pressure steam superheater; HPE – high pressure evaporator; HPD – high pressure drum; CV – control valve; HPE – high pressure economizer; LPSS – low pressure steam superheater; LPE – low pressure evaporator; LPD – low pressure drum; GCH – gas condensate heater; HPC – high pressure cylinder; LPC – low pressure cylinder; EG – electric generator; IC – industrial consumer; KD – capacitor; CW – circulating water; KP – condensate pump; D – deaerator; HP GP – high pressure feed pump; LP GP – low pressure feed pump; NH1, NH2 – network heater; NP – network pump; HC – heat consumer; RP – recirculation pump.

При выполнении расчета данной схемы были получены следующие данные:

- мощность блока по выработке электрической энергии – 61,83 МВт;
- КПД блока по выработке электрической энергии – 45,76 %;
- полный расход топлива – 2,935 кг/с.

При выполнении дальнейших расчетов брались данные только по выработке электрической энергии и затраты на её выработку. Для более корректного сравнения рабочих параметров основной схемы ПГУ с применением ТЭ все рассчитываемые параметры принимались стационарными. Такой подход позволяет оценить работоспособность классической схемы относительно схем с ТЭ.

Также, дальнейший анализ схем выполнялся с условием, что ТЭ получают на выходе аналогичные параметры по температуре, обеспечивающие корректную работу схемы ПГУ.

При анализе схем ПГУ и приблизительных расчетах было принято решение, что наиболее выгодным будет внедрение ТЭ в схему ГТУ.

Первый вариант компоновки схемы ПГУ с ТЭ представлен на рисунке 2.

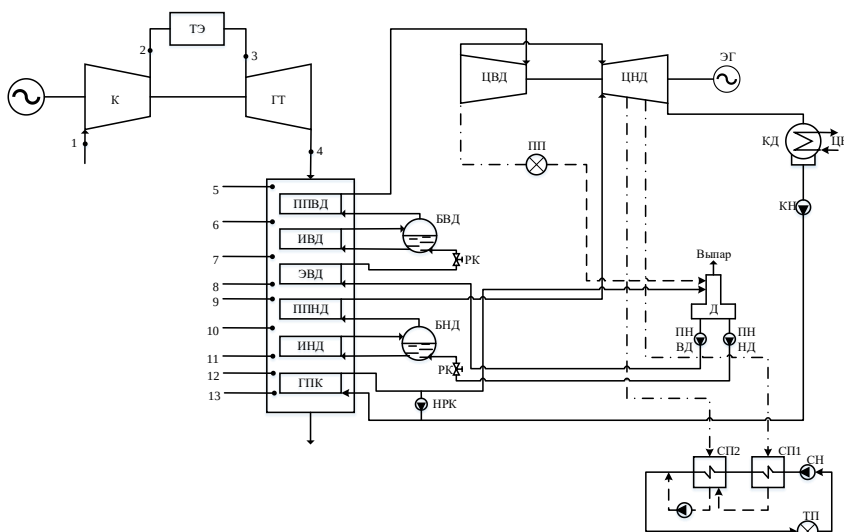


Рис. 2 Парогазовый контур с топливными элементами и замещенной камерой сгорания

Fig. 2 Combined-cycle circuit with fuel cells and a replaced combustion chamber

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

При такой компоновке были получены следующие параметры:

- мощность блока по выработке электрической энергии – 94,2 МВт;
- КПД блока по выработке электрической энергии – 65,4 %;
- полный расход топлива – 5,25 кг/с.

Применение такого варианта компоновки позволяет добиться увеличения мощности блока по выработке электроэнергии на 32,4 МВт, относительно классической схемы. Также увеличивается КПД блока на 19,6 %. тем не менее при такой компоновке увеличивается расход топлива практически в 2 раза.

Такое увеличение расхода топлива объясняется тем, что для генерации водорода, использующегося в ТЭ, применяется метод паровой конверсии метана. То есть большие затраты топлива получились исходя из реакции (1). Для получения необходимого количества водорода, требуется затратить в 2 раза больше природного газа, чем при его классическом сжигании.

Также при более детальном изучении ТЭ можно выяснить, что при такой компоновке ТЭ будет работать при высоких давлениях и температуре [21, 22]. Такой характер работы приводит к ускоренной деградации блоков ТЭ, тем самым требуется их частая замена, что приводит к дополнительным финансовым затратам.

Анализируя данную проблемы был разработан второй вариант компоновки ПГУ с ТЭ, представленный на рис. 3.

При такой компоновке получены следующие данные:

- мощность блока по выработке электрической энергии – 80,5 МВт;
- КПД блока по выработке электрической энергии – 58,9 %;
- полный расход топлива – 2,6 кг/с.

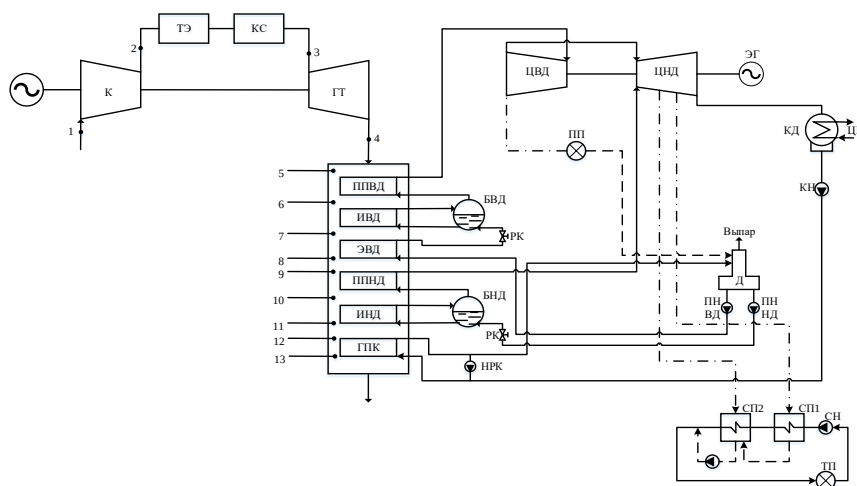


Рис. 3 Парогазовый контур с топливными элементами и дожиганием в камере сгорания

**Источник: составлено автором.*

Fig. 3 Combined-cycle circuit with fuel cells and afterburning in the combustion chamber

Source: compiled by the author

Как видно из расчетов, полученные параметры немного ниже, чем в первом варианте компоновки, однако, относительно классической схемы, мощность блока по выработке электрической энергии выросла на 18,7 МВт, КПД блока по выработке электроэнергии выросло на 13,1 %, а потребление топлива снизилось на 0,34 кг/с.

Данная компоновка позволяет улучшить все основные параметры схемы и к тому же, при необходимости, появляется возможность регулирования процесса. То есть, для регулирования нагрузок можно увеличивать или уменьшать нагрузку на ТЭ или полностью выводить его из строя (например, для замены блоков ТЭ) без остановки протекания основного процесса. К тому же, такая компоновка позволяет снизить нагрузку на ТЭ путем снижения его рабочей температуры и получением необходимого тепла путем дожигания в КС. Таким образом появляется возможность увеличить срок службы ТЭ, устранив его деградацию от воздействия высоких температур, оставив только воздействие от высоких давлений.

Для устранения сразу двух факторов деградации был разработан третий вариант компоновки схемы ПГУ с ТЭ, представленного на рисунке 4.

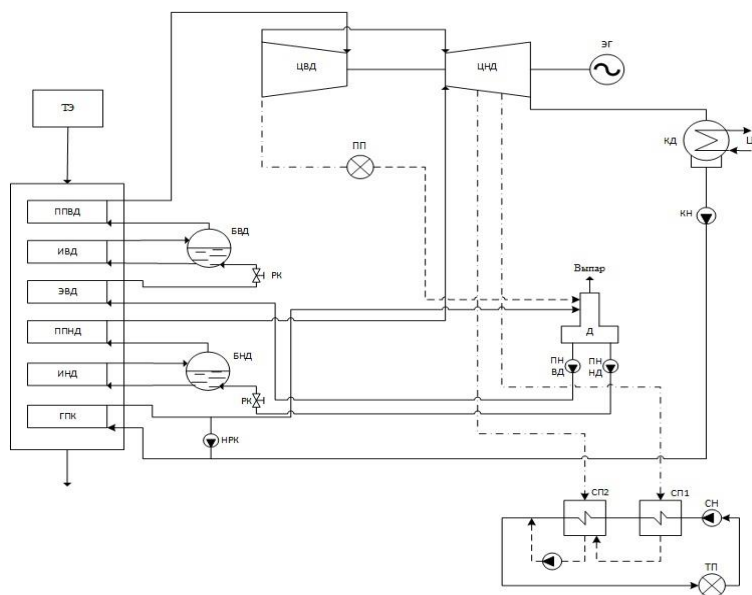


Рис. 4 Парогазовый контур с топливными элементами и замещенной схемой ГТУ

*Источник: составлено автором.

Fig. 4 Combined-cycle gas circuit with fuel cells and a replaced GTU circuit

Source: compiled by the author

При такой компоновке получены следующие параметры:

- мощность блока по выработке электрической энергии – 105,1 МВт;
- КПД блока по выработке электрической энергии – 79,8 %;
- полный расход топлива – 18,7 кг/с.

Как видно из полученных данных, мощность блока по выработке электроэнергии и КПД значительно выросли, но вместе с ними и выросло потребление топлива более чем в 6 раз.

Несмотря на снижение нагрузки на ТЭ по температуре и давлению было получено значительное увеличение полного расхода топлива.

Такая компоновка требует более детального расчета экономической выгоды для анализа целесообразности ее применения на ТЭЦ. Требуется оценка соотношения стоимости затрат топлива к затратам на смену блоков ТЭ после их полного выхода из строя по причине деградации и потере рабочего ресурса.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Для более наглядного сравнения в таблице 1 приведены расчетные параметры каждой из рассматриваемых схем.

Таблица 1

Table 1

Результаты расчета схем ТЭЦ
Results of calculation of CHP schemes

Название схемы	Суммарная мощность по выработке электроэнергии, МВт	Суммарный КПД по выработке электроэнергии, %	Мощность топливного элемента	Полный расход топлива, кг/с
Классическая ПГУ	61,83	45,76	-	2,935
ПГУ с ТЭ и замещенной КС	94,2	65,4	32,4	5,25
ПГУ с ТЭ и дожиганием в КС	80,48	58,9	18,7	2,6
ПГУ с ТЭ и замещенной схемой ГТУ	105,1	79,8	43,3	18,7

**Источник: составлено автором. Source: compiled by the author*

Сравнивая полученные данные и ранее затронутые комментарии можно сделать вывод, что наиболее энергоэффективной является схема ПГУ с ТЭ и дожиганием в КС. При такой компоновке достигается увеличение основных параметров, таких как мощность по выработке электроэнергии и КПД. Также получено снижение полного расхода топлива относительно классической схемы ПГУ и появляется возможность регулирования работы ТЭ с возможностью его полного выведения из работы (при необходимости) без выведения из работы основного оборудования и его полного останова.

Оценка экономической целесообразности применения ТЭ приведена в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Оценка окупаемости применения топливных элементов на ТЭЦ
Estimation of fuel cell payback at CHP

Название параметра	ПГУ с ТЭ и замещенной КС	ПГУ с ТЭ и дожиганием в КС	ПГУ с ТЭ и замещенной схемой ГТУ
Стоимость установки с водородными топливными элементами без учета транспортировки, млрд. руб.	4,131	2,360	12,98
Оценочная стоимость установки получения водорода производительностью 10 кг/ч, млрд.руб.	4,643	2,278	16,64
Затраты на эксплуатацию и ТОиР, млрд. руб/кг*год	15,04	7,379	53,93
Удельные амортизационные отчисления и налог на имущество, млрд. руб/кг*год	29,83	14,64	106,9
Стоимость природного газа, млрд.руб/год	5,298	2,599	18,99
Себестоимость отпускаемой электрической энергии,	250,9	180,4	252,8

Название параметра	ПГУ с ТЭ и замещенной КС	ПГУ с ТЭ и дожиганием в КС	ПГУ с ТЭ и замещенной схемой ГТУ
млрд.руб/год			
Суммарная годовая прибыль, млрд.руб./год	192	151,2	43,356

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Как видно из расчетов, наиболее прибыльной является схема ГТУ с ТЭ и замещенной КС. Тем не менее схема ПГУ с ТЭ и дожиганием в КС также является достаточно прибыльной и доказывает не только свою энергетическую эффективность, но и экономическую.

Однако, необходимо учесть, что в данных расчетах не учитываются затраты на такие значимые сегменты, как заработная плата, амортизационные отчисления, затраты на ремонт и эксплуатацию основного и вспомогательного оборудования всей ТЭЦ. Тем не менее, даже без их учета можно сделать вывод, что система является рентабельной, а внедрение ТЭ на ТЭЦ позволит их окупить в достаточно быстрые сроки, учитывая их частую замену по причине деградации.

Таким образом, при проектировании и выполнении расчетов был получен вариант компоновки ПГУ с ТЭ и дожиганием в КС. Представленные расчеты доказывают эффективность разработанной схемы и, при внедрении данной схемы непосредственно на производство, позволяет добиться энергетической и экономической эффективности от внедрения, а также позволяет вывести энергетику России на новый уровень.

Тем не менее, имеется еще один вопрос, требующий более глобального изучения. При применении метода паровой конверсии метана для получения водорода на выходе установки получают достаточно большие выбросы CO₂, несмотря на то, что сам ТЭ является экологически чистым и не имеет практически никаких вредных выбросов в атмосферу.

На рис. 5 представлены сравнительные характеристики углеродного следа от внедрения каждой из схем.

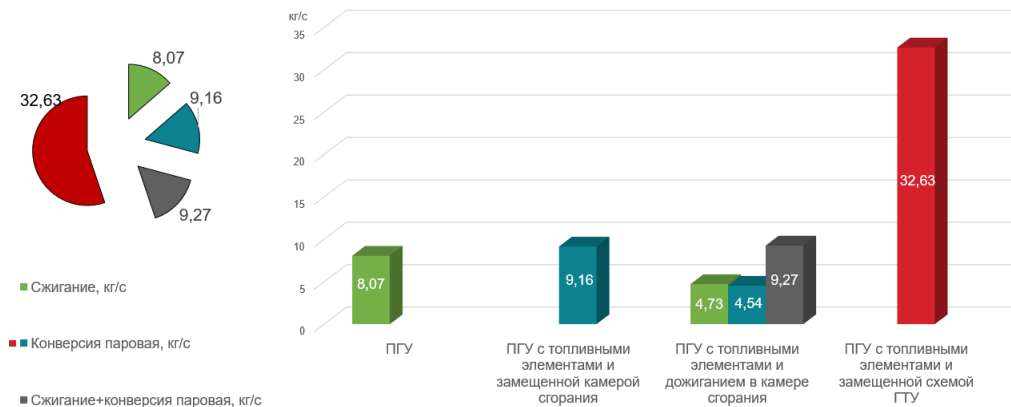


Рис. 5 Оценка углеродного следа от внедрения каждой из схем

Fig. 5 Assessment of the carbon footprint from the implementation of each of the schemes

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Как видно из графика, наибольший углеродный след виден при расчете ПГУ с ТЭ и замещенной схемой ГТУ. В других случаях отслеживается незначительное увеличение углеродного следа.

Таким образом, для дальнейшего внедрения ТЭ на станции необходима проработка вопроса добычи водорода для его работы и совершенствование существующих технологий для снижения углеродного следа [23] непосредственно на этапе протекания реакции получения H₂.

Многие вопросы относительно ТЭ до сих пор не до конца изучены и требуют более полной проработки, тем не менее уже сейчас можно сделать вывод об их необходимости как в энергетике, так и в других сферах жизнедеятельности человека. Как упоминалось ранее, ТЭ имеют широкий спектр применения не только на станциях, но и в автомобилестроении, авиации, в портативных устройствах и т.п.

Заключение (Conclusions)

Наиболее перспективной к внедрению является схема ПГУ с ТЭ и дожиганием в КС. При такой компоновке достигается повышение всех рассматриваемых параметров: суммарная мощность по выработке электроэнергии возрастает на 18,7 МВт, Суммарный КПД по выработке электроэнергии вырос на 13%, полный расход топлива снизился на 0,34 кг/с.

При данной компоновке появляется возможность регулирования мощности ТЭ повышая или понижая тем самым расход топлива и количество вырабатываемого углекислого газа от установки по выработке водорода методом паровой конверсии метана.

Для снижения углеродного следа предлагается применять различного рода фильтры для прямого захвата углекислого газа, его хранения и переработки, а также иные технологии, способствующие его снижению. Таким образом, появляется возможность сделать производство и сжигание водорода более экологичным.

Несмотря на некоторые недостатки, отмеченные в статье, относительно внедрения ТЭ на станции они не являются критическими и при должной проработке вопроса устранимы.

Внедрение новой технологии непосредственно на станции позволит увеличить производственные мощности самой станции и ее КПД, снизить затраты на топливо, при применении соответствующей методики и более детальном проработке вопроса, а также позволит снизить вредные выбросы в окружающую среду, сделав энергетику более чистой и привлекательной.

Литература

1. Овчинникова Н.Г., Жидкова Е.И., Тимофеева В.А. Рациональное использование и охрана природных ресурсов города Азова // Экономика и экология территориальных образований. 2020. Т.4. №1. С. 52-60.
2. CO2 emissions of all world countries. [Article]. Available at: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022?vis=tot#emissions_table. Accessed: 5.12.2022.
3. Зайнетдинов Р.А. Термодинамический анализ эффективности использования тепловой энергии в поршневых двигателях // Известия международной академии аграрного образования. 2017. №35. С. 35-39.
4. История открытия топливного элемента. Доступно по: https://studopedia.su/16_35115_istoriya-otkritiya-toplivnogo-elementa.html. Ссылка активна на 4 февраля 2023.
5. Козлов С.И., Фатеев В.Н. Топливные элементы – перспективные химические источники электрической энергии // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. №2(38). С. 7-22.
6. Филиппов С.П., Голодницкий А.Э., Кашин А.М. Топливные элементы и водородная энергетика // Энергетическая политика. 2020. №11(153). С. 28-39.
7. Коровин Н.В. Топливные элементы и электро-химические энергоустановки. М.: Издательство МЭИ, 2005. 278 с.
8. Sharafutdinov AU, Fedotov YUS, Bredikhin SI. Solid oxide fuel cell stack simulation using effective medium approximation // Kimya problemleri. 2020. Vol. 18, N3. pp. 298-314.
9. Мусави С.А., Рагимова А.А. Исследование наборов твердооксидных топливных элементов в пакетном исполнении // Бюллетень науки и практики. 2021. Т.7. №12. С. 175-184.
10. Агаркова Е.А., Агарков Д.А., Бурмистров И.Н. и др. Трехслойные мембраны для планарных твердооксидных топливных элементов электролит-поддерживающие конструкции: характеристики и применение // Электрохимия. 2020. Т.56. №2. С. 141-148.
11. Лисин Е.М., Паршина А.С., Замешаева И.С., Мусаева Д.Э. Техноэкономические аспекты производства и использования водорода на тепловых электростанциях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №2 (54). С. 120-133.
12. Белобородов С.С., Гашо Е.Г., Ненашев А.В. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества. СПб.: Научное издание. 2021. 151 с.
13. Green Hydrogen: A guide to policy making. Abu Dhabi: IRENA (International Renewable Energy Agency); 2020. 52 p.
14. Kumar SS, Himabindu V. Hydrogen production by PEM water electrolysis_A review // Materials Science for Energy Technologies. 2019. №3. pp. 442-454.

15. Nicita A., Maggio G., Andaloro A., Squadrito G. Green hydrogen as feedstock: Financial analysis of a photovoltaic-powered electrolysis plant // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. №. 20. pp. 11395-11408.
16. Фролов В.А., Янкевич А.И., Прохоров Н.С. Конвертор паровой конверсии СО с охлаждением. Патент РФ на изобретение №2580186. 10.04.2016. Бюл. №10. Доступно по: https://yandex.ru/patents/doc/RU2580186C1_20160410. Ссылка активна на 12 января 2023.
17. Шубин И.Л., Стронгин А.С. Ключевые факторы влияния инженерного оборудования зданий на показатели углеродного следа // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2022. №3(39). С. 12-20.
18. Kharton V.V. Handbook of Solid State Electrochemistry. Germany: 2009. 506 p.
19. LeValley T.L., Richard A.R., Fan M. The progress in water gas shift and steam reforming hydrogen production technologies – A review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. Pp. 16983-17000.
20. Макарян И.А., Седов И.В., Никитин А.В. и др. Современные подходы к получению водорода из углеводородного сырья // *Научный журнал Российского газового общества*. 2020. №1 (24). С. 50-68.
21. Larminie J., Dicks A. Fuel Cell Systems Explained. Michigan: 2003. 418 p.
22. Tazi B., Savadogo O. Parameters of PEM fuel-cell based on new membranes fabricated from Nafion, silicotungstic acid and thiophene // *Electrochim. Acta*. 2000. Vol. 45. pp. 4329-4339.
23. Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф. Методы декарбонизации процесса получения электроэнергии в твердооксидном топливном элементе / 2022. Т.24. No 6. С. 72-82. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-72-82.

Авторы публикации

Киришина Елена Юрьевна – инженер-конструктор АО «Силовые машины», соискатель ученой степени при высшей школе атомной и тепловой энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0278-5951>. E-mail kirshina.elena.yu@yandex.ru.

Аникина Ирина Дмитриевна – канд.техн.наук, доцент высшей школы атомной и тепловой энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет. E-mail ia.88@mail.ru.

Reference

1. Ovchinnikova NG, ZHidkova EI, Timofeeva VA. Racional'noe ispol'zovanie i ohrana prirodnih resursov goroda Azova. *Ekonomika i ekologiya territorial'nyh obrazovaniy*. 2020;4(1):52-60.
2. CO2 emissions of all world countries. [Article]. Available at: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022?vis=tot#emissions_table. Accessed: 5.12.2022.
3. Zajnetdinov RA. Termodinamicheskij analiz effektivnosti ispol'zovaniya teplovoj energii v porshnevnyh dvigatelyah. *Izvestiya mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2017;35:35-39.
4. Istoriya otkrytiya toplivnogo elementa. Available at: https://studopedia.su/16_35115_istoriya-otkritiya-toplivnogo-elementa.html. Accessed: 4 Feb 2023.
5. Kozlov SI, Fateev VN. Toplivnye elementy – perspektivnye khimicheskie istochniki elektricheskoi energii. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2014; 38(2):7-22.
6. Filippov SP, Golodnitskii AE, Kashin AM. Toplivnye elementy i vodorodnaya energetika. *Energeticheskaya politika*. 2020; 153(11):28-39.
7. Korovin NV. *Toplivnye elementy i elektro-khimicheskie energoustanovki*. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2005. 278 p.
8. Sharafutdinov AU, Fedotov YUS, Bredikhin SI. Solid oxide fuel cell stack simulation using effective medium approximation. *Kimya problemleri*. 2020;18(3):298-314.
9. Musavi SA, Ragimova AA. Issledovanie naborov tverdooksidnykh toplivnykh elementov v paketnom ispolnenii. *Byulleten' nauki i praktiki*. 2021;1.7(12):175-184.
10. Agarkova EA, Agarkov DA, Burmistrov IN, et al. Trekhsloynnye membrany dlya

planarnykh tverdotsidnykh toplivnykh elementov elektrolit-podderzhivayushchie konstruktivnykh: kharakteristiki i primeneniye. *Elektrokhimiya*. 2020;56(2):141-148.

11. Lisin EM, Parshina AS, Zameshaeva IS, et al. Tekhnikoekonomicheskie aspekty proizvodstva i ispol'zovaniya vodoroda na teplovykh elektrostantsiyakh. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022;14(54-2):120-133.

12. Beloborodov SS, Gasho EG, Nenashev AV. Vozobnovlyemye istochniki energii i vodorod v energosisteme: problemy i preimushchestva. Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii. 2021. 151 p.

13. *Green Hydrogen: A guide to policy making*. Abu Dhabi: IRENA (International Renewable Energy Agency); 2020. 52 p.

14. Kumar SS, Himabindu V. Hydrogen production by PEM water electrolysis_A review. *Materials Science for Energy Technologies*. 2019;3:442-454.

15. Nicita A, Maggio G, Andaloro A, et al. Green hydrogen as feedstock: Financial analysis of a photovoltaic-powered electrolysis plant. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;20:11395-11408.

16. Frolov VA, Yankevich AI, Prokhorov NS. Konvertor parovoi konversii SO s okhlazhdeniem. Patent RUS №2580186. 10.04.2016. Byul. №10. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2580186C1_20160410. Accessed: 12 Jan 2023.

17. Shubin IL, Strongin AS. Klyuchevye faktory vliyaniya inzhenernogo oborudovaniya zdaniy na pokazateli uglerodnogo sleda. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii*. 2022;39(3):12-20.

18. Kharton VV. *Handbook of Solid State Electrochemistry*. Germany: 2009. 506 p.

19. LeValley T.L., Richard A.R., Fan M. The progress in water gas shift and steam reforming hydrogen production technologies – A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014;39:16983-17000.

20. Makaryan IA, Sedov IV, Nikitin AV, et al. Sovremennyye podhody k polucheniyu vodoroda iz uglevodorodnogo syr'ya. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo gazovogo obshchestva*. 2020;24(1):50-68.

21. Larminie J, Dicks A. *Fuel Cell Systems Explained*. Michigan: 2003. 418 p.

22. Tazi B, Savadogo O. Parameters of PEM fuel-cell based on new membranes fabricated from Nafion, silicotungstic acid and thiophene. *Electrochim. Acta*. 2000;45:4329-4339.

23. Filimonova AA, Vlasova AY, Kamaliev RF. Metody dekarbonizatsii protsessy polucheniya elektroenergii v tverdotsidnom toplivnom elemente. 2022;24(6):72-82. (doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-72-82).

Authors of the publication

Elena Yu. Kirshina – JSC «Power machines», Saint Peterburg, Russia, candidate for a degree of «higher School of Nuclear and Thermal Power Engineering» of St. Petersburg Polytechnic University. ORCID 0000-0002-0278-5951. E-mail kirshina.elena.yu@yandex.ru.

Irina D. Anikina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «higher School of Nuclear and Thermal Power Engineering» of St. Petersburg Polytechnic University. E-mail ia.88@mail.ru

Шифр научной специальности:

2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки).

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

1.4.6. Электрохимия (технические науки);

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки).

Получено

01.08.2023г.

Отредактировано

07.08.2023г.

Принято

08.08.2023г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБРАТНОМ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗЕ

Чичиров А.А.¹, Филимонова А.А.¹, Чичирова Н.Д.¹, Майоров Е.С.¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
aachichirova@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Экспериментальные исследования по оптимизации выходных электрических и массообменных характеристик при проведении процесса обратного электродиализа. МЕТОДЫ. В работе использовались приемы системного анализа и была разработана математическая модель для описания движения водных потоков и концентраций веществ в них. Описано задействованное оборудование, сконструированное для экспериментальной и промышленной отработки предлагаемых технологий с техническими характеристиками разработанных аппаратов и установок. РЕЗУЛЬТАТЫ. Обратный электродиализ (RED - reverse electrodialysis) – новая мембранная технология для производства возобновляемой энергии с использованием градиентов солености. Конечной целью RED является достижение максимально возможного значения плотности мощности, которая зависит от нескольких параметров, связанных с собственными электрохимическими характеристиками мембран, конфигурацией стека (количество пар ячеек, длина канала), гидродинамикой, природой рабочих растворов (ионный состав, концентрация) и др. В статье представлены экспериментальные исследования влияния и моделирования различных параметров работы обратного электродиализа на выходные электрические характеристики системы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Показано, что на выходную мощность системы существенное влияние оказывают состав растворов в приэлектродных камерах, внешняя нагрузка и внутреннее сопротивление, концентрации рабочих растворов и время проведения эксперимента. Максимальная электрическая эффективность составила 56% (плотность мощность 0,34 Вт/м²) при проведении полупромышленных экспериментов по обратному электродиализу с использованием модельных растворов NaCl, приэлектродных растворов K₃Fe(CN)₆/K₄Fe(CN)₆ и китайских мембран IONSEP толщиной 0,6 мм.

Ключевые слова: Обратный электродиализ; электрохимическая генерация энергии; RED.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта «Проведение фундаментальных научных исследований малыми отдельными научными группами» № 22-29-01300, <https://rscf.ru/en/project/22-29-01300/>.

Для цитирования: Чичиров А.А., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Майоров Е.С. Экспериментальные исследования электрических и массообменных процессов при обратном электродиализе // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С.53-70. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-53-70.

EXPERIMENTAL STUDIES OF ELECTRICAL AND MASS TRANSFER PROCESSES IN REVERSE ELECTRODIALYSIS

Chichirov A.A.¹, Filimonova A.A.¹, Chichirova N.D.¹, Mayorov E.S.¹

¹Kazan State Power Engineering University г. Kazan, Russia
aachichirova@mail.ru

Abstract: OBJECT. Experimental studies on optimization of the output electrical and mass transfer characteristics of the reverse electrodialysis process. METHODS. System analysis techniques were used in this work and a mathematical model was developed to describe the movement of water streams and the concentrations of substances in them. The equipment involved, designed for experimental and industrial testing of the proposed technologies with technical characteristics of the developed apparatuses and installations, is described. RESULTS. RED (reverse electrodialysis) is a new membrane technology for renewable energy production using salinity gradients. The ultimate goal of RED is to achieve the highest possible value of power density, which depends on several

parameters related to the intrinsic electrochemical characteristics of the membranes, stack configuration (number of cell pairs, channel length), hydrodynamics, nature of the working solutions (ionic composition, concentration), and others. The paper presents experimental studies on the influence and modeling of various parameters of the reverse electrodialysis operation on the output electrical characteristics of the system. **CONCLUSIONS.** It is shown that the system output power is significantly influenced by the composition of solutions in the near-electrode chambers, external load and internal resistance, concentrations of working solutions and time of the experiment. The maximum electrical efficiency was 56% (power density 0.34 W/m²) in semi-industrial electrodialysis reverse electrodialysis experiments using model NaCl solutions, K₃Fe(CN)₆/K₄Fe(CN)₆ and Chinese 0.6 mm thick IONSEP membranes.

Keywords: reverse electrodialysis; electrochemical energy generation; RED.

Acknowledgments: The study was funded by a grant Russian Science Foundation № 22-29-01300, <https://rscf.ru/en/project/22-29-01300/>

For citation: Chichirov A.A., Filimonova A.A., Chichirova N.D., Mayorov E.S. Experimental studies of electrical and mass transfer processes in reverse electrodialysis. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(4):53-70. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-53-70.

Введение (Introduction)

Энергия является одним из ключевых ресурсов, определяющих общее социально-экономическое развитие. Для устойчивого роста и повышения уровня жизни необходимо обеспечить надежное энергоснабжение. Более того, ожидаемый прирост населения в ближайшие десятилетия приведет к появлению двух миллиардов новых потребителей энергии в странах с формирующейся рыночной экономикой к 2050 году. В этом контексте срочно требуется разработка альтернативных энергетических ресурсов, способных смягчить стремительно растущий спрос на чистую энергию и связанные с этим экологические проблемы.

Обратный электролиз (RED) – технология получения электроэнергии путем преобразования химической разности потенциалов между двумя растворами солей с разной концентрацией [1]. Это абсолютно чистый и устойчивый источник энергии без выбросов токсичных газов. Обычно в качестве солевых растворов используется речная и морская вода (табл. 1). Другие потенциальные ресурсы включают в себя рассолы из антропогенных источников (промышленные и бытовые стоки, пруды-испарители [2]) или природные источники (например, Мертвое море), термолитические растворы (например, бикарбоната аммония) и т.д.

В отличие от зависящих от метеоусловий источников энергии ветра и солнечной энергии, RED может эксплуатироваться непрерывно – 24 часа в день и 365 дней в году. Кроме того, положительные значения плотности мощности уже достигнуты в энергоблоках RED, эксплуатируемых в течение длительных периодов времени, либо с природной речной водой и морской водой или солоноватой/морской водой и рассолом [3].

Интересны новые решения в области RED для устойчивого производства воды и водорода, гибридные системы с включением в схему обратного осмоса, мембранной дистилляции, также обсуждаются электрохимические системы и технологии электролиза воды и возможность ее использования в качестве накопителя энергии. Подходящие мембранные материалы по-прежнему остаются ключевыми компонентами, определяющими общую производительность и экономическую эффективность RED при переходе на промышленный уровень реализации технологии.

Таблица 1

Table 1

Термодинамический потенциал градиентов солености [4]

Thermodynamic potential of salinity gradients [4]

Рабочие растворы	Количество получаемой энергии, кДж	Количество получаемой энергии, кВт*ч
Морская вода (0,5 М NaCl) и рассол (5 М NaCl)	10500	2,93
Морская вода (0,5 М NaCl) и рассол (1 М NaCl)	420	0,116

Речная вода (0,004 М NaCl) и рассол (5 М NaCl)	16800	4,67
---	-------	------

Очевидно, что тема исследования процесса обратного электролиза является актуальной, а RED можно рассматривать как многообещающую технологию для производства возобновляемой энергии как в ее автономных, так и интегрированных приложениях.

Литературный обзор (Literature review)

Целевым параметром производительности RED является плотность мощности. К дополнительным параметрам, представляющим интерес, относятся напряжение и внутреннее сопротивление стека.

Максимальная плотность мощности - определяющий параметр для коммерческого внедрения технологии RED. Сообщалось о прогрессивных улучшениях плотности мощности с начала исследований до настоящего времени. О низкой плотности мощности (до 0,17 Вт/м²) сообщалось на ранней стадии исследовательской деятельности RED Вайнштейном и Лейцем [5], которые проводили эксперименты с морской и речной водой. Благодаря усовершенствованию мембранных материалов и производства с 2009 года произошли значительные улучшения. Веерман и соавт. [6] сообщили о повышении плотности мощности для RED, оснащенных Fumasep (FAD и FDK) и Selemion (AMV и CMV) мембранами, с использованием морской /речной воды. Плотность мощности 2,2 Вт/м² была получена для 0,5 М растворов NaCl//0,017 М NaCl с использованием модифицированных коммерческих мембран (Fumatech, Германия) [7], что было самой высокой плотностью мощности, о которой сообщалось до настоящего времени для речной воды и морской воды, в том числе, при температуре окружающей среды. Модельное предсказание, сделанное Тедеско и соавторами [8] на основе технологии RED с использованием тонких (<20 мкм) и высокоселективных ионообменных на возможность достижения плотности мощности 4,2 Вт/м² при окружающих условиях. Те же авторы также сообщили о плотности мощности 6 Вт/м² при 40 °С путем смешивания рассола (5 М NaCl) и солоноватой воды (0,1 М NaCl) [9], тогда как Данилидис и соавт. [10] достигли 6,7 Вт/м² при 60 °С при смешивании рассола (5 М NaCl) и речной воды (0,01 М NaCl). Более того, теоретический расчет показал возможность получения плотности мощности до 20 Вт/м² при использовании мембран со значительно низким сопротивлением (ниже 0,1 Ом*см²) и ячейке длиной 1 мм [11].

На производительность RED преимущественно влияют характеристики растворов (состав и концентрация) и рабочие условия (скорость потока и температура) [12].

Скорость потока влияет на гидродинамику системы RED и массоперенос зарядов.

В целом, в RED стеке концентрационная поляризация вызывает уменьшение градиента солености у мембраны, что приводит к снижению напряжения на мембране. Однако это падение напряжения может быть интерпретировано как электрическое сопротивление и зависит от геометрии поверхности мембраны и скорости потока. Фактически, плотность мощности первоначально увеличивается со скоростью потока и падает после определенной точки из-за больших гидродинамических потерь, которые также зависят от толщины отсека. Для RED на морской воде и рассоле мембранной дистилляции (MD), Tufa и др. [12] сообщили об увеличении до 35% напряжения (с 1,7 до 2,3 В) и до 47% плотности мощности (от 0,75 до 1,1 Вт/м²) при увеличении скорости подачи с 0,7 до 1,1 см/с.

В целом, изменения сопротивлений мембраны и поверхности раздела, т.е. электрического сопротивления двойного электрического слоя и диффузионного сопротивления пограничного слоя (неомического), наряду с сопротивлениями отсека, т.е. сопротивлениями высококонцентрированного и низкоконцентрированного растворов (омического), непосредственно влияют на внутреннее сопротивление стека, на площадь внутреннего сопротивления. Более высокие скорости потока требуют дополнительной энергии на насосы, что приводит к снижению удельной мощности.

Кроме того, высокие скорости потока также приводят к более короткому времени пребывания растворов в стеке, что снижает энергоэффективность. Исследование Вейнер и др. [13] показывает, что оптимальная конструкция стека с низкой скоростью потока снижает стоимость электроэнергии, производимой RED.

Повышение температуры растворов оказывает положительное влияние на производительность системы RED. Высокая температура обычно увеличивает электропроводность, способствует ионной подвижности, уменьшает омические потери и, в конечном счете, увеличивает выходную мощность. Кроме того, высокая температура снижает вязкость питательных вод, что приводит к более низким гидродинамическим потерям. Температура лишь незначительно влияет на напряжение. Было показано, что при нагревании исходных растворов с 10 до 50 °С происходит увеличение плотности мощности на 44% и

снижение сопротивления внутри стека на 47 % при работе RED с рассолом и морской водой [12].

Исследования спектроскопии электрохимического импеданса доказывают, что температура также влияет на сопротивления системы. Уменьшение сопротивления внутри и на поверхности мембраны с повышением температуры наблюдалось Фонтанова и соавт. [14] в 0,5 М растворах NaCl. Температура увеличивает ионную подвижность как через мембрану, так и на границе.

Однако высокая температура может увеличивать ионные короткие токи, которые снижают проницаемость и энергоэффективность RED [15]. Кроме того, дополнительная энергия, необходимая для разогрева исходных растворов, не является экономически выгодной. Преимущество может быть получено за счет наличия промышленных источников тепла.

Работа с низкоконцентрированными растворами (например, речной водой) связана с высокими омическими потерями, которые ограничивают выходную мощность. В частности, концентрация растворов ниже 0,3 М NaCl значительно влияет на проводимость мембраны [16]. Проводимость речной воды (1 г/л NaCl, ~ 2 мС/см) примерно в 25 раз ниже, чем проводимость морской воды (30 г/л NaCl, ~ 49 мС/см) и примерно в 100 раз ниже, чем у высококонцентрированного рассола (200 г/л NaCl, ~ 226 мС/см). Низкая концентрация раствора приводит к высокому сопротивлению стека и, следовательно, к низкой плотности мощности. Но, с другой стороны, низкая концентрация раствора приводит к высокому напряжению Нернста и, следовательно, к высокой плотности мощности. Следовательно, существует оптимальное значение для концентрации растворов, которое также зависит от других условий эксплуатации стека, таких как линейная скорость потока, температура, длина и толщина каналов. Смешивание речной воды с морской было признано выгодным с точки зрения плотности мощности. Веерман и соавт. [6] сообщили об оптимальной концентрации раствора диализата 0,005 М в NaCl для плотности мощности $\sim 0,83$ Вт/м². Для установки RED, работающей со скоростью подачи 0,5 см/с, Вайнер и др. [13] сообщили об оптимальной концентрации раствора диализата 0,01 М в NaCl для плотности мощности 1,72 Вт/м². При увеличении концентрации рабочих растворов происходит снижение омических потерь и увеличивается выходная мощность пропорционально градиенту концентрации.

Состав раствора оказывает огромное влияние на производительность RED и должен учитываться для практического применения в промышленных условиях. Относительно небольшое число литературных исследований посвящено воздействию многовалентных ионов преимущественно Mg^{2+} и SO_4^{2-} , которые являются наиболее распространенными ионами в природных водах после Na^+ и Cl^- [17].

Снижение напряжения в присутствии многовалентных ионов предсказывается уравнением Нернста. Кроме того, перенос ионов против градиента концентрации также упоминался как причина негативного влияния многовалентных ионов на производительность RED [18].

Когда Mg^{2+} транспортируется из разбавленного раствора в концентрированный раствор, на каждое количество транспортируемых ионов Mg^{2+} в противоположном направлении транспортируется удвоенное количество Na^+ , чтобы соблюдать электронейтральность с обеих сторон мембраны. Перенос Mg^{2+} происходит в противоположном градиенту концентрации направлении Na^+ без какого-либо переноса чистого заряда. Следовательно, присутствие многовалентных ионов вызывает необратимую потерю доступной энергии одновалентных ионов и, следовательно, потерю производительности работы RED.

В целом, разработка подходящих схем предварительной обработки для RED - тема, пока недостаточно изученная и все еще требующая интенсивного изучения.

Один из наиболее часто рассматриваемых вариантов повышения выработки электроэнергии в RED был сосредоточен на улучшении гидродинамических условий внутри стека RED. Динамика жидкости напрямую влияет на перенос массы (ионов) и затраты энергии, связанные с перекачкой. Чтобы увеличить массоперенос, необходимо уменьшить концентрационную поляризацию (и толщину диффузионного пограничного слоя) вблизи границ раздела мембран. Это обычно достигается за счет увеличения перемешивания жидкости. Таким образом, напряжение увеличивается из-за более высокой разницы концентраций на мембранах. Однако, увеличивая поток, который одновременно приводит к более высоким давлениям и расходам электроэнергии на насосы.

Некоторые параметры, например, линейную скорость потока, можно напрямую регулировать для получения наивысшей плотности мощности в данном стеке. Другие, например, геометрия/толщина каналов и/или тип прокладок (действующих как ускорители перемешивания), оптимизируются, хотя они давно используются для других мембранных процессов (например, электродиализ и фильтрация под давлением) [19].

Падение давления в системе распределения жидкости также вносит свой вклад в общее падение давления. С увеличением числа пар ячеек падение давления в коллекторах/ответвлениях в конечном итоге становится доминирующим; следовательно, скорость потока на входе является параметром, подлежащим оптимизации. В зависимости от конструкции стека распределение потока жидкости по различным каналам может стать сильно неравномерным в случае большого количества пар ячеек.

Использование различных направлений потока потенциально может повысить производительность RED [20]. Система RED имеет три основных конфигурации: противоток, совместный поток и поперечный поток. В большинстве процессов работа с противоточным потоком существенно более эффективна, поскольку она способствует более равномерному движению силы вдоль устройства. Альтернативно авторы предлагают использование радиально-осевых потоков [7] и конструкцию с сегментированными электродами [6].

Геометрия прокладок существенно влияет на концентрацию и распределение потока по каналам и, следовательно, на производительность RED. Сетчатый разделительный материал может также влиять на динамику жидкости в канале [21].

Непроводящие прокладки частично покрывают поверхность мембраны и создают более длинные пути для переноса ионов в растворах. Этот так называемый “эффект спейсерной тени” может быть ответственен за почти удвоение омического сопротивления. Хотя эффект тени от прокладки можно уменьшить, увеличив открытую площадь прокладки или используя разделительную сетку, более тонкую, чем окружающая прокладка. Предпочтительнее ее полное удаление.

Прокладки, изготовленные из ионопроводящих материалов, могут значительно уменьшить эффект тени [21].

Профилированные мембраны, также называемые гофрированными, микроструктурированными или узорчатыми мембранами, обладают потенциалом кардинально изменить архитектуру проточного канала. Они являются жизнеспособной альтернативой прокладкам RED [22]. Профилированная мембрана имеет рельефы, сформированные на ее поверхности, которые разделяют две смежные мембраны, в то же время образуя канал для потока жидкости. Таким образом, сетки-сепараторы больше не нужны.

Мощность, вырабатываемая в RED с использованием профилированных мембран, выше, чем у эквивалентных устройств RED, оснащенных непроводящими прокладками. Снижение омического сопротивления из-за устранения эффекта тени от прокладки является основной причиной наблюдаемого улучшения производительности.

Электродные системы, используемые для RED, включают инертные электроды, активные электроды, емкостные электроды.

Материалы электродов и электролитов (табл. 2) играют важную роль в устройствах накопления энергии и преобразования. Для RED были проведены систематические исследования по конструкции и выбору подходящего электрода [23, 24]. Электродные системы с равновесными электродными реакциями и промывкой рециркулирующих электродов не сопровождаются чистой химической реакцией и имеют нулевое равновесное напряжение. Типичные примеры таких электродов включают медные сетчатые электроды в CuSO_4 , Zn электроды в ZnSO_4 , NaCl в электродах Ag/AgCl. В таких окислительно-восстановительных системах один электрод растет, в то время как другой растворяется. Следовательно, питающие растворы необходимо периодически менять местами, чтобы инвертировать направление электрического потока, таким образом ограничивая конструкцию стека идентичными высококонцентрированными и низкоконцентрированными растворами. Реверсирование потока можно предотвратить, используя однородную окислительно-восстановительную пару с инертными электродами, такими как платинированный титан и титановая сетка с покрытием. В настоящее время сетчатый электрод из титана, покрытый Ru-Ir, в растворах $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ и $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$, NaCl широко используется в качестве системы RED. Окислительно-восстановительная пара $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ достаточно стабильна при pH 7, хотя существует риск токсичности в сильно кислых условиях или в присутствии света [25].

Таблица 2

Table 2

Электроды системы, используемые для RED

Electrodes of the system used for RED

Электроды	Раствор электролита	Электрод реакция
Cu Металлические	CuSO_4	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e} \rightarrow \text{Cu}$ $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}$

Zn фольга	0,015 M ZnCl ₂	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e} \rightarrow \text{Zn}$ $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}$
Ag-AgCl тарелки	NaCl	$\text{AgCl} + \text{e} \rightarrow \text{Ag} + \text{Cl}^-$ $\text{Ag} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl} + \text{e}$
Ti-Pt Металлические	0,035 M NaCl	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}$
Углеродные тарелки	~0,5 M NaCl	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}$
Ti-Pt / Ir сетка	0,05 M FeCl ₂ , 0,05 M FeCl ₃ в 0,5 M NaCl	$\text{Fe}^{3+} + 3\text{e} \rightarrow \text{Fe}$ $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{e}$
Ti-Pt / Ir сетка	0,05-0,3 K ₄ Fe(CN) ₆ , 0,3 M K ₃ Fe(CN) ₆ в 0,25-2,5 M NaCl	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} + \text{e} \rightarrow [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-} \rightarrow [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} + \text{e}$
Ti-Pt / Ir сетка	0,26 M NaCl	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}$
Ti-Pt с углеродным слоем	0,25 M NaCl	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}$

Суммируя литературные данные о достигнутом к настоящему времени техническом уровне разработок технологии обратного электролиза, можно подчеркнуть, что RED имеет большие перспективы по получению альтернативной электроэнергии. Технология достаточно проработана и изучена, приложено много усилий к ее коммерческому применению. Научная значимость состоит в решении проблем, мешающих полноценной реализации имеющегося потенциала RED, а именно в повышении плотности мощности получаемой электроэнергии и снижении стоимости процесса. Практическая значимость применения RED состоит в расширении потенциала использования данной технологии, поскольку высококонцентрированные, пригодные в качестве рабочих, растворы могут быть получены в ряде промышленных видов деятельности. Также появляется несколько других применений, таких как очистка сточных вод с одновременной выработкой электроэнергии [26]. В целом, это является многообещающей перспективой для RED в качестве надежного источника энергии, как только будут решены технологические проблемы.

Целью данной работы явились экспериментальные исследования по оптимизации выходных электрических и массообменных характеристик при проведении процесса обратного электролиза.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Конструкционные характеристики электромембранного аппарата:

Тип аппарата – фильтр-прессный, многокамерный, однопакетный, двухтрактный с отдельной промывкой электродных камер (ячеек)

Общее число рабочих камер (ячеек) (n_c) – 60

Число камер (ячеек, cell) по 1 тракту (n_t) – 30

Площадь (рабочая) камеры (S_c) (square of area) – 0,057 - 0,058 м²

Ширина (width) камеры (W_c) – 190 мм

Длина (length) камеры (L_c) – 300 мм

Длина пути в активной зоне камеры (L_a) – 320 мм

Мембранное расстояние (толщина мембранных прокладок) (d_c) – 1,0 мм

Степень заполнения камеры (ячейки) сеткой сепаратором-турбулизатором (β_f) – 0,3

Толщина приэлектродных камер (d_{ef}) – 10 мм

Характеристики мембран:

Использовались мембраны китайского производителя IONSEP

Соотношение катион- (CM) и анионообменных (AM) мембран – 1:1

Толщина мембраны в набухшем состоянии (l_m , l_{AM} , l_c) – 0,6 мм

Удельное поверхностное сопротивление мембран (ρ_{CM}^* , ρ_{AM}^*) – 12 Ом*см²

Удельное поверхностное электрическое сопротивление мембран (ρ_{CM} , ρ_{AM}) – 6-10 Ом/см²

Красность замедления диффузии ионов в мембране по сравнению с водой (K_D) – 7

Характеристики растворов:

Исходные объемы раствором по линиям (трактам) концентрата (c) и диализата (d) при работе в периодическом режиме с рециркуляцией растворов ($V_{c,i}$ $V_{d,i}$) – 6,0 л (дм³) (i - incial)

Q_c, Q_d, Q_e – расход растворов через электродиализатор по трактам концентрата (с), диализата (d), и приэлектродных камер (е) – 240, 240, 230 л/ч

Движение потоков встречное

Начальный состав и концентрации растворов

Рабочие растворы в ячейках: концентрат - 50 г/л NaCl, диализат – водопроводная вода 0,3 г/л.

Растворы в электродных камерах варьировались в разных опытах: Na_2SO_4 , $K_4Fe(CN)_6/K_3Fe(CN)_6$, $NaNO_3/NaNO_2$, NaOH.

Электрические характеристики:

Фактически задается только одна характеристика – напряжение на аппарате (U_s) – В (или напряжение на 1 камеру (U_c))

Порядок расчёта RED

Использовали два режима работы RED: режим с задаваемой подключенной внешней нагрузкой (режим разряда) и без внешней нагрузки с разрывом цепи (режим батареи).

При замыкании на нагрузку:

$$r = \frac{E - U_R}{I}, \text{ Ом} \quad (1)$$

E – ЭДС с разрывом цепи, В

U_R – Напряжение с подключенной нагрузкой, В

I – Ток при подключении нагрузки, А

r , Ом - внутреннее сопротивление аппарата

R , Ом – задаваемое сопротивление внешней нагрузки, Ом

Теоретическая ЭДС аппарата

$$E_{\text{теор}}^{\text{апп}} = n_m \cdot 2,3 \cdot \frac{RT}{F} \cdot \lg \left(\frac{\chi_c}{\chi_d} \right) = n_m \cdot 0,06 \cdot \lg \left(\frac{\chi_c}{\chi_d} \right) \quad (2)$$

χ – УЭП, в мСм/см

Теоретическая сила тока

$$I_{\text{расчетн.}} = \frac{E_{\text{анн}}}{(r_{\text{анн}} + R_{\text{анн}})} \quad (3)$$

Мощность аппарата

$$P_{\text{анн}} = \frac{E_{\text{анн}}^2 \cdot R_{\text{анн}}}{(r_{\text{анн}} + R_{\text{анн}})^2}, \text{ Вт/апп} \quad (4)$$

a – наклон, Ом⁻¹

$$a = \frac{P_{R, \text{анн}}}{E_{\text{анн}}^2} = \frac{R_{\text{анн}}}{(r_{\text{анн}} + R_{\text{анн}})^2}, \frac{1}{\text{Ом}} \quad (5)$$

$$\frac{R}{a} = (r + R)^2; \quad \sqrt{\frac{R}{a}} = r + R; \quad r = \sqrt{\frac{R}{a}} - R; \quad r = \sqrt{\frac{R \cdot E_{\text{расчет}}^2}{P}} - R \quad (6)$$

Термодинамика процесса

Расчет ΔG_{mix} – работа, которая может быть выполнена

$$\Delta G_{\text{mix}} = RT ((V_k \cdot C_k \cdot \ln a_k + V_d \cdot C_d \cdot \ln a_d - (V_k + V_d) \cdot C_{\text{mix}} \cdot \ln a_{\text{mix}})) \quad (7)$$

Расчет баланса сопротивлений и падения напряжений, потенциалов

Считаем, что $r_{\text{апп}}$ складывается из R_m (мембран), $R_{\text{к и д}}$ (сопротивление растворов), R_e (электродов), $R_{\text{кон}}$ (контактов):

$$r_{\text{апп}} = n_m R_m + \frac{n_m}{2} (R_k + R_d) + R_e \quad (8)$$

R_m рассчитаем из ρ_m^* (удельного поверхностного сопротивления мембран, Ом*см²)

$R_{\text{растворов}}$ рассчитаем из ρ_c, ρ_d

$$\rho = \frac{10}{\chi \text{ (мСм/см)}}, \quad (9)$$

$S = 0,058 \text{ м}^2, d = 0,001 \text{ м}$

Сопротивление раствора в мембранах определяем из соотношения

$$\rho = \frac{RS}{d}, \text{ Ом*м} \quad (10)$$

Расчет диффузии

Поток соли в диализат из концентрата

$$j_s = \frac{N_2 - N_1}{58,5 * S_M * n_{\text{пар}} * (\tau_2 - \tau_1) * 3600} \quad (11)$$

$$j_s = \frac{N_2 - N_1}{S_{\text{пар}} * (\tau_2 - \tau_1) * 3600} \quad (12)$$

S_M - площадь мембраны

$S_{\text{пар}}$ - площадь пар

$n_{\text{пар}}$ - число пар

$\tau_2 - \tau_1$ - часы

N - число моль-эквивалентов вещества

Диффузия соли D_s , $\text{м}^2/\text{с}$

$$D_s = j_s * \frac{l}{\Delta c} * \frac{1}{360000} \quad (13)$$

l - толщина мембраны, м

Расчет осмоса, эл/осмоса

$$\frac{j_w}{\Delta c_s} = \frac{j_s}{\Delta c_s} - \bar{P}_w \quad (14)$$

j_w, j_s - поток воды и соли, через мембранную пару из К в Д, $\frac{\text{моль}}{\text{м}^2 * \text{с}}$

$\bar{P}_w$ - Осмотическая проницаемость мембранной пары, $\text{м} * \text{с}^{-1}$

$$\bar{D}_w = \bar{P}_w * l_m, \text{м}^2/\text{с} \quad (15)$$

$\bar{D}_w$ - перенос воды

$$j_w = \frac{(V_2 - V_1) * 1000 \Gamma / \text{л}}{18 \Gamma / \text{моль} * 3600 \text{с} / \text{ч} * S_{\text{м}^2} * (\tau_2 - \tau_1, \text{ч})}, \frac{\text{моль}}{\text{м}^2 * \text{с}} \quad (16)$$

Потоки осмоса и электроосмоса разнонаправлены:



Рис. 1. Направление движения потоков воды при осмосе и электроосмосе

Fig. 1. Direction of water flow during osmosis and electroosmosis

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Электрическая эффективность процесса (КПД)

$$\eta = \frac{\left(\frac{j_s}{\Delta c}\right)}{\left(\frac{i}{\Delta c}\right)} \quad (17)$$

Результаты (Results)

По результатам проведенных экспериментальных исследований была составлена сводная таблица с рассчитанными электрическими и массообменными характеристиками процесса обратного электродиализа с разными задаваемыми условиями. В опытах варьировались составы растворов в приэлектродных камерах, скорости потоков растворов, режимы работы (разряд, батарея), подаваемая внешняя нагрузка, число камер по тракту (табл.

Таблица 3

Table 3

Результаты экспериментальных исследований технологии RED в различных условиях

№ опыта	Число камер по тракту	V, л/ч	R внешн., Ом	Электродный раствор	Режим	г аппарат	г теор., Ом	$D_s \cdot 10^{11}, \text{м}^2/\text{с}$	э/э	P, Вт/м ²	a (P/E ²)	A, кВт*ч
1/22	29	350(к)/340(д)	100 330 50	Na ₂ SO ₄	разряд	75	170	3,2	0,1 0,04 0,13	0,025 0,014 0,026	0,008	0,13
2/22	29	350/340	50	Na ₂ SO ₄	батарея	23	51→170	4,06	0,14	0,182	0,0034	0,16
3/22	29	250	50	Na ₂ SO ₄	разряд	20	26	5,06	0,33-0,41	0,187	0,0059	1,5
4/22	29	100	50	Na ₂ SO ₄	разряд	14,5	15	4,8	0,28-0,45	0,176	0,0062	0,85
5/22	29	100/250	50	Na ₂ SO ₄	разряд	20,2	26	2,8	0,43	0,17	0,0056	1,0
6/22	29	250	50	NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	разряд	19,8	32	2,86	0,39	0,12	0,0044	0,72
7/22	29	250	25	NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	разряд	25	27	5,1	0,29 0,32	0,16	0,0043	0,65
8/22	29	250	25	NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	батарея	28,5	50→185	4,6	0,24	0,17↓	0,0026	0,25
9/22	29	250	25	[Fe(CN) ₆]	разряд	20,5	30	2,74	0,56 0,51	0,34	0,0038	1,05

10/22	29	250	25	[Fe(CN) ₆]	батарея	18,8	30↓	4,23	0,33	0,17	0,0045	>0,6
11/22	29	150	25	[Fe(CN) ₆]	батарея	20,4	35↓	4,3	0,34	0,18	0,0018	0,8
12/22	29	100	25	Na ₂ SO ₄	батарея	29,8	51→1500	4,7	0,19	0,23	0,001	0,12
13/22	29	250	25	NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	батарея	20	35→240	2,88	0,25	0,23	0,0025	0,225
14/22	29	150	25	NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	батарея	18,5	31 540	4,18	0,23	0,15	0,0036	0,212
15/22	4	130/150	10	Na ₂ SO ₄	разряд	13,1	12,9	4,14	0,11	0,3	0,05	0,16
16/22	4	150/120	0	Na ₂ SO ₄	разряд	12,4	6,2	4,8	0,26	0,22-0,33	0,1914	>0,5
17/22	4	150/200	10	NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	разряд	13	10,4	3,9	0,14	0,2	0,1	>0,22
18/22	4	150/200	10	NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	батарея	12,8	1,7 585	4,4	0,3	0,34	0,19	>0,007
19/22	29	330/350	100	NaOH	разряд	40	55 31	2,9	0,23	0,12	0,0023	>0,8
20/22	29	330/350	100	NaOH	разряд	33	56 250	2,5-2,9	0,11	0,11	0,06	0,72

По рассчитанным основным параметрам эффективности процесса (плотность мощности, внутреннее сопротивление, перенос вещества, количество вырабатываемой электроэнергии, электрический КПД) лучшие результаты наблюдались в опыте 9/22 (табл. 3).

На рисунках 1-6 показаны изменения основных характеристик процесса обратного электродиализа опыта 9/22 в зависимости от времени проведения.

Измеренная ЭДС в режиме батареи, напряжение в режиме разряда и рассчитанное напряжение снижаются с течением эксперимента (рис. 2).

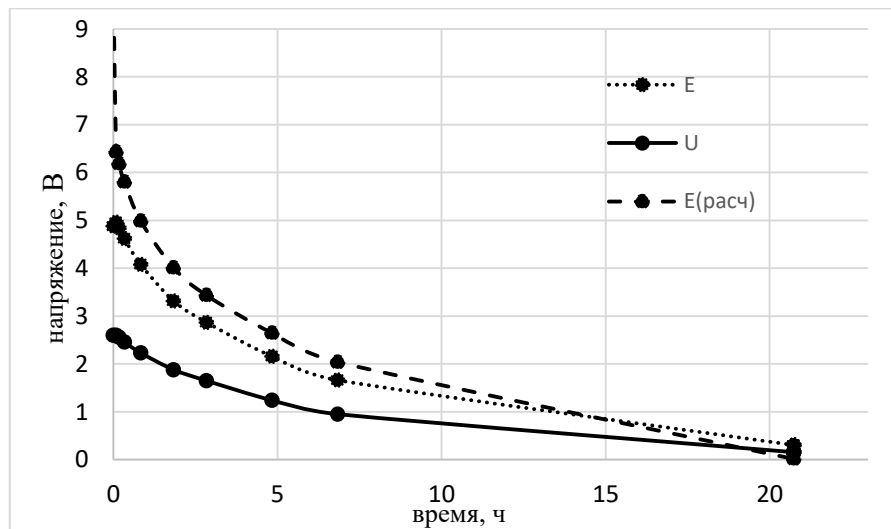


Рис. 2. Зависимость измеренного ЭДС, напряжения и расчетного напряжения от времени протекания процесса обратного электродиализа

Fig. 2. Dependence of the measured EMF, voltage and calculated voltage on the time of the reverse electro dialysis process flowing

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Фиксированная сила тока также снижается, причем вид кривой аналогичен кривым напряжения (рис. 3).

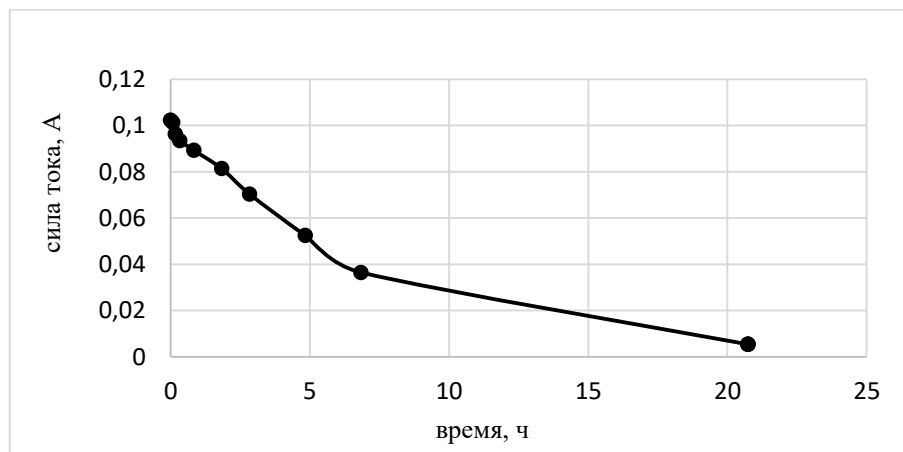


Рис. 3. Зависимость силы тока от времени протекания процесса обратного электродиализа

Fig. 3. Dependence of current strength on the time of the reverse electro dialysis process running

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Солесодержание за время эксперимента симметрично увеличивается в диализате и снижается в концентрате, пока не достигнет равновесия (рис. 4).

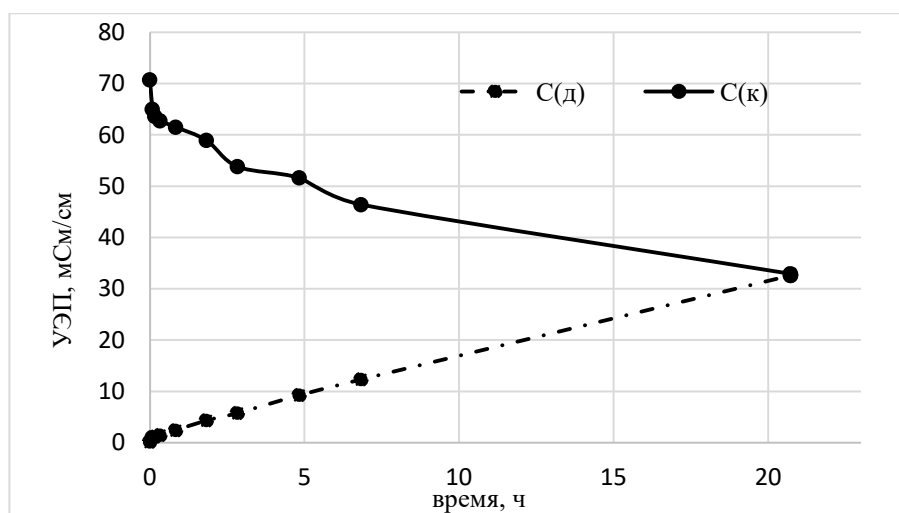


Рис. 4. Зависимость изменения удельной электропроводности в концентрате и диализате от времени протекания процесса обратного электродиализа
 Fig. 4. Dependence of change of specific conductivity in concentrate and dialysate on time of reverse electro dialysis process running

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Перенос соли сопровождается процессами осмоса и электроосмоса, а, следовательно, переносом воды и изменениями объемов концентрата и диализата (рис. 5).

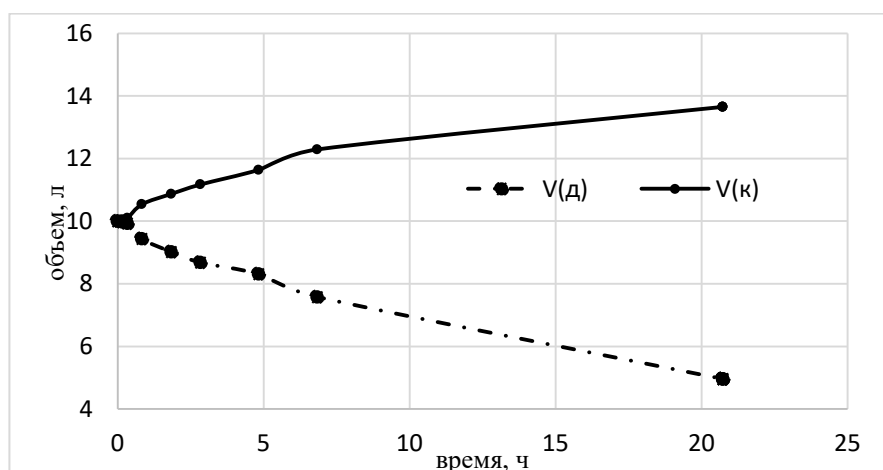


Рис. 5. Зависимость изменения объемов концентрата и диализата от времени протекания процесса обратного электродиализа
 Fig. 5. Dependence of concentrate and dialysate volume change on the time of the reverse electro dialysis process runtime

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

По полученным результатам электрических характеристик можно заключить, что максимальная эффективность процесса обратного электродиализа достигается в первые два часа эксперимента. Далее с выравниванием концентраций растворов электрическая эффективность плавно снижается (рис. 6).

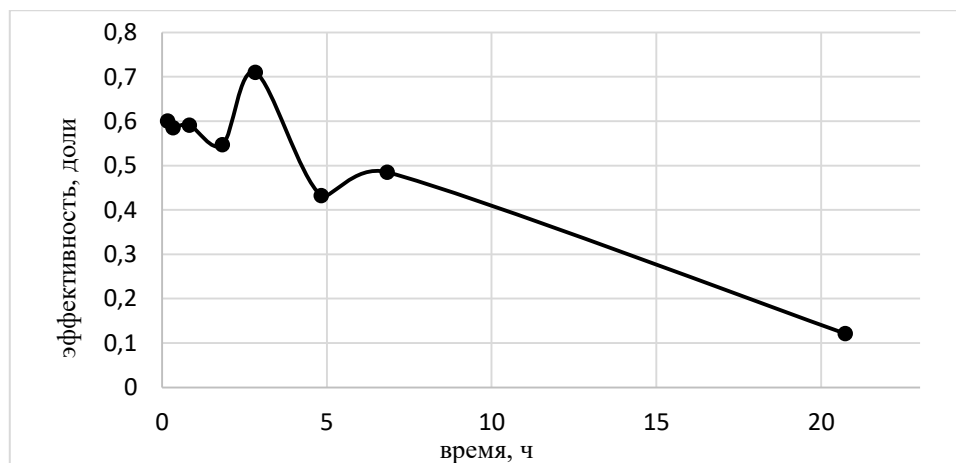


Рис. 6. Зависимость изменения электрической эффективности от времени протекания процесса обратного электродиализа

Fig. 6. Dependence of change in electrical efficiency on the time of the reverse electro dialysis process flowing

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

В целом, количество выработанной электроэнергии с аппарата экспоненциально увеличивается во времени (рис. 7).

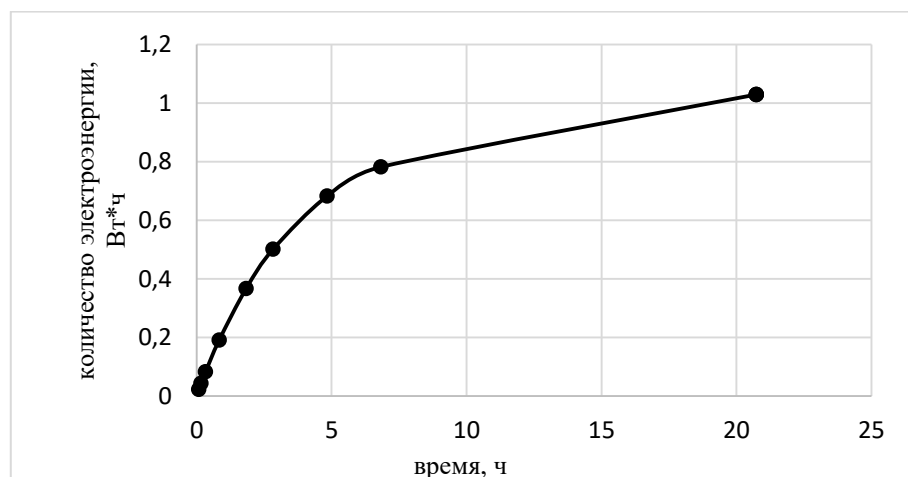


Рис. 7. Зависимость выработанной электроэнергии от времени протекания процесса обратного электродиализа

Fig. 7. Dependence of the generated electricity on the time of the reverse electro dialysis process runtime

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

При анализе влияющих параметров для всех проведенных опытов (скорости потоков диализата и концентрата, внешнего и внутреннего сопротивления, концентрации растворов, состава растворов в приэлектродных камерах) были получены следующие результаты:

- Скорость потока 200 л/ч или 330 л/ч влияет на электрические характеристики только в первые полчаса работы аппарата. При высокой скорости потоков происходит быстрое снижение электрических характеристик, а затем они выравниваются.

- При повышении концентрации растворов массоперенос соли увеличивается, а, следовательно, растут параметры электрической эффективности процесса.

- Более концентрированные растворы дают большее напряжение и силу тока в начале процесса (первые полчаса), но затем более резкое снижение по ходу эксперимента в сравнении с менее концентрированными, т.е. со временем все выравнивается.

Чем больше внешняя нагрузка (внешнее задаваемое сопротивление), тем ниже электрические характеристики. Повышение внутреннего сопротивления за счет процессов в аппарате также значительно снижает выходную мощность процесса (рис. 8).

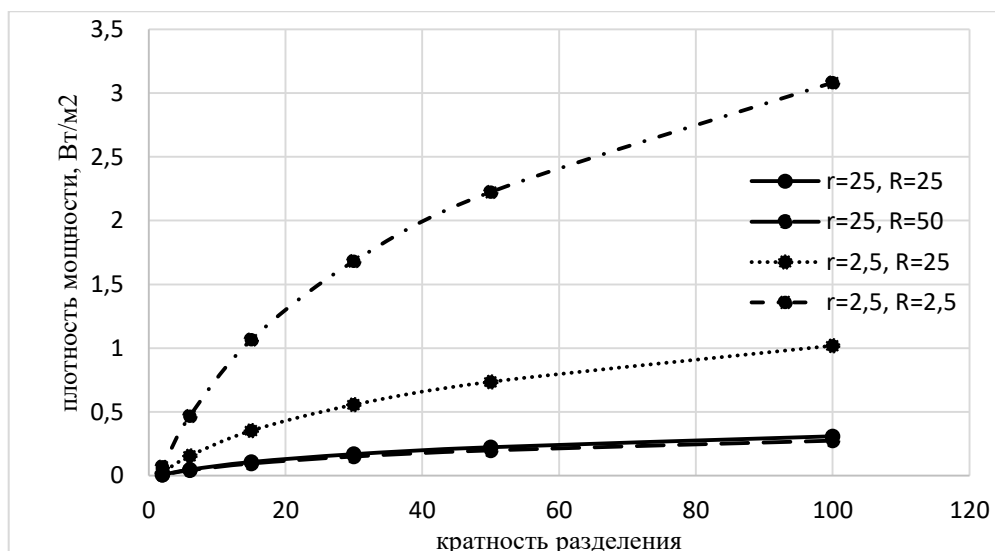


Рис. 8. Зависимость получаемой плотности мощности при различных внутреннем и внешнем сопротивлении от кратности разделения концентрата и диализата

Fig. 8. Dependence of the obtained power density at different internal and external resistances on the multiplicity of separation of concentrate and dialysate

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

Если говорить о растворах в приэлектродных камерах, то большую мощность можно получить при использовании системы $K_4Fe(CN)_6/K_3Fe(CN)_6$. Нет чистой химической реакции и, следовательно, нет потерь напряжения при электролизе. Однако, на практике данный раствор крайне коррозионно-активен, что привело к выходу из строя одного из насосов в электромембранном аппарате.

Растворы Na_2SO_4 и доступны $NaCl$, но при их использовании отмечается потеря напряжения 2-3В в результате прохождения реакций на электродах и образование опасных газов (H_2 , Cl_2).

В опытах использовали новую окислительно-восстановительную систему NO_3^-/NO_2^- , которая показала лучшие результаты по выдаваемой мощности аппарата в сравнении с сульфатом натрия и схожие с гексоцианоферратной системой. При этом нитрит-нитратная система не обладает коррозионной активностью.

Выводы (Conclusions)

Существует ряд важных вопросов/вызовов, которые заслуживают особого внимания, чтобы превратить обратный электродиализ в конкурентоспособную технологию для производства электроэнергии. Такие области исследований связаны со свойствами мембран (электрическое сопротивление и проницаемость) и стоимостью, динамикой жидкости (геометрия стека) и устойчивостью к загрязнению, связанному с использованием природных или промышленных растворов, составом и концентрацией рабочих растворов, скоростью движения потоков и температурой.

Несмотря на большие достижения, представленные в литературе и большое количество проведенных исследований, промышленное воплощение RED пока недоступно. Для вывода RED на промышленный уровень воплощения необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

На лабораторном стенде проведены масштабные эксперименты по обратному электродиализу на различных модельных системах. Модельных системы представлены солевыми растворами (растворы хлорида натрия) и сощелочными растворами. Исследованы зависимости показателей обратного электродиализа от конструктивных характеристик электромембранного аппарата – количество рабочих камер; от характеристики электродной системы; от типа электродной реакции; от состава приэлектродных растворов; вольтамперных характеристик; от вида и характеристик ионоселективных мембран; от изменения внешней нагрузки; режимных характеристик процесса – линейной скорости потоков по трактам высокоминерализованного и низкоминерализованного растворов в режимах ожидания и разряда.

Лимитирующая стадия процесса – чисто диффузионный перенос ионизированных частиц через ионоселективные мембраны. Энергетический потенциал системы, т.е. максимально возможная работа определяется концентрационным градиентом высокоминерализованного и низкоминерализованного растворов. Степень извлечения энергии (коэффициент полезного действия) испытывает влияние от наличия негативных процессов и установленных режимных характеристик. Наиболее сильное влияние оказывает осмотический перенос воды из диализата в концентрат. При этом отмечается разбавление высокоминерализованного раствора и концентрирование низкоминерализованного, что приводит к снижению энергетического потенциала системы, то есть возможной работы.

Выходная мощность установки обратного электродиализа имеет сложную зависимость от многих параметров: количества мембран, градиента концентраций питательных растворов, внутренних и внешних сопротивлений. Существенное отрицательное влияние оказывает наличие перенапряжения электродных реакций в случае обычного не безбарьерного разряда. Из круга использованных электродных систем безбарьерная система $K_3Fe(CN)_6/K_4Fe(CN)_6$ на платине имела сопротивление менее 2 Ом, нитрит/нитратная 10-10,5 Ом, система с раствором $Na_2SO_4 - 11,2$ Ом.

Внутреннее сопротивление установки обратного электродиализа (солевого источника тока) в свою очередь определяется в первую очередь типом (видом) ионоселективных мембран и их толщиной, выбором электродной системы и, в меньшей степени скоростью циркуляции растворов. Максимальная достигнутая электрическая мощность при использовании обычных гетерогенных мембран толщиной 0,6 мм составила 0,34 Вт/м² с мембранной пары.

Литература

1. Post J.W., Hamelers H.V.M., Buisman C.J.N. Energy recovery from controlled mixing salt and fresh water with a reverse electrodialysis system // *Environ Sci Technol.* 2008;42:5785–5790.
2. Wick G.L. Power from salinity gradients // *Energy.* 1978;3:95–100.
3. Mei Y., Tang C.Y. Recent developments and future perspectives of reverse electrodialysis technology: a review // *Desalination.* 2018;425:156–174.
4. Lee W., Krantz W.B., Cornelissen E., Post J.W., Verliefde A.R.D., Tang S. New Hybrid Process Reverse Electrodialysis and Reverse Osmosis for Low Energy Sea Water Desalination and Brine Guide. *Applied Energy.* 2013;104:592-602.
5. Weinstein Y.N., Leitz F.B. Electric Power From Salinity Difference: In *Dialysis Accumulator. The science.* 1976;191:557-9.
6. Wirman J., de Jong R.M., Saakes M., Metz S.J., Harmsen G.J. Reverse electrodialysis: Comparison of six commercial membrane pairs for thermodynamic efficiency and power density. *Journal of Membrane Science.* 2009;343:7-15.
7. Vermaas D.A., Saakes M., Nijmeyer K. Doubled power density over salinity gradients with decreasing Intermembrane Distance. *Environment Science & TECHNOLOGY.* 2011;45:7089-7095.
8. Tedesco M., Cipollina A., Tamburini A., van Baak V., Micale G. Simulation of reverse electrodialysis process with sea water and concentrated brines. *Desalination and Water Treatment.* 2012;49:404-424.
9. Tedesco M., Brauns E., Cipollina A., Micale G., Modica P., Russo G., et al. Reverse electrodialysis with saline water and concentrated brines: a laboratory study towards technology scaling up. *Diary from Membrane Science.* 2015;492:9-20.
10. Daniilidis A., Vermaas D.A., Herber R., Nijmeijer K. Experimentally achievable energy from mixing river water, sea water, or brines with reverse electrodialysis. *Renewable Energy.* 2014;64:123-131.
11. Vermaas D.A., Guler E., Saakes M., Nijmeijer K. Theoretical force density versus salinity gradients using reverse run electrodialysis. *Energy Procedure.* 2012;20:170-184.
12. Tufa R.A., Pawlowski S., Veerman J., Bouzek K., Fontananova E., di Profio G. Progress and prospects in reverse electrodialysis for salinity gradient energy conversion and storage // *Appl. Energy.* 2018;225:290–331.
13. Weiner A.M., McGovern R.K., Lienhard V.J. A new electrodialysis flyback A STRATEGY design that significantly reduces the cost of electricity. *Diary from Membrane Science.* 2015;493:605-14.
14. Fontanova E., Zhang W., Nicotera I., Simari S., van Baak W., Di Profio G., et al. Probing membrane and interface properties in concentrated electrolyte solutions. *Diary from Membrane Science.* 2014;459:177-89.
15. Moreno J., Díez V., Saakes M., Nijmeijer K. Mitigation of the effects of multivalued ion transport in reverse electrodialysis. *Diary from Membrane Science.* 2018;550:155-62.

16. Galama A., Vermaas D.A., Wirman J., Saakes M., Reinaarts H.M., Post J.W. Membrane resistance: the effect of salinity gradients on a cation-exchange membrane. *Journal of Membrane Science*. 2014;467:279-91.
17. Avchi A., Sarkar P., Tufa R.A., Messana D., Argurio P., Fontanova E. et al. Influence of Mg^{2+} ions on energy generation Author: Electrodialysis reversal. *Diary from Membrane Science*. 2016;520:499-506.
18. Кадер Д.М., Алексеева Н.В. Влияние рабочих параметров и характеристик мембран на производительность аппарата обратного электродиализа // Южно-Сибирский научный вестник. 2019;2:161–168.
19. Tian H., Wang Y., Pei Y., Crittenden J.C. Unique applications and improvements of reverse electrodialysis: A review and outlook // *Applied Energy*. 2020;262:114482.
20. Вафин Т.Ф., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Закиров И.А. Технологические схемы утилизации стоков водоподготовительных испарительных установок с использованием электромембранных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012;1-2:182-186.
21. Azadeh N., Hamed K., Ehsan S., Seyed M.M., Hideto M. Recent progress in membrane development, affecting parameters, and applications of reverse electrodialysis: A review / *Journal of Water Process Engineering*. 2022;47:102706.
22. Muhammad N.Z.A., Mohamed M.N., Joost V. Towards the development of new generation of ion exchange membranes for reverse electrodialysis: A review, *Desalination*. 2022;537:115854.
23. Чичиров А.А., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Минибаев А.И. Приемы системного анализа и ресурсосберегающие электромембранные технологии при создании малосточной системы водопользования объектов энергетики республики Татарстан // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022;24:3:66-82.
24. Syed A.S., Zeeshan H., Majid S., Daejoong K. Development of an Efficient System for Blue Energy Production Based on Reverse Electrodialysis (RED) by Optimizing Electrolyte Composition: Experimental and Theoretical Simulations *Energy Fuels*. 2022;12:6353–6361.
25. Susanto H., Fitrianingtyas M., Widiasta N., Istirokhatun T., Fahni Y., Abdurahman A.U. The Role of Membrane, Feed Characteristic and Process Parameters on RED Power generation *International Journal of Renewable Energy Development*. 2023;12:203-208.
26. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д. Утилизация жидких высокоминерализованных отходов химобессоливающей водоподготовительной установки ТЭС с генерацией электроэнергии методом обратного электродиализа Мембраны и мембранные технологии. 2021;11:5:382–390.

Авторы публикации

Чичиров Андрей Александрович - д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и водородная энергетика» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

ORCID: 0000-0002-9116-0370 email: khimiya_kgeu@mail.ru

Филимонова Антонина Андреевна - д-р техн. наук, доцент кафедры «Химия и водородная энергетика» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

ORCID: 0000-0001-6238-188X email aachichirova@mail.ru

Чичирова Наталия Дмитриевна - д-р хим. наук, профессор, заведующая кафедрой «Атомные и тепловые электрические станции» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

ORCID: 0000-0001-8635-9177 email: ndchichirova@mail.ru

Майоров Егор Сергеевич - студент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), лаборант-исследователь НИЛ «ТЭГАТУ»

Email: mes.tegatu@gmail.com

References

1. Post J.W., Hamelers H.V.M., Buisman C.J.N. Energy recovery from controlled mixing salt and fresh water with a reverse electrodialysis system // *Environ Sci Technol*. 2008;42:5785–5790.

2. Wick G.L. Power from salinity gradients // *Energy*. 1978;3:95–100.
3. Mei Y., Tang C.Y. Recent developments and future perspectives of reverse electrodialysis technology: a review // *Desalination*. 2018;425:156–174.
4. Lee W., Krantz W.B., Cornelissen E., Post J.W., Verliefde A.R.D., Tang S. New Hybrid Process Reverse Electrodialysis and Reverse Osmosis for Low Energy Sea Water Desalination and Brine Guide. *Applied Energy*. 2013;104:592-602.
5. Weinstein Y.N., Leitz F.B. Electric Power From Salinity Difference: In *Dialysis Accumulator*. The science. 1976;191:557-9.
6. Wirman J., de Jong R.M., Saakes M., Metz S.J., Harmsen G.J. Reverse electrodialysis: Comparison of six commercial membrane pairs for thermodynamic efficiency and power density. *Journal of Membrane Science*. 2009;343:7-15.
7. Vermaas D.A., Saakes M., Nijmeyer K. Doubled power density over salinity gradients with decreasing Intermembrane Distance. *Environment Science & TECHNOLOGY*. 2011;45:7089-7095.
8. Tedesco M., Cipollina A., Tamburini A., van Baak V., Micale G. Simulation of reverse electrodialysis process with sea water and concentrated brines. *Desalination and Water Treatment*. 2012;49:404-424.
9. Tedesco M., Brauns E., Cipollina A., Micale G., Modica P., Russo G., et al. Reverse electrodialysis with saline water and concentrated brines: a laboratory study towards technology scaling up. *Diary from Membrane Science*. 2015;492:9-20.
10. Daniilidis A., Vermaas D.A., Herber R., Nijmeijer K. Experimentally achievable energy from mixing river water, sea water, or brines with reverse electrodialysis. *Renewable Energy*. 2014;64:123-131.
11. Vermaas D.A., Guler E., Saakes M., Nijmeijer K. Theoretical force density versus salinity gradients using reverse run electrodialysis. *Energy Procedure*. 2012;20:170-184.
12. Tufa R.A., Pawlowski S., Veerman J., Bouzek K., Fontananova E., di Profio G. Progress and prospects in reverse electrodialysis for salinity gradient energy conversion and storage // *Appl. Energy*. 2018;225:290–331
13. Weiner A.M., McGovern R.K., Lienhard V.J. A new electrodialysis flyback A STRATEGY design that significantly reduces the cost of electricity. *Diary from Membrane Science*. 2015;493:605-14.
14. Fontanova E., Zhang W., Nicotera I., Simari S., van Baak W., Di Profio G., et al. Probing membrane and interface properties in concentrated electrolyte solutions. *Diary from Membrane Science*. 2014;459:177-89.
15. Moreno J., Díez V., Saakes M., Nijmeijer K. Mitigation of the effects of multivalued ion transport in reverse electrodialysis. *Diary from Membrane Science*. 2018;550:155-62.
16. Galama A., Vermaas D.A., Wirman J., Saakes M., Reinaarts H.M., Post J.W. Membrane resistance: the effect of salinity gradients on a cation-exchange membrane. *Journal of Membrane Science*. 2014;467:279-91.
17. Avchi A., Sarkar P., Tufa R.A., Messana D., Argurio P., Fontanova E. et al. Influence of Mg²⁺ ions on energy generation Author: Electrodialysis reversal. *Diary from Membrane Science*. 2016;520:499-506.
18. Kader D.M., Alekseeva N.V. Influence of operating parameters and characteristics of membranes on the performance of the reverse electrodialysis apparatus // *South Siberian Scientific Bulletin*. 2019;2:161-168
19. Tian H., Wang Y., Pei Y., Crittenden J.C. Unique applications and improvements of reverse electrodialysis: A review and outlook // *Applied Energy*. 2020;262:114482.
20. Vafin T.F., Chichirova N.D., Chichirov A.A., Zakirov I.A. Technological schemes of the effluent utilization of water treatment evaporator plants using electromembrane devices // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2012;1-2:182-186.
21. Azadeh N., Hamed K., Ehsan S., Seyed M.M., Hideto M. Recent progress in membrane development, affecting parameters, and applications of reverse electrodialysis: A review / *Journal of Water Process Engineering*. 2022;47:102706
22. Muhammad N.Z.A., Mohamed M.N., Joost V. Towards the development of new generation of ion exchange membranes for reverse electrodialysis: A review, *Desalination*. 2022;537:115854
23. Chichirov A.A., Filimonova A.A., Chichirova N.D., Minibaev A.I. System analysis techniques and resource-saving electromembrane technologies in the creation of the low-east water use system of the power engineering facilities of the Republic of Tatarstan // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24:3:66-82.

24. Syed A.S., Zeeshan H., Majid S., Daejoong K. Development of an Efficient System for Blue Energy Production Based on Reverse Electrodialysis (RED) by Optimizing Electrolyte Composition: Experimental and Theoretical Simulations *Energy Fuels* 2022;12:6353–6361

25. Susanto H., Fitrianingtyas M., Widiasta N., Istirokhatun T., Fahni Y., Abdurahman A.U. The Role of Membrane, Feed Characteristic and Process Parameters on RED Power generation *International Journal of Renewable Energy Development*. 2023;12:203-208.

26. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D. Utilization of Liquid Highly Mineralized Wastes from Chemical Bessalination Water Treatment Plant of TPP with Electricity Generation by Reverse Electrodialysis Method Membranes and Membrane Technologies. 2021;11:5:382-390

Authors of the publication

Andrey A. Chichirov - Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan, Russia
ORCID: 0000-0002-9116-0370 email: khimiya_kgeu@mail.ru

Antonina A. Filimonova - Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan, Russia
ORCID: 0000-0001-6238-188X email: aachichirova@mail.ru

Natalia D. Chichirova - Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan, Russia
ORCID: 0000-0001-8635-9177 email: ndchichirova@mail.ru

Egor S. Mayorov - Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan, Russia. Email: mes.tegatu@gmail.com

Получено 26.06.2023г.

Отредактировано 17.07.2023г.

Принято 24.07.2023г.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 536.2 (075)

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-4-71-82

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧИСЕЛ В ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ЦИЛИНДРА

Котова Е.В.¹, Клеблеев Р.М.¹, Кудинов В.А.¹

¹Самарский государственный технический университет,
г. Самара, Россия
totig@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Ввиду трудностей нахождения собственных чисел и собственных функций для тел с осевой (цилиндр) и центральной (шар) симметрией, определяемых в классических методах из краевых задач Штурма – Лиувилля, включающих уравнения Бесселя, точные аналитические решения которых не получены (известны лишь численные решения, описываемые приближенными аппроксимационными формулами), возникает необходимость разработки аналитических методов их решения. В связи с чем, была поставлена ЦЕЛЬ - разработать метод определения собственных функций и собственных чисел, связанный с выполнением дифференциального уравнения краевой задачи Штурма – Лиувилля в центре симметрии, применительно к телам с осевой симметрией. МЕТОДЫ. В основу метода положено использование дополнительных граничных условий (ДГУ) и ортогональных систем координатных функций в интегральном методе теплового баланса. Система собственных функций, определяемая из решения краевой задачи Штурма – Лиувилля, принимается в виде тригонометрического ряда, неизвестные константы которого находятся из ДГУ. ДГУ определяются так, чтобы в центре симметрии выполнялось исходное дифференциальное уравнение нестационарной задачи теплопроводности. РЕЗУЛЬТАТЫ. Показана высокая точность нахождения собственных чисел, получаемых из решения уравнения Бесселя краевой задачи Штурма – Лиувилля. Точность собственных чисел определяется числом используемых ДГУ. ВЫВОДЫ. Полученное окончательное решение исходной задачи нестационарной теплопроводности для цилиндра включает лишь простые алгебраические выражения, исключая специальные функции (Бесселя, Неймана, Ханкеля), которые имеют место в классических решениях.

Ключевые слова: задача теплопроводности; цилиндр; метод разделения переменных; краевая задача Штурма – Лиувилля; тригонометрические координатные функции; дополнительные граничные условия; собственные функции; собственные числа; интегральный метод теплового баланса.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Для цитирования: Котова Е.В., Клеблеев Р.М., Кудинов В.А. Об одном методе определения собственных чисел в задачах теплопроводности для цилиндра // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С. 71-82. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-71-82.

METHOD FOR DETERMINING EIGEN NUMBERS IN HEAT CONDUCTION PROBLEMS FOR A CYLINDER

E.V. Kotova¹, R.M. Klebleev¹, V.A. Kudinov¹

¹Samara State Technical University, Samara, Russia
totig@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Due to the difficulties of finding eigenvalues and proper functions for bodies with axial (cylinder) and central (ball) symmetries defined in classical methods from the edge Sturm-Liouville problems, including Bessel equations whose exact analytical solutions are not obtained (known only numerical solutions, described by approximation formulas), there is a need to develop analytical methods of their solution. *THE PURPOSE.* Using orthogonal methods of weighted residuals, an approximate analytical method for determining eigenfunctions and eigenvalues in boundary value problems with axial and central symmetry (cylinder, ball) has been developed. *METHODS.* The method is based on the use of orthogonal systems of coordinate functions and additional boundary conditions. Latter are in such a form that their fulfillment by the desired solution is equivalent to the fulfillment of the differential equation of the boundary value problem at the boundary points of the region, leading to its fulfillment inside the considered region. Moreover, the accuracy of the equation depends on the number of approximations, which, in turn, depends on the number of additional boundary conditions used. Using the orthogonality property of trigonometric coordinate functions included in a series representing eigenfunctions makes it possible to increase the accuracy of the fulfillment of the differential equation of the Sturm-Liouville boundary value problem and the accuracy of determining the eigenvalues. To satisfy the initial condition, its residual is compiled and the condition of its orthogonality to all coordinate functions is required. The orthogonality of trigonometric systems of coordinate functions with respect to the unknown constants of integration leads to a system of algebraic linear equations, the number of which is equal to the number of approximations. As a result, the fulfillment of the initial condition is simplified and the accuracy of its fulfillment is increased. *RESULTS.* The advantage of the method is that the resulting solution contains only simple algebraic expressions, excluding special functions (Bessel function, Legendre function, gamma function). *CONCLUSION.* Thus, bypassing direct integration over a spatial variable, the use of additional boundary conditions makes it possible to find a solution of any complexity of the equations of the Sturm-Liouville boundary value problem, which reduces to the definition of simple integrals.

Keywords: heat conduction problem; cylinder; method of separation of variables; Sturm-Liouville boundary value problem; trigonometric coordinate functions; additional boundary conditions; eigenfunctions; eigen numbers.

Acknowledgments: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSSE-2023-0003) as part of the state task of the Samara State Technical University.

For citation: Kotova E.V, Klebleev R.M, Kudinov V.A. Method for determining eigen numbers in heat conduction problems for a cylinder *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):71-82. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-71-82.

Введение (Introduction)

Классические аналитические методы и методы интегральных преобразований в задачах теплопроводности для тел с центральной и осевой симметрией приводят к бесконечным рядам с функциями Бесселя. Их неудобство в том, что решения имеют вид тройного ряда, собственные числа которого не могут быть представлены точной общей формулой [1-8]. Как следует из указанных работ, собственные функции, получаемые из решения краевых задач Штурма – Лиувилля для тел с центральной осевой симметрией, включают функции Бесселя, представляют бесконечные ряды. Следовательно, каждое частное решение, представляющее одну собственную функцию, содержащее лишь одно

собственное число, представляет бесконечный ряд. Составление суммы частных решений, необходимой для выполнения начального условия краевой задачи, приводит к решению в виде двойного ряда с неизменными константами интегрирования. Это решение удовлетворяет дифференциальному уравнению и граничным условиям задачи, но не удовлетворяет начальному условию. После определения из этого условия констант интегрирования получаемое окончательное решение принимает уже вид тройного ряда, один из которых содержится в знаменателе формулы, определяющей константы интегрирования [1, 3, 4]. Следует также отметить, что собственные функции, каждая из которых представлена в виде ряда, обладают свойством ортогональности с весом [4], что существенно усложняет выполнение начального условия, связанного с составлением его невязки и выполнением требования ее ортогональности ко всем собственным функциям. Представление решения краевой задачи Штурма – Лиувилля в виде ряда из тригонометрических функций позволяет существенно упростить выполнение начального условия и окончательный вид получаемого решения ввиду того, что свойством ортогональности обладают как собственные функции, составленные из тригонометрического ряда, так и непосредственно тригонометрические функции. В связи с чем, при выполнении начального условия достаточно потребовать выполнения ортогональности его невязки ко всем тригонометрическим (а не собственным) функциям. Классические аналитические методы для задач с центральной и осевой симметрией оказываются малоэффективными особенно в случаях, когда требуется получать решение для малых и сверхмалых значений времени. Поэтому возникает необходимость в разработке эффективных приближенных методов, к которым относятся методы Л.В. Канторовича, Галеркина, интегральный метод теплового баланса [9-23]. Они более универсальны, по сравнению с точными. Однако, при их применении возникают проблемы недостаточной точности получаемых решений. Причина связана с плохой обусловленностью матриц систем алгебраических уравнений. Например, метод Канторовича приводит к системам обыкновенных уравнений, которые сводятся к степенным алгебраическим уравнениям. Получаемые из их решения собственные числа не описываются общей формулой. Классические методы, используемые совместно с приближенными, приводят к решениям, исключаяющим функции Бесселя. Однако, при большом числе приближений, решение оказывается плохо сходящимся ввиду низкой точности определения собственных чисел, определяемых из решения степенных алгебраических уравнений [7, 8].

Цель исследования заключается в получении решения краевой задачи Штурма – Лиувилля для тел с центральной и осевой симметрией на основе использования ортогональных систем тригонометрических координатных функций и дополнительных граничных условий [10-15, 17, 18].

Научная значимость данной работы в том, что получаемое решение не включает специальные функции (Бесселя, Неймана, Ханкеля), содержащиеся в классических аналитических решениях, что имеет существенное практическое значение, ввиду неудобства использования специальных функций, которые не описываются точными аналитическими формулами. Их использование, даже при наличии современных вычислительных средств, затруднительно и особенно, в случае, когда требуется применение большого числа приближений, что необходимо при получении решений для малых и сверхмалых значений времени. Использование тригонометрических координатных функций позволяет снять данные ограничения, а также упростить процесс получения аналитического решения.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что такой подход позволяет выполнить исходное дифференциальное уравнение в центре симметрии, минуя его непосредственное интегрирование по пространственной переменной, ограничиваясь лишь выполнением осредненного уравнения краевой задачи Штурма – Лиувилля.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Используемый обычно интегральный метод решения краевой задачи Штурма – Лиувилля, характеризуясь универсальностью, имеет низкую точность, что связано с трудностью увеличения числа приближений, вследствие отсутствия условий для определения коэффициентов решения. В работах [10-17] с целью повышения точности

используются ДГУ. Следует отметить, что их применение не изменяет математическую постановку задачи и является лишь средством для упрощения получения решения. ДГУ позволяют выполнить уравнение на границах, что приводит к его выполнению и внутри области [9, 10]. Ниже будет рассмотрена методика определения собственных чисел, позволяющая в достаточно простом виде получать решения в форме бесконечного ряда, содержащего только алгебраические выражения. Главной особенностью метода является использование ДГУ, что приводит к высокой точности собственных чисел.

Результаты (Results)

Найдем решение следующей задачи

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$(\tau > 0; 0 < r < R);$$

$$T(r, 0) = T_0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (3)$$

$$T(R, \tau) = T_{\text{ст}}, \quad (4)$$

$$T(0, \tau) \neq \infty. \quad (5)$$

где T , r , τ – температура, координата, время; a – температуропроводность; T_0 – начальная температура; $T_{\text{ст}}$ – температура стенки; R – радиус цилиндра.

Условие (5) означает, что температура в центре цилиндра в течение всего времени процесса теплообмена должна быть конечной и находиться в пределах $T_0 < T < T_{\text{ст}}$, принимая в начальный момент времени ($\tau = 0$) значение $T = T_0$ и приближаясь к величине $T \rightarrow T_{\text{ст}}$ при $\tau \rightarrow \infty$.

Обозначим: $\Theta = \frac{T - T_{\text{ст}}}{T_0 - T_{\text{ст}}}$ – безразмерная температура; $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$ – число

Фурье; $\rho = \frac{r}{R}$ – безразмерная радиальная координата.

Задача (1) – (5) принимает вид

$$\frac{\partial \Theta(\rho, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta(\rho, Fo)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Theta(\rho, Fo)}{\partial \rho}; \quad (6)$$

$$(Fo > 0; 0 \leq \Theta \leq 1; 0 < \rho < 1);$$

$$\Theta(\rho, 0) = 1; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, Fo)}{\partial \rho} = 0; \quad (8)$$

$$\Theta(1, Fo) = 0; \quad (9)$$

$$\Theta(0, Fo) /_{Fo \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (10)$$

Примем решение задачи в виде

$$\Theta(\rho, Fo) = \phi(Fo)\Psi(\rho), \quad (11)$$

где $\phi(Fo)$; $\Psi(\rho)$ – неизвестные функции.

Подставив (11) в (6), имеем

$$\frac{d\phi(Fo)}{dFo} + \mu\phi(Fo) = 0; \quad (12)$$

$$\frac{d^2\Psi(\rho)}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\Psi(\rho)}{d\rho} + \mu\Psi(\rho) = 0, \quad (13)$$

где μ – константа.

Интеграл уравнения (12) будет

$$\phi(F_0) = A \exp(-\mu F_0) , \quad (14)$$

где A – постоянная.

Граничные условия для уравнения (13) имеют вид

$$d\Psi(0)/d\rho = 0 ; \quad (15)$$

$$\Psi(1) = 0 . \quad (16)$$

Решение задачи Штурма – Лиувилля (13), (15), (16) будем искать в виде

$$\Psi(\rho) = \sum_{k=1}^n a_k N_k(\rho) , \quad (17)$$

где a_k – постоянные, $N_k(\rho) = \cos(z\rho/2)$, ($z = 2k-1$; $k = \overline{1, n}$) – координатные функции.

Постоянные a_k находятся из ДГУ, выполнение которых в точке $\rho = 0$ (центр симметрии) эквивалентно выполнению в этой точке уравнения (13). Как показывают расчеты, увеличение числа приближений (числа n членов ряда) приводит к увеличению точности определения собственных чисел μ_i . Преимущество данного метода состоит в возможности получения решений для любых дифференциальных уравнений краевой задачи Штурма – Лиувилля (пластина, цилиндр, шар и проч.). Найденные таким путем решения не включают специальные функции и состоят лишь из тригонометрических координатных функций.

Очевидно, что соотношение (17) удовлетворяет условиям (15), (16). Для нахождения неизвестных a_k , ($k = \overline{1, n}$) используются ДГУ. Например, при трех членах ряда (17) следует определить три ДГУ. Первое из них согласно (15) будет

$$\Psi(0) = 1 . \quad (18)$$

Для определения следующих ДГУ запишем дифференциальное уравнение (13) применительно к точке $\rho = 0$

$$\frac{d^2\Psi(0)}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\Psi(0)}{d\rho} + \mu\Psi(0) = 0 . \quad (19)$$

Раскрывая неопределённость во втором слагаемом (19), с учётом (18) получаем ДГУ вида

$$\frac{d^2\Psi(0)}{d\rho^2} = -\frac{\mu}{2} . \quad (20)$$

Дифференцируя (13), получаем

$$\frac{d^3\Psi(\rho)}{d\rho^3} + \frac{1}{\rho} \frac{d^2\Psi(\rho)}{d\rho^2} - \frac{1}{\rho^2} \frac{d\Psi(\rho)}{d\rho} + \mu \frac{d\Psi(\rho)}{d\rho} = 0 . \quad (21)$$

Соотношение (21) для точки $\rho = 0$ в результате раскрытия неопределённостей приводится к следующему ДГУ

$$\frac{d^3\Psi(0)}{d\rho^3} = 0 . \quad (22)$$

Очевидно, что соотношение (17) удовлетворяет ДГУ (22).

Для получения следующего ДГУ продифференцируем уравнение (13) дважды по ρ

$$\frac{d^4\Psi(\rho)}{d\rho^4} + \frac{1}{\rho} \frac{d^3\Psi(\rho)}{d\rho^3} - \left(\frac{2}{\rho^2} - \mu \right) \frac{d^2\Psi(\rho)}{d\rho^2} + \frac{2}{\rho^3} \frac{d\Psi(\rho)}{d\rho} = 0 . \quad (23)$$

Соотношение (23) применительно к точке $\rho = 0$ содержит неопределённости, после раскрытия которых, учитывая (22), оно принимает вид

$$\frac{4}{3} \frac{d^4\Psi(0)}{d\rho^4} + \mu \frac{d^2\Psi(0)}{d\rho^2} = 0 . \quad (24)$$

Соотношение (24) с учётом (20) приводится к следующему ДГУ

$$\frac{d^4\Psi(0)}{d\rho^4} = \frac{3}{8} \mu^2 . \quad (25)$$

Дифференцируя уравнение (13) трижды по ρ , применительно к точке $\rho = 0$ находим

$$\frac{d^6\Psi(0)}{d\rho^6} = -\frac{5\mu}{6} \frac{d^4\Psi(0)}{d\rho^4}. \quad (26)$$

Учитывая (25), получаем ДГУ вида

$$\frac{d^6\Psi(0)}{d\rho^6} = -\frac{5}{16}\mu^3. \quad (27)$$

Последующие ДГУ, получаемые путём многократного дифференцирования уравнения (13), с использованием предыдущего ДГУ применительно к точке $\rho = 0$ принимают вид

$$\begin{aligned} \frac{d^8\Psi(0)}{d\rho^8} &= \frac{35\mu^4}{128}, \\ \frac{d^{10}\Psi(0)}{d\rho^{10}} &= -\frac{9\mu}{10} \frac{d^8\Psi(0)}{d\rho^8}, \\ \frac{d^{12}\Psi(0)}{d\rho^{12}} &= -\frac{11\mu}{12} \frac{d^{10}\Psi(0)}{d\rho^{10}}, \\ \frac{d^{14}\Psi(0)}{d\rho^{14}} &= -\frac{13\mu}{14} \frac{d^{12}\Psi(0)}{d\rho^{12}} \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (28)$$

В первом приближении подставим (17) (при трех членах ряда) в (18), (20), (25)

$$\left. \begin{aligned} a_1 + a_2 + a_3 &= 1; \\ a_1 + 9a_2 + 25a_3 &= 2\mu / \pi^2; \\ a_1 + 81a_2 + 625a_3 &= 6\mu^2 / \pi^4. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Из решения системы трех алгебраических уравнений (29) имеем

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{192\pi^4} (6\mu^2 - 68\pi^2\mu + 225\pi^4); \quad a_2 = \frac{1}{128\pi^4} (6\mu^2 - 52\pi^2\mu + 25\pi^4); \\ a_3 &= \frac{1}{384\pi^4} (6\mu^2 - 20\pi^2\mu + 9\pi^4). \end{aligned}$$

Отсюда соотношение (17) будет

$$\begin{aligned} \Psi(\rho) &= \frac{\cos(5\pi\rho/2)(6\mu^2 - 20\pi^2\mu + 9\pi^4)}{384\pi^4} - \\ &- \frac{\cos(3\pi\rho/2)(6\mu^2 - 52\pi^2\mu + 25\pi^4)}{128\pi^4} + \\ &+ \frac{\cos(\pi\rho/2)(6\mu^2 - 68\pi^2\mu + 225\pi^4)}{192\pi^4}. \end{aligned} \quad (30)$$

Следуя интегральному методу теплового баланса, потребуем, чтобы соотношение (30) удовлетворяло осредненному уравнению (13)

$$\int_0^1 \left[\frac{d^2\Psi(\rho)}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\Psi(\rho)}{d\rho} + \mu\Psi(\rho) \right] d\rho = 0. \quad (31)$$

Подставив (30) в (31), находим

$$\begin{aligned} 0,000326776\mu^3 - 0,035286535\mu^2 + \\ + 0,91202758\mu - 4,274576548 = 0. \end{aligned} \quad (32)$$

Из решения уравнения (32) получаем

$$\mu_1 = 6,004; \quad \mu_2 = 30,465; \quad \mu_3 = 71,515. \quad (33)$$

Точные величины собственных чисел [3]

$$\mu_1 = 5,7831; \quad \mu_2 = 30,472; \quad \mu_3 = 74,886.$$

Подставив (14), (30) в (11), имеем

$$\Theta(\rho, Fo) = A \left[\sum_{k=1}^3 a_k \cos \left(\frac{z\pi}{2} \rho \right) \right] e^{-\mu Fo}, \quad (k = 1, 2, 3; \quad z = 2k-1). \quad (34)$$

Соотношение (34) представляет частное решение задачи (7) – (10). Найдём сумму частных решений

$$\Theta(\rho, Fo) = \sum_{i=1}^3 \left\{ A_i \left[\sum_{k=1}^3 a_k \cos \left(\frac{z\pi}{2} \rho \right) \right] e^{-\mu_i Fo} \right\}; \quad (i = k = 1, 2, 3; \quad z = 2k-1). \quad (35)$$

Потребуем выполнения ортогональности невязки начального условия к функциям $\cos(j\pi\rho/2)$, ($j = z = 2k-1$)

$$\int_0^1 \left[\sum_{i=1}^3 \left\{ A_i \left[\sum_{k=1}^3 a_k \cos \left(\frac{z\pi}{2} \rho \right) - 1 \right] \cos \left(\frac{z\pi}{2} \rho \right) \right\} \right] d\rho = 0. \quad (36)$$

Свойство ортогональности косинусов приводит к следующим соотношениям

$$\left. \begin{aligned} \int_0^1 \left[a_1(A_1 + A_2 + A_3) \cos^2 \frac{\pi}{2} \rho - \cos \frac{\pi}{2} \rho \right] d\rho &= 0; \\ \int_0^1 \left[a_2(A_1 + A_2 + A_3) \cos^2 \frac{3\pi}{2} \rho - \cos \frac{3\pi}{2} \rho \right] d\rho &= 0; \\ \int_0^1 \left[a_3(A_1 + A_2 + A_3) \cos^2 \frac{5\pi}{2} \rho - \cos \frac{5\pi}{2} \rho \right] d\rho &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Соотношения (37) относительно A_1, A_2, A_3 представляют систему трех алгебраических уравнений. Её решение:

$$A_1 = 1,5778; \quad A_2 = -1,0547; \quad A_3 = 0,5804. \quad (38)$$

Соотношение (35) (с учетом (38)) является решением задачи (6) – (10) в третьем приближении.

Уточнение собственных чисел связано с выполнением ортогональности невязки уравнения (13) к функции (30)

$$\int_0^1 \left[\frac{d^2 \Psi(\rho)}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\Psi(\rho)}{d\rho} + \mu \Psi(\rho) \right] \Psi(\rho) d\rho = 0. \quad (39)$$

Отсюда имеем

$$\begin{aligned} &1,801 \cdot 10^{-7} \mu^5 - 3,5437 \cdot 10^{-5} \mu^4 + \\ &+ 2,455036 \cdot 10^{-3} \mu^3 - 7,1411182 \cdot 10^{-2} \mu^2 + \\ &+ 0,8386665935 \mu - 2,88359601 = 0. \end{aligned} \quad (40)$$

Уравнение (40) имеет следующие действительные корни:

$$\mu_1 = 5,72108; \quad \mu_2 = 30,39991; \quad \mu_3 = 73,997245. \quad (41)$$

Комплексные корни не используются, так как они не имеют физического смысла.

Обсуждение (Discussions)

Из сравнения (33) и (41), заключаем, что выполнение условия ортогональности приводит к уточнению собственных чисел. В таблице даны собственные числа, найденные с учетом ортогональности, при различном числе приближений (числе членов ряда (17)) (верхняя строка таблицы), а также собственные числа, полученные по методу Л.В. Канторовича [5] при том же числе приближений (нижняя строка таблицы). Анализ представленных в табл. 1 результатов позволяет заключить, что уже в третьем приближении полученные собственные числа отличаются от точных их значений лишь в первом знаке после запятой, причем, начиная с μ_2 они точнее, чем собственные числа, найденные методом Л.В. Канторовича. С увеличением числа приближений собственные числа существенно уточняются. Так, с первого по седьмое собственные числа отличаются от точных лишь в первом знаке. Отметим, что существенное влияние на точность получаемых собственных чисел оказывает свойство ортогональности

тригонометрических функций в отличие от классических методов, в которых свойством ортогональности с весом обладают собственные функции, каждая из которых представляет бесконечный ряд (функцию Бесселя) и включает лишь одно собственное число. В целом, получаемое классическими методами решение представляет бесконечный ряд, составленный из функций Бесселя.

Из рис. 1 следует, что невязка уравнения (6) с увеличением числа Фурье стремится к нулю, а в точке $\xi = 0,1$ при $Fo \geq 0,2$ она практически равна нулю (см. рис. 2)

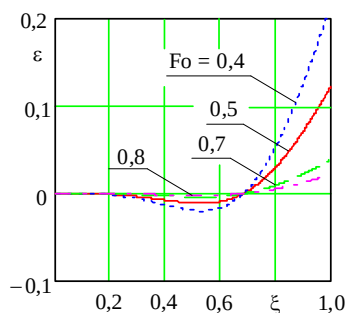


Рис. 1 Невязка уравнения (6) для различных Fo , $n=3$ (авторский результат) Fig. 1 The disjunction of equation (6) for different Fo , $n=3$ (author's result)

*Источник: составлено автором.

*Source: compiled by the author.

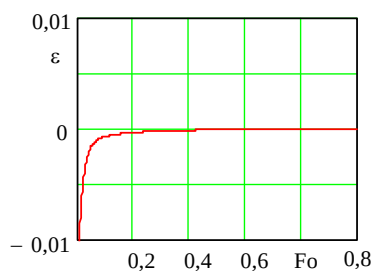


Рис. 2 Невязка уравнения (6) в точке $\xi = 0,1$ при $n=3$ (авторский результат) Fig. 2 Non-alignment of equation (6) at $\xi = 0.1$ at $n=3$ (author's result)

*Источник: составлено автором.

*Source: compiled by the author.

Собственные числа	Число приближений					Точные значения [3]
	3	5	6	11	13	
μ_1	5,72108	5,756	5,76297	5,77543	5,77721	5,7831
	5,78242	5,78318	5,78318	5,78318	5,78318	
μ_2	30,39991	30,385	30,39859	30,43715	30,44417	30,472
	29,41325	30,4671	30,47111	30,47126	30,47126	
μ_3	73,99724	74,948	74,88174	74,83582	74,84123	74,886
	90,80431	73,9182	74,79153	74,887006	74,887006	
μ_4		137,747	138,79871	139,03231	139,01313	139,04
		139,752	135,66314	139,04025	139,04028	
μ_5		214,502	218,45243	222,91741	222,95688	222,93
		465,079	247,29025	222,92609	222,93226	
μ_6			314,58974	325,32256	326,19804	326,5
			871,000764	326,18441	326,558227	
μ_7				445,10378	447,44110	449,93

Продолжение таблицы

				444,62015	449,678179	
μ_8				583,62933	586,77318	593,04
				604,130334	588,803504	
μ_9				741,84139	745,44800	755,89
				963,22622	753,91442	
μ_{10}				919,04774	923,96264	938,479
				2027,01996	1056,58273	
μ_{11}				1113,6031	1121,66795	1140,8060
				7811,71109	1747,1555	
μ_{12}					1337,86177	1362,8721
					3750,56766	
μ_{13}					1571,22049	1604,6774
					14604,6257	

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Заключение (Conclusion)

Разработана методика решения задачи Штурма – Лиувилля для тел с осевой и центральной симметрией, основанная на использовании ДГУ, выполнение которых эквивалентно выполнению уравнения в частных производных в точке $\rho = 0$. Показано, что его выполнение в граничной точке приводит к выполнению и внутри рассматриваемой области. Точность выполнения зависит от числа приближений, определяемых числом используемых ДГУ. Отмечается высокая точность нахождения собственных чисел, связанная как с использованием ДГУ, так и ортогональных систем тригонометрических координатных функций. Теоретическое и практическое значение полученных результатов состоит в том, что получаемые решения, в отличие от классических, не содержат специальных функций Бесселя, включая лишь простые алгебраические выражения в виде произведения тригонометрических координатных функций с экспоненциально стабилизирующимися во времени коэффициентами. Такой подход позволяет существенно упростить как процесс получения решения, так и окончательную формулу для него, что объясняется ортогональностью систем тригонометрических координатных функций, в отличие от функций Бесселя, обладающих свойством ортогональности с весом. В связи с чем существенно упрощается процесс выполнения начального условия, основанный на выполнении условия ортогональности его невязки ко всем тригонометрическим координатным функциям.

Литература

1. Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений. 4-е изд. М.: ЛЕНАНД, 2018. 1072 с.
2. Карташов Э.М., Кудинов И.В., Кудинов В.А. Новые модельные представления нестационарного теплообмена // Известия РАН. Энергетика. 2019. №4, С. 1-8
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 1999. 798 с.
5. Канторович Л.В., Крылов В.И. Приближенные методы высшего анализа. Л.: Физматгиз, 1962. 708 с.
6. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. М.: Высшая школа, 1978. 328 с.
7. Цой П.В. Системные методы расчета краевых задач тепломассопереноса. М: Издательство МЭИ, 2005. 568 с.
8. Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса. М: Энергоиздат, 1984. 418 с.
9. Федоров О.М. Граничный метод решения прикладных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 2000. 219 с.
10. Кудинов И.В., Котова Е.В., Кудинов В.А. Метод получения аналитических решений краевых задач на основе определения дополнительных граничных условий и дополнительных искомых функций // Сибирский журнал Вычислительной математики. Новосибирск. 2019. Т. 22. С. 153 – 165.

11. Кудинов В.А., Кудинов И.В. Методы решения параболических и гиперболических уравнений теплопроводности. М.: ЛИБРОКОМ, 2011. 280 с.
12. Котова Е. В., Кудинов В. А., Стефанюк Е. В., Тарабрина Т. Б. Метод понижения порядка уравнения в частных производных приведением к двум обыкновенным дифференциальным уравнениям // Изв. вузов. Матем. 2018. № 8. С. 33–45.
13. Кудинов В.А., Котова Е.В., Кузнецова А.Э., Кудинов И.В. Ортогональные методы в задачах теплопроводности с переменными физическими свойствами среды // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. №11 – 12. С. 49–59.
14. Кудинов И.В., Еремин А.В., Жуков В.В., Ткачев В.К., Трубицын К.В. Колебания твердых тел, жидкостей и газов с учетом локальной неравновесности. М.: ИНФРА-М, 2022. 162 с
15. Кудинов В.А., Аверин Б.В., Стефанюк Е.В. Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях: учебное пособие / Кудинов В.А., Аверин Б.В., Стефанюк Е.В., Высшая школа: 2008. 390 с.
16. Карташов Э.М., Кудинов В.А., Калашников В.В. Теория тепломассопереноса: решение задач для многослойных конструкций. Учебное пособие. 2-е изд., пер. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2018. 435 с.
17. Кудинов И.В., Еремин А.В., Трубицын К.В., Стефанюк Е.В. Модели термомеханики с конечной и бесконечной скоростью распространения теплоты. Москва. ООО «Перспект». 2020. 224 с.
18. Стефанюк Е.В. Управление потоком лазерного излучения при обработке материалов //Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 5-6. С. 10 – 17.
19. Tkachev V.K. Approximate analytical solution to the stationary two-dimensional heat conduction problem on infinite bar with the source of heat // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 552(1). 2019
20. Sobolev S.L. Effective temperature in nonequilibrium state with heat flux using discrete variable models // Physics Letters A. 2017.Vol. 381. Pp. 2893 – 2897.
21. Sobolev S.L. Discrete space-time model for heat conduction: Application to size dependent thermal conductivity in nano-films. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 108. Part A. P. 933 – 939.
22. Mikheeva G.V. Generalized functions in non-linear thermal conductivity problem for two-layer structure with heat source // J. Phys.: Conf. Ser. 2021, Vol. 1889, № 022025. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/2/022025.
23. Mikheeva G.V., Pashin A.V. Investigation of heat transfer in metal nanofilms irradiated with ultrashort laser pulses: two-temperature model // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2094, № 022023. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/2/022023.
24. O.D. Makinde, T.Iskander, F. Mabood, W.A. Khan, V.S. Tshehla. MHD Couette-Poiseuille flow of variable viscosity nanofluids in a rotating permeable channel with Hall effect // Journal of Molecular Liquids. 2018. Vol. 221. P. 778 – 787.
25. Hasona W.M., El-Shehhipi A.A., Ybrahim M.G. Combined effects of magnetohydrodynamic and temperature dependent viscosity of peristaltic flow of Jeffrey nanofluid through a porous medium: applications to oil refinement // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 126. P.700 – 714.
26. M.E. Gurtin, A.C. Pipkin, A general theory of heat conduction with finite wave speeds // Archive for Rational Mechanics and Analysis. 31(1968)113.

Авторы публикации

Котова Евгения Валериевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика», Самарский государственный технический университет. ORCID 0000-0003-4423-2738. email: larginaevgenya@mail.ru

Клеблеев Руслан Мухтарович – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика», Самарский государственный технический университет. ORCID 0000-0002-6944-8503, email: totig@yandex.ru

Кудинов Василий Александрович – доктор ф.-м. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика», Самарский государственный технический университет. ORCID 0000-0002-3071-5168 totig@yandex.ru.

References

1. Kartashov EM, Kudinov VA. *Analytical methods of the theory of thermal conductivity and its applications*. 4th ed. Moscow: LENAND; 2018.
2. Kartashov EM, Kudinov IV, Kudinov VA. The New Model Ideas Unsteady Heat Trasfer. *PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES. POWER ENGINEERING*. 2019;4: 1–8. DOI: 10.1134/S0002331019040058.
3. Lykov AV. *Teoriia teploprovodnosti*. Moscow, Vyssh. shk.; 1967. (In Russ).
4. Tikhonov AN, Samarskii AA. *Equations of Mathematical Physics*. Courier Corporation, 2013.
5. Kantorovich LV, Krylov VI. *Priblizhennyye metody vysshego analiza*. Moscow: Gosteorizdat; 1952.
6. Belyaev NM, Ryadno AA. *Metody nestatsionarnoi teploprovodnosti*. Moscow: Vyssh. Shk.; 1978.
7. Tsoi PV. *Sistemnye metody rascheta kraevih zadach teplomassoperenosa*. M: Izdatel'stvo MEI; 2005.
8. Coj PV. *Metody rascheta zadach teplomassoperenosa*. M.: Energoizdat; 1984.
9. Fedorov F. M. *Granichnyi metod resheniya prikladnykh zadach matematicheskoi fiziki*. Novosibirsk, Nauka; 2000.
10. Kudinov I., Kotova E., Kudinov V. A Method for Obtaining Analytical Solutions to Boundary Value Problems by Defining Additional Boundary Conditions and Additional Sought-For Functions. *Numerical Analysis and Applications*. 2019. Vol. 12. № 2. pp. 126–136. DOI: 10.1134/S1995423919020034.
11. Kudinov VA, Kudinov IV, *Metody resheniya parabolicheskikh i giperbolicheskikh uravnenii perenosa tepla massy i impulsa*. M: Knizhnyi dom «Librokom»; 2020.
12. Kotova EV, Kudinov VA, Stefanyuk EV, Tarabrina TB. Method of decreasing the order of a partial differential equation by reducing to two ordinary differential equations. *Russian Mathematics*. 2018; 62(8): 27-37.
13. Kudinov VA, Kotova EV, Kuznetsova AE, Kudinov IV. Orthogonal methods in heatconduction tasks with variable physical environmental conditions. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2012. 11-12: 49-59.
14. Kudinov IV, Eremin AV, Zhukov VV, Tkachev VK, Trubitsyn KV Vibrations of solids, liquids and gases taking into account local disequilibrium. M: INFRA-M. 2022. 169 p.
15. Kudinov VA, Averin BV, Stefanyuk EV. *Teploprovodnost' i termouprugost' v mnogoslojnykh konstrukciyax: Uchebnoe posobie*. Moskva. Vysshaya shkola: 2008. 390 p.
16. Kartashov E.M., Kudinov V.A., Kalashnikov V.V. *Teoriya teplomassoperenosa: reshenie zadach dlya mnogoslojnykh konstrukcij*. Uchebnoe posobie. 2-e izd., per. i dop. M.: Izdatel'stvo Yurajt, 2018. 435 p.
17. Kudinov IV, Eremin AV, Trubitsyn KV, Stefanyuk EV. *Models in thermomechanics with a finite and infinite velocity of heat propagation*. Limited Liability Company Prospekt; 2020.
18. Stefanyuk E.V. Upravlenie potokom lazernogo izlucheniya pri obrabotke materialov. *Izvestiya visshih uchebnykh zavedenii. Problemi energetiki*. 2009. № 5-6. S. 10-17.
19. Tkachev V.K. Approximate analytical solution to the stationary two-dimensional heat conduction problem on infinite bar with the source of heat. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 552(1). 2019.
20. Sobolev S.L. Effective temperature in nonequilibrium state with heat flux using discrete variable models. *Physics Letters A*. 2017. Vol. 381. Pp. 2893 – 2897.
21. Sobolev S.L. Discrete space-time model for heat conduction: Application to size dependent thermal conductivity in nano-films. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 108. Part A. P. 933 – 939.
22. Mikheeva G.V. Generalized functions in non-linear thermal conductivity problem for two-layer structure with heat source. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, Vol. 1889, № 022025. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/2/022025.
23. Mikheeva G.V., Pashin A.V. Investigation of heat transfer in metal nanofilms irradiated with ultrashort laser pulses: two-temperature model. *Journal of Physics: Conference*

Series. 2021. Vol. 2094, № 022023. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/2/022023.

24. Makinde O., Iskander T., Mabood F., et al. MHD Couette-Poiseuille flow of variable viscosity nanofluids in a rotating permeable channel with Hall effect. *Journal of Molecular Liquids*. 2018. Vol. 221. pp. 778 – 787.

25. Hasona W., El-Shehpi A., Ybrahim M. Combined effects of magnetohydrodynamic and temperature dependent viscosity of peristaltic flow of Jeffrey nanofluid through a porous medium: applications to oil refinement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 126. pp.700 – 714.

26. Gurtin M.E., A.C. Pipkin, A general theory of heat conduction with finite wave speeds. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*. 1968. 31 (1968) 113. DOI:10.1007/BF00281373.

Authors of the publication

Eugeneya V. Kotova (Cand. Techn. Sci.) – Samara State Technical University, Dept. of Theoretical Fundamentals of Heat-Engineering and Hydromechanics, Samara, Russia. ORCID 0000-0003-4423-2738. email: larginaevgenya@mail.ru.

Vasily A. Kudinov (Dr. Phys. & Math. Sci.) – Samara State Technical University, Head of Dept., Dept. of Theoretical Fundamentals of Heat-Engineering and Hydromechanics, Samara, Russia. ORCID 0000-0002-6944-8503, email: totig@yandex.ru.

Ruslan M. Klebleev – Samara State Technical University, Dept. of Theoretical Fundamentals of Heat-Engineering and Hydromechanics, Samara, Russia. ORCID 0000-0002-3071-5168 totig@yandex.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки).

Получено 17.07.2023г.

Отредактировано 01.08.2023г.

Принято 07.08.2023г.

ВОДОУГОЛЬНЫЕ СУСПЕНЗИИ: ПРИГОТОВЛЕНИЕ, СВОЙСТВА, ХАРАКТЕРИСТИКИ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

Зенков А.В.¹, Д.В. Гвоздяков Д.В.²

^{1,2}Томский Политехнический Университет, г. Томск, Россия

¹dim2003@tpu.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Представлен обзор современного состояния исследований водоугольных суспензий в России и за рубежом. Водоугольные суспензии являются перспективными альтернативными видами энергетических топлив. Их использование в энергетике позволит вырабатывать тепловую и электрическую энергию. В качестве компонент таких топлив возможно использовать достаточно широкий спектр веществ. Одними из предпочтительных являются отходы различного типа. Анализ современной литературы показал достаточно широкий спектр направлений по изучению многокомпонентных водоугольных суспензий. Проанализировано влияние добавок и компонент водоугольных суспензий на их характеристики и свойства. **ЦЕЛЬ.** Представить информацию о современном состоянии исследований в области технологий приготовления, распыления и сжигания водоугольных топлив, а также о существующих и перспективных добавках к таким суспензиям. **МЕТОДЫ.** Исследование выполнено методом сбора и структурирования информации. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проведен обзор современного состояния исследований в области технологий приготовления, распыления и сжигания водоугольных топлив, а также существующих и перспективных добавок к таким суспензиям. Установлено, что добавки в состав суспензии жидких горючих отходов и биомассы способствует снижению времени задержки зажигания. При этом такие добавки не снижают качественных характеристик распыления многокомпонентных водоугольных суспензий. Ряд компонент позволяют сократить объемы эмиссии в атмосферу продуктов сгорания таких топлив. Проанализировано влияние добавок и компонент водоугольных суспензий на их характеристики и свойства. Показано, что жидкие компоненты способствуют интенсификации процессов зажигания и горения. Также, их введение в состав топлива положительно влияет на реологические свойства суспензий, характеристики их распыления, сжигания и концентрацию вредных выбросов. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Водоугольные суспензии являются перспективными альтернативными видами энергетических топлив. Их использование в энергетике позволит вырабатывать тепловую и электрическую энергию. Введение в состав водоугольных суспензий горючих компонентов позволяет существенно улучшить реологические свойства, что может улучшить характеристики хранения и транспортировки таких топлив. Установленные положительные характеристики и свойства водоугольных суспензионных дают предпосылки для полномасштабного внедрения в промышленную энергетику таких топлив.

Ключевые слова: водоугольное топливо; водоугольная суспензия; приготовление; реологические свойства; распыление; зажигание и горение.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 22-79-00124 (2.0046.РНФ.2022).

Для цитирования: Зенков А.В., Гвоздяков Д.В. Водоугольные суспензии: приготовление, свойства, характеристики (краткий обзор) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С.83-100. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-83-100.

COAL-WATER SUSPENSIONS: PREPARATION, PROPERTIES, CHARACTERISTICS (A BRIEF OVERVIEW)

AV. Zenkov¹, DV. Gvozdyakov²

^{1,2}Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹dim2003@tpu.ru

Abstract: RELEVANCE. A review of the current state of research on coal-water slurries in Russia and abroad is presented. Coal-water slurries are promising alternative types of energy fuels. Their use in the energy sector will allow generating thermal and electrical energy. It is possible to use a fairly wide range of substances as components of such fuels. One of the preferred types are various waste. The analysis of modern literature has shown a fairly wide range of directions for the study of multicomponent coal-water slurries. THE PURPOSE. To provide information on the current state of research in the field of technologies for the preparation, spraying and combustion of coal-water fuels, as well as on existing and promising additives to such slurries. METHODS. The study was carried out by the method of collecting and structuring information. RESULTS. The review of the current state of research in the field of technologies for the preparation, spraying and combustion of coal-water fuels, as well as existing and promising additives to such slurries, was carried out. It was found that additives of liquid combustible waste and biomass contribute to reducing the ignition delay time. At the same time, such additives do not reduce the quality characteristics of spraying multicomponent coal-water slurries. A number of components reduces the amount of emissions of combustion products of such fuels into the atmosphere. The influence of additives and components of coal-water slurries on their characteristics and properties was analyzed. It was shown that liquid components contribute to the intensification of ignition and combustion processes. In addition, their introduction into the fuel composition has a positive effect on the rheological properties of slurries, the characteristics of their spraying, combustion and the concentration of harmful emissions. CONCLUSION. Coal-water slurries are promising alternative types of energy fuels. The introduction of combustible components into the composition of coal-water slurries can significantly improve the rheological properties, which can improve the storage and transportation characteristics of such fuels. The established positive characteristics and properties of coal-water slurries provide prerequisites for the full-scale introduction of such fuels into industrial power engineering.

Keywords: coal-water fuel, coal-water suspension, preparation, rheological properties, sputtering, ignition and combustion.

Acknowledgements: the work was carried out with the support of the Russian Science Foundation, project 22-79-00124 (2.0046.RNF.2022).

For citation: Zenkov A.V., Gvozdyakov D.V. Coal-water suspensions: preparation, properties, characteristics (a brief overview). *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):83-100. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-83-100.

Введение (Introduction)

Водоугольные суспензии (ВУС) как новый, альтернативный вид котельного топлива стали активно исследоваться во второй половине XX века. Основной причиной этого стал нефтяной кризис. Рост стоимости на энергоносители заставил многие страны, не имеющие собственных месторождений нефти, искать альтернативу углеводородному топливу – мазуту. Одним из важных преимуществ ВУС большинство исследователей называют достаточно широкий спектр компонент и возможность замены традиционных котельных топлив. При этом они являются сложными многокомпонентными веществами, свойства и характеристики которых существенно зависят от типа компонент, их количества, способа приготовления.

К настоящему времени проведено достаточно большое количество теоретических и экспериментальных исследований ВУС, например [1-8].

Авторам [3] рассмотрен механизм сгорания угольных частиц и водоугольных капель при подаче распыленного водоугольного топлива в адиабатическую вихревую камеру сгорания. Представлены данные численного моделирования процесса сжигания в камере с помощью программного модуля *ANSYS FLUENT*. Показано, что результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными. Разработана методика теплового расчета топki при сжигании водоугольного топлива [4]. В [7] приведены результаты экспериментальных исследований процесса воспламенения жидкостных композитных топлив на основе воды, угля и твердых продуктов пиролиза древесины. Исследователями [8] приведены результаты расчёта рассеивания выбросов тепловой электростанции, работающей на водоугольном топливе. Показано влияние специфики сгорания водоугольной смеси на состав выброса газов сжигания.

Их изучают при помощи математического моделирования, лабораторных исследований, на опытно-промышленных установках в производственных масштабах. По их результатам установлены как преимущества, так и недостатки ВУС, влияние компонент и их количества на свойства и характеристики топлива. Немаловажным являются исследования ВУС с точки зрения экономики. Современные требования к окружающей среде также внесли существенный вклад в широкий спектр изучаемых направлений таких топлив. В результате этих многочисленных исследований учеными созданы несколько типов ВУС. Например, органоугольное топливо (ОВУТ) [9-10], биотопливо (БиоВУТ) [11-12], экологичное угольное топливо (ЭкоВУТ) [13-14], спиртоугольное топливо (СВУТ) [15-16]. Основным отличием этих топлив является их компонентный состав. Именно наличие тех или иных компонент оказывает влияние на энергетические, экологические и экономические показатели угольных суспензий.

В современной литературе результаты исследований свойств и характеристик ВУС можно разделить на следующие направления: приготовление, реологические свойства, распыление, зажигание и горение, экологические показатели. В качестве основной компоненты ВУС используют уголь [17] или отходы угольных обогатительных комбинатов – фильтр-кек [18]. В качестве основной жидкой компоненты применяется вода. С целью улучшения седиментационных свойств используют различные поверхностно-активные вещества (ПАВ) [19]. Спектр добавок в ВУС (третьих и четвертых компонент) при этом достаточно широк. Их выбор, как правило, направлен на улучшение тех или иных свойств суспензии, снижение выбросов в атмосферу антропогенных веществ, утилизацию различных видов отходов.

Цель исследования: представить наиболее цитируемую информацию о современном состоянии исследований в области технологий приготовления, распыления и сжигания угольных топлив, а также о существующих и перспективных добавках к таким суспензиям.

Научная значимость исследования заключается в сборе и структурировании существующих данных о технологиях приготовления, распыления и сжигания угольных топлив, а также о существующих и перспективных добавках к таким суспензиям.

Практическая значимость исследования: результаты исследований будут полезны ученым, конструкторам, проектировщикам, занимающихся исследованиями технологий угольных топлив (от приготовления до сжигания), созданием устройств распыления таких топлив и камер сгорания для них, а также для получения представления о современном состоянии разработок в области угольных топлив.

Приготовление угольных суспензий.

Помол угля является важным этапом в процессе приготовления ВУС [20]. Измельчение угля может осуществляться двумя способами: сухой или мокрый помол. Отличительной особенностью этих способов является то, что при мокром помоле на шаровых барабанных мельницах обеспечивается получение более стабильных суспензий, что очень важно при в случаях хранения и транспортировки топлива, с хорошими реологическими показателями. При этом, такие ВУС имеют неплохие характеристики горения в отличие суспензий, приготовленных из угольной пыли сухого помола на шаровых барабанных мельницах и последующего смешения с жидкими компонентами. Процесс приготовления ВУС из угля сухого помола показан на рис. 1. Измельченный уголь, компоненты, и обычная вода помещаются в смешивающий барабан с предварительно загруженными мелющими телами (керамические или металлические шары). После этого в течение некоторого времени осуществляется перемешивание до однородного состояния суспензии [21].

Приготовление ВУС на роторных гидродинамических генераторах кавитации (рис. 2) обеспечивает сразу несколько дополнительных механизмов измельчения: ударный, трение и кавитация. Совокупность таких воздействий на ВУС обеспечивает за счет соударения твердых частиц угля об элементы камеры кавитатора, больших скоростей и схлопывания паровых пузырьков получить достаточно гомогенизированную и стабильную суспензию [22, 23].



Рис. 1. Технология приготовления ВУС при сухом помоле угля

*Источник: составлено авторами

Technology of CWS preparation with dry grinding of coal

Source: compiled by the authors

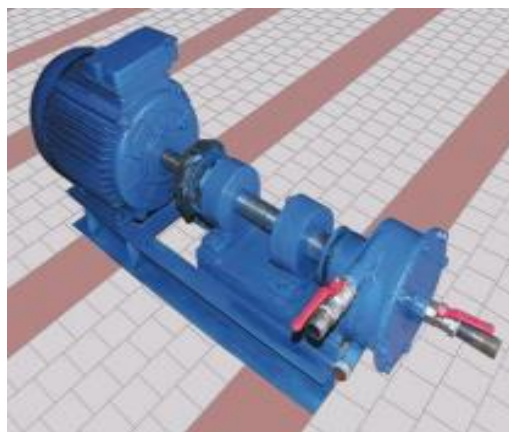


Рис. 2. Роторный гидродинамический генератор кавитации

*Источник: [21]

Rotary hydrodynamic cavitation generator

**Source: compiled [by 21]*

Для приготовления ВУС также применяется способ мокрого помола в дезинтеграторе [24]. Данный способ основан на свободном соударении частиц угля с ударными элементами корзин-роторов. При этом жидкие компоненты суспензии в соответствии с эффектом П.А. Ребиндера существенно способствуют разрушению частиц угля. Преимуществом данного способа получения ВУС являются малые энергетические и временные затраты на приготовление топлива.

Реологические свойства водоугольных суспензий

Исследованиям реологических свойств ВУС посвящено достаточно большое количество работ, например [25-28]. Необходимость изучения обусловлена тем, что такие показатели суспензии как стабильность и вязкость определяют возможность и эффективность хранения, транспортировки и распыления ВУС. Немаловажным фактором, определяющим способность суспензии к длительному хранению, является расслоение топлива [25]. Концентрации частиц угля, их гранулометрическое распределение, в зависимости от марки угля также обуславливают актуальность исследований реологических свойств. Как правило, одним из способов снижения гидравлического сопротивления при перекачивании ВУС по топливопроводу является соотношение долей мелкой и крупной фракций. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что рост концентрации дисперсной фазы приводит к возрастанию вязкости и седиментационной устойчивости ВУС. Предельное значение концентрации (масс.) твердой компоненты суспензии на основе антрацита составляет $65 \div 66 \%$ [26].

Авторами [27] на основе результатов реологических характеристик ВУС установлено, что достижение наиболее высоких концентраций угля в суспензиях возможно в случае антрацита, но при этом системы являются наименее стабильными. При этом оптимальные концентрации пластификатора (лигносульфоната натрия), при которых наблюдаются наименьшие значения вязкости ВУС - $1,48 \text{ Па}\cdot\text{с}$, составляют $1,0\text{-}1,5 \text{ г/100 г}$ угля. Снижение вязкости водоугольных суспензий исследовано в [28]. Добавки углеродных нанотрубок и обезвоженного карбонатного шлама способствуют улучшению реологических свойств ВУС (рис. 3).

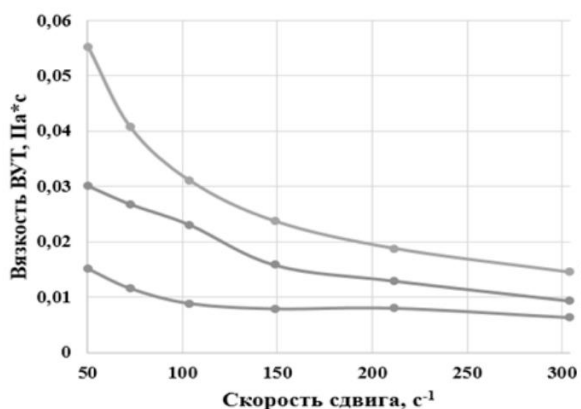


Рис. 3. Динамическая вязкость суспензий: (1), ВУТ с добавлением 0,5 мас.% карбонатного шлама (2), ВУТ с добавлением 0,0125 мас.% УНТ, диспергированных в 100 мМ растворе ДСН (3), от скорости сдвига при температуре 65°C
*Источник: [28]

Dynamic viscosity of slurries: (1), CWF with the addition of 0.5 wt.% carbonate sludge (2), CWF with the addition of 0.0125 wt.% of CNTs dispersed in 100 mM DSN solution (3) depending on the shear rate at a temperature of 65 °C
*Source: compiled by [28]

Авторами [29] установлено, что добавление поверхностно-активных веществ (ПАВ) в состав ВУТ возможно добиться достаточно низких значений вязкости топлива при массовом содержании измельченного угля от 60 до 70% (рис. 4). В работе [30] представлены результаты экспериментальных исследований морфологии ВУТ при помощи электронной микроскопии. Установлено, что одиночные частицы угля в виде взвеси хаотично распределены в объеме, а некоторые их группы образуют отдельные агломераты. Коллективом ученых [31] проанализировано влияние на изменение свойств водоугольного топлива воздействие предварительной СВЧ-обработки исходного угля (рис. 5). Показано, что такой подход позволяет снизить вязкость получаемой суспензии и, соответственно, сократить расходы при ее транспортировке по трубопроводам.

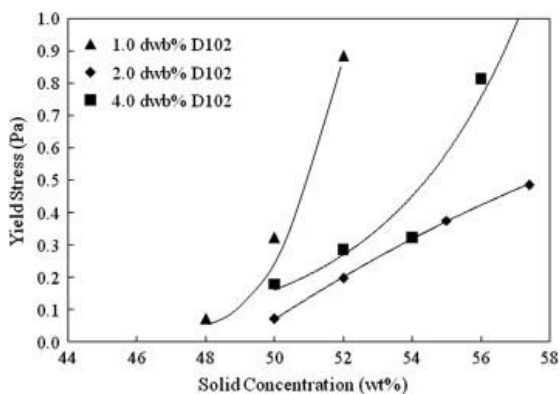


Рис. 4. Изменение текучести ВУС в зависимости от концентрации ПАВ в диапазоне от 1,0 до 4,0 % (масс.)

*Источник: [30]

The change in the fluidity of CWS depending on the concentration of surfactants in the range from 1.0 to 4.0% (wt.)

*Source: compiled by [30]

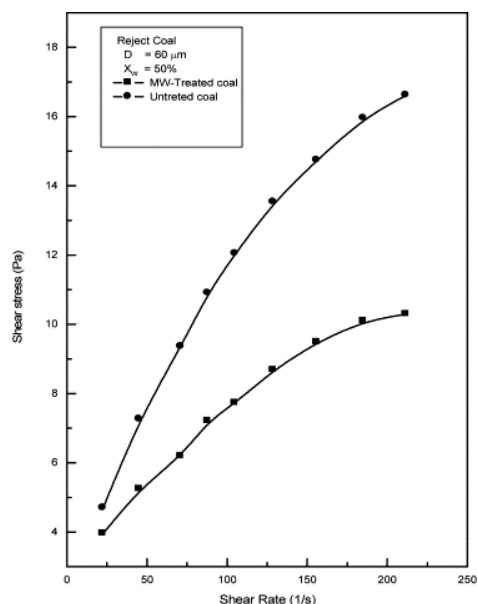


Рис. 5. Влияние СВЧ обработки на изменение динамической вязкости суспензии

*Источник: [31]

The effect of microwave treatment on the change in the dynamic viscosity of the slurry

*Source: compiled by [31]

Также, для приготовления ВУТ помимо поверхностно-активных веществ предлагается применять различного рода растворители органического происхождения [32]. Авторами [32] доказано, что такой подход позволяет разрушать водородные связи и увеличивать площадь поверхности активации в процессе сжигания ВУТ.

Результаты экспериментальных исследований вязкости и стабильности топливных суспензий представлены в [33]. Исследовано 30 композиций, полученных из угольных шламов, лигнита и каменного угля. В качестве добавок использовались древесные опилки, отработанное турбинное масло, крахмал, неонол, ксантановая и гуаровая камеди. Вязкость топливных композиций варьировалась от 106,89 до 2030,17 мПа·с при скорости сдвига 100 с-1. Добавление до 10 % отработанного масла или древесных опилок повышало вязкость шлама в среднем на 50–70 %. Когда доли нефти и биомассы превышали 5% и 10% соответственно, пульпа теряла текучесть. Установлено, что массовая доля твердой части в топливах на основе угольных шламов должна быть ограничена величиной $\approx 55\%$, если планируется распыление или трубопроводный транспорт. Многофакторную оценку эффективности топливной смеси проводили с использованием шести различных вариантов распределения значимости (весового коэффициента) рассматриваемых факторов. Установлено, что наиболее предпочтительными являются топливные смеси на основе угольных шламов (т.е. отходов углепереработки) и воды. Показано, что вязкость многих топливных смесей на основе угольных шламов соответствует условиям промышленного применения топливных суспензий и жидкостей.

Материалы и Методы (Materials and methods)

Устройства распыления водоугольных суспензий

Распыление водоугольной суспензии новой пневматической форсункой и его сжигание представлено в [34]. Сопло форсунки состоит из цилиндрического корпуса (внутри которого расположены газовая камера с кольцевым коническим отверстием и каналом с диффузорным соплом для подачи топлива) и соединительной арматуры (рис. 6). Диаметр корпуса 80 мм, длина корпуса 50 мм, диаметр канала 8 мм, ширина кольцевого зазора 1 мм, диаметр выходного отверстия диффузора 23, угол раскрытия диффузора 60° .

Влияние геометрии форсунки на распыление водоугольной суспензии исследовано в [35]. Для исследования разработаны три комплекта горелок с различной конструкцией (рис. 7). Конкретные конструктивные параметры трех комплектов горелок показаны в фале с дополнительной информацией 1. Среди них d_1 , d_2 , d_3 - внутренний диаметр центрального канала, внутренний диаметр и наружный диаметр кольцевого канала, A_1 , A_2 - площади центрального канала и кольцевого канала соответственно. Каждая горелка оборудована циркуляционной системой водяного охлаждения.

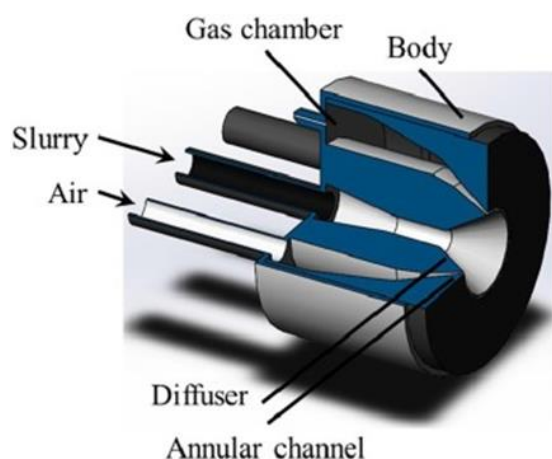
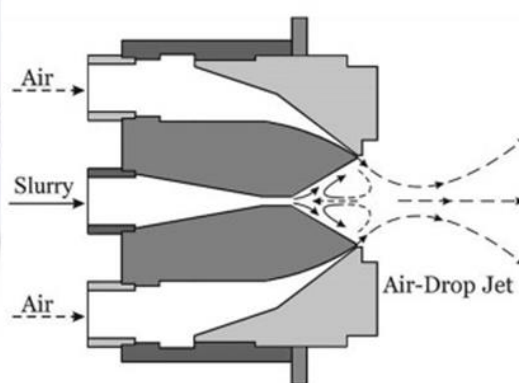


Рис. 6. Форсунка для распыления водоугольного топлива [34]



Nozzle for spraying coal-water fuel [34]

*Источник: [34]

*Source: compiled by [34]

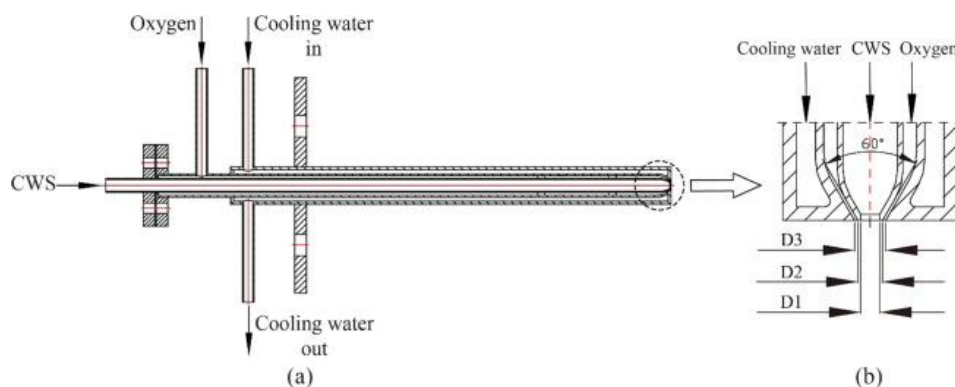


Рис. 7. Устройство распыления ВУС [35]

CWS spraying device [35]

*Источник: [35]

*Source: compiled by [35]

Форсунка с внутренним смешением жидкости и распыляющего агента [36] позволяет формировать после распыления мелкодисперсную струю. Устройство имеет камеру смешения ВУС и распыляющего агента. Данный тип устройства распыления ВУС имеет внутреннюю камеру смешения топлива и воздуха. Недостатком данного типа форсунки является высокая вероятность засорения именно камеры смешения. В форсунках такого типа необходимо очень внимательно контролировать давление топлива и распыляющего агента с целью исключить задувание ВУС распыляющим агентом.

Результаты экспериментальных исследований износостойких керамических, твердосплавных и металлических форсунок водоугольно-шламовых котлов представлены в [37]. Форсунка (рис. 8) имеет внутренний диаметр 5,0 мм, внешний диаметр 12,0 мм и длину 10,0 мм. Конструкция используемой форсунки достаточно проста. Основной целью исследований являлась изучение эрозийного износа канала форсунки и его сопла. Топливный канал форсунок данных конструкций также с высокой долей вероятности подвержен засорению крупными частицами угля или агломератами ВУС. Усугубляется это может еще тем, что в процессе эксплуатации таких форсунок возможны сколы материала, из которого изготовлена форсунка.

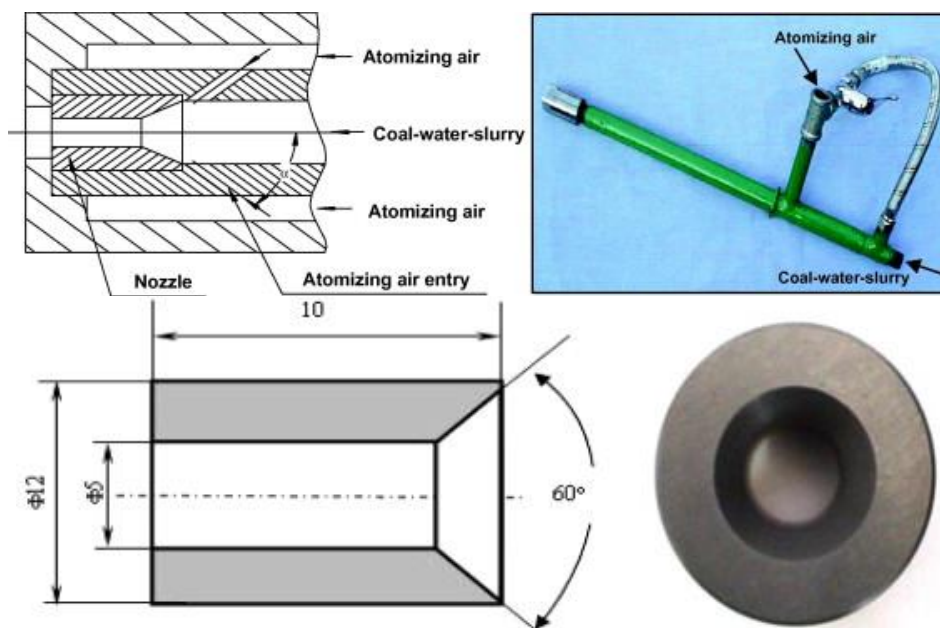


Рис. 8. Форсунка для распыления водоугольно-шламовых топлив [37]

Nozzle for spraying coal-water-slurry fuels [37]

*Источник: [37]

*Source: compiled by [37]

Характеристики распыления суббитуминозного угля и водной суспензии нефтяного кокса из двухжидкостного вихревого распылителя с внутренним смешиванием исследованы

в [38]. Используемая форсунка имеет три входных отверстия для завихрения воздуха на основном жидкостном сердечнике, расположенном в смесительной камере внутри сопла. Затем двухфазный поток сталкивается с ударной пластиной, которая способствует дальнейшему перемешиванию. После чего, двухфазная смесь выходит из сопла через кольцевой канал, образованный штифтом. Данный тип устройства распыления ВУС имеет внутреннюю камеру смешения топлива и воздуха.

Распыление водоугольных суспензий (Spraying of coal-water slurries)

Распыление и разбрызгивание ВУС как правило изучается экспериментально, например [39-43]. Результаты исследований различных типов форсунок представлено в [39]. Установлено, что снижение вязкости ВУТ существенно улучшает качество распыления. Это способствует гомогенизации струи после распыления, например, форсункой с шипучим распылителем [40]. Следует отметить, что такой подход позволяет разделять жидкую и твердую компоненту ВУТ после распыления, что положительно скажется на характеристиках зажигания топлива. Эффективность распыления ВУТ двухструйной форсунки представлена в [41] (рис. 9). Установлено, что траектории капель топлива малых размеров при таком распылении ориентированы под небольшим углом относительно продольной оси распыления. Авторами [42] установлено, что при введении в состав водоугольных топлив достаточно типичных и доступных спиртов позволяет увеличить число капель малых размеров на 6-13% в сравнении с двухкомпонентным ВУТ (рис. 10).

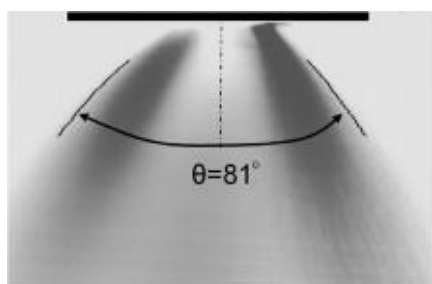


Рис. 9. Распыление ВУС двухструйной форсункой [41]

Spraying of CWS with a two-jet nozzle [41]

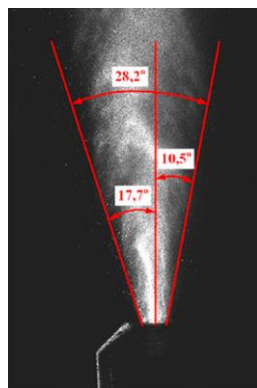


Рис. 10. Распыление ВУС форсункой с внутренним смешением [42]

Spraying of CWS with an internal mixing nozzle [42]

*Источник: [41]

*Source: compiled by [41]

*Источник: [42]

*Source: compiled by [42]

В [43] проанализировано влияние параметров (расход, вязкость и плотность жидкости) на характеристики распыления. В качестве испытательных жидкостей использовались силиконовые масла разной вязкости. Установлено, что при высоких соотношениях газа к топливу, скорость частиц на центральной оси снижается, а скорость в радиальных положениях выше. Скорость также увеличивается по мере дальнейшего увеличения радиального расстояния от оси. При этом распределение скоростей не меняется после того, как радиальное расстояние достигает определенного предела. Этот предел уменьшается с увеличением осевой длины. Повышение вязкости увеличивает инерционную силу жидкой текучей среды, поэтому необходимо увеличить импульс распыляемого газа, чтобы он создавал достаточное напряжение сдвига в текучей среде и улучшал характеристики распыления.

Зажигание и горение водоугольных суспензий

Экспериментальные и численные исследования характеристик зажигания и горения ВУС представлены в [44-49]. Например, в [44] экспериментально установлено, что на характеристики зажигания и горения существенное влияние оказывает конвективный теплообмен. Время зажигания одиночных капель радиусом 0,25-1,5 мм при скорости окислителя возможно сократить на 20-25 секунд. Коллективом ученых [45] исследовано влияние электромагнитной обработки ВУТ на характеристики зажигания и горения. Показано, такая обработка позволяет снизить время задержки зажигания на 7,5%, температура горения при этом возрастает на 5%. Результаты экспериментальных исследований [46] показали возможность эффективного совместного сжигания отходов

нефтепродуктов с водоугольным топливом. Авторами [47] представлены результаты численного моделирования и эксперимента. Установлено, что математическое моделирование с достаточной точностью позволяет выполнять прогностические расчеты зажигания и горения капель ВУТ и при этом учитывать интенсивный нагрев, испарение влаги и термохимические реакции и т.д. Характеристики зажигания водоугольных топлив на основе лигнита и жидких продуктов пиролиза древесных отходов исследованы в [48] (рис. 11).

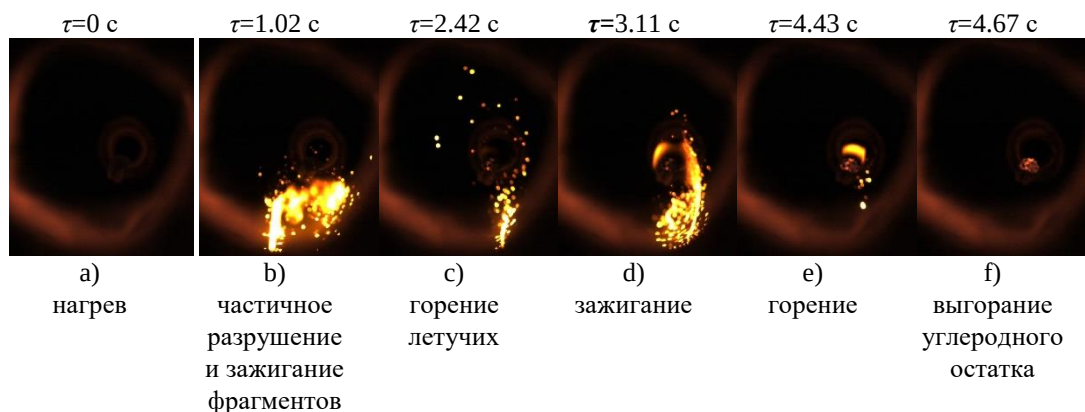


Рис. 11. Зажигание одиночных капель ВУС с добавками пирогенетической жидкости [48]

*Источник: [48]

Ignition of single drops of CWS with pyrogenetic liquid additives [48]

*Source: compiled by [48]

Авторами [48] установлено, что время задержки зажигания одиночной капли суспензии (при температуре окислителя 1273) к увеличивается на 23% в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом при замещении угля жидкими продуктами пиролиза древесных отходов (не более 10%). В случае замещения воды аналогичным по массе количеством третьей компоненты (до 10% по массе) и постоянной концентрации угля время задержки зажигания одиночной капли топлива (при температуре окислителя 1273) снижается на 26%.

Характеристики воспламенения и процессы горения угольного шлама исследованы в [49]. На основе экспериментальных результатов сделаны выводы о некоторых явлениях и закономерностях, которые могут способствовать дальнейшим исследованиям сжигания угольного шлама в котлах с псевдоожиженным слоем и способствовать полной утилизации угольного шлама. Установлено, что задержка воспламенения увеличивается с ростом расхода кислорода в диапазоне 0–30 л/мин. Когда концентрация кислорода достигает 100 %, задержка воспламенения уменьшается по мере увеличения скорости потока. Однако время задержки воспламенения сначала уменьшается, а затем увеличивается по мере того, как скорость потока продолжает увеличиваться, и O_2 % = 15–80 %, когда скорость потока достигает 5 л/мин.

Экологические показатели продуктов сгорания водоугольных суспензий

Экологические характеристики ВУС исследованы представлены в [50-54]. Например, коллективом исследователей [50] экспериментально исследовано влияние компонентного состава продуктов сгорания композитных топлив с различными добавками. Установлено, что количество оксидов серы при сжигании суспензии в составе с биомассой сокращается на 12%. При увеличении температуры в зоне горения на 300 К количество оксидов азота и серы увеличивается в 1,2-2,8 раза. Результаты экспериментальных исследований [51] показали высокую эффективность сжигания ВУТ в атмосфере кислорода. Концентрация оксидов азота в таких условиях снижается на 85%. Экспериментально исследованы [52] экологические и энергетические показатели, характеризующие горение перспективных водоугольных суспензий на основе отходов переработки угля, рапсового масла и воды. Установлено, что наиболее перспективным по экологическим характеристикам является состав на основе 90% отходов переработки угля и 10% рапсового масла. Определен состав, устойчиво подвергающийся интенсивному микровзрывному дроблению. Он основан на 9% отходов переработки угля, 10% воды и 81% рапсового масла. При этом, микровзрывное дробление материнской капли обеспечивает значительное увеличение площади поверхности шлама. Последнее увеличивает тепловыделение в единицу времени из-за выгорания топлива.

Анализ литературы показал, что водоугольные топлива достаточно активно изучаются несколько последних десятилетий. Несмотря на всесторонние исследования и широкий спектр положительных качеств ВУТ, такие топлива особо не внедряются в большой и малой энергетике. В первую очередь это связано с содержанием в них воды (40–60% по массе). В результате чего их теплотворная способность существенно уступает (примерно на 50%) обычному углю. В целом, с учетом отрицательных качеств, основной недостаток водоугольных топлив обусловлен их низкой реакционной способностью в зоне воспламенения (большие времена задержки зажигания – до 30 с). При этом, различного рода добавки к ВУТ и их количество могут существенно снизить времена задержки зажигания, но при этом, после распыления таких топлив будут образовываться достаточно крупные капли (диаметром более 1,5 мм). Одной из причин этого является увеличение вязкости и плотности топлива. В результате чего снова ухудшатся характеристики их зажигания и горения в камерах сгорания.

Антропогенные выбросы от сжигания смесевых топлив на основе угля исследованы в [53]. В данном исследовании экспериментально изучены концентрации наиболее опасных газообразных антропогенных выбросов (CO_2 , SO_2 , NO) от сжигания топлива на основе отходов. Установлены условия, при которых возможно снижение концентрации дымовых газов от сжигания исследуемых составов (замещение угольной части водой, инъекция паров воды, добавка биомассы, подбор температурного диапазона). Воздействие паров воды определяли при их вдувании в зону химической реакции вместе с воздухом и при их естественном образовании путем испарения из пробы топлива. В отличие от биомассы, снижающей выбросы оксидов серы из смесевых топлив за счет механического разбавления смеси, водяной пар, находящийся в зоне гетерогенной реакции, снижает газообразные техногенные выбросы за счет химических реакций и превращения части топливной серы и азота в неактивную форму (нейтральная к окружающей среде).

Влияние растительных добавок на концентрацию оксидов серы и азота в продуктах сгорания водоугольных шламов, содержащих нефтепродукты представлено в [54]. Установлено, что концентрация оксидов серы и азота может быть снижена на 62–87 % и 12–57 % соответственно при использовании малых масс растительных добавок (не более 10 мас. %) и сохранении высокой теплоты сгорания. Однако использование водорослей и соломы в составе навозной жижи может увеличить выбросы HCl , что требует дополнительных мер по борьбе с коррозией. Был сформулирован обобщающий критерий соотношения топливной суспензии и эффективности использования угля, чтобы проиллюстрировать существенные преимущества добавления твердых отходов завода к водоугольным суспензиям, содержащим нефтехимические. Лучшими добавками для снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу признаны солома и отходы подсолнечника (10 мас. %).

Компоненты водоугольных суспензий

В качестве компонент и добавок ВУС используются различные вещества. Как отмечалось выше, введение их в состав суспензий способствуют повышению эффективности сжигания таких топлив. Наиболее широко исследуются различные отходы [55–58], в том числе и производственные [48, 59–62]. Их влияние на процессы хранения (транспортировки), распыления, сжигание и экологические характеристики представлены в таблице 1.

Компоненты ВУС
CWS components

Агрегатное состояние	Тип компоненты	Эффект
Твердое	Отходы лесопереработки [55]	Существенное снижение времени задержки зажигания
	Минеральные примеси (в том числе оксиды металлов) [56]	Теплоемкость ВУС уменьшается с увеличением содержания минеральных добавок
	Фильтр-кек [57]	Сокращение объемов отходов углеобогащения, снижение выбросов оксидов серы в дымовых газах
	Нanomатериалы (углеродный наноматериал, обезвоженный карбонатный шлам) [58]	Улучшение реологических свойств ВУС
Жидкие	Пиролизная жидкость (вода) [48]	Снижение среднего размера капель ВУС после распыления и времен задержки зажигания

	Сточные воды (промышленные) [59]	Утилизация отходов, улучшение реологических свойств ВУС
	Отработанное масло [60]	Снижение времени задержки зажигания
	Рапсовое масло [61]	Интенсификация пламенного горения,
	Пиролизная нефть [62]	Снижение среднего размера капель ВУС после распыления

**Источник: составлено авторами на основе источников литературы, указанных в таблице*

Source: compiled by the authors based on the references listed in the table

Анализ наиболее популярных жидких компонент ВУС показал, что их использование довольно существенно улучшает характеристики суспензионных топлив. При этом следует отметить, что такие жидкие отходы как пиролизные жидкости могут найти широкое применение в качестве компонент ВУС. Одним из источников их получения является термическая переработка отходов лесопиления. Его привлекательность заключается в экологичности процесса и возможности получения полезных продуктов, таких как полукокс, горючий газ и пиролизное масло. Получение последнего сопровождается образованием пирогенетической жидкости ("балластового" компонента продукта), что обусловлено высокой влажностью исходного сырья (древесина). Прямая утилизация (сброс в систему канализации, отвод в почву или на открытый грунт) такой жидкости невозможна. Связано это с содержанием в ней опасных для окружающей среды соединений, таких как фенолы. При этом пирогенетическая жидкость обладает энергетической ценностью (содержит остаточные углеводороды пиролизного масла) и может быть эффективно использована в качестве компонента котельных топлив. Одним из таких видов топлива являются водоугольные суспензии. Их использование позволяет обеспечить ряд преимуществ производителям электрической и тепловой энергии по критериям энергетики, экологии и экономики.

Заключение (Conclusions)

Водоугольные суспензии являются перспективными альтернативными видами энергетических топлив. Их использование в энергетике позволит вырабатывать тепловую и электрическую энергию. В качестве компонент таких топлив возможно использовать достаточно широкий спектр компонент. Одними из предпочтительных являются отходы различного типа. Введение их в состав водоугольных суспензий позволяет существенно улучшить реологические свойства, что может улучшить характеристики хранения и транспортировки таких топлив. Добавки в состав суспензии жидких горючих отходов и биомассы способствует снижению времени задержки зажигания. При этом такие добавки не снижают качественных характеристик распыления многокомпонентных водоугольных суспензий. Ряд компонент позволят сократить объемы эмиссии в атмосферу продуктов сгорания таких топлив. Установленные положительные характеристики и свойства водоугольных суспензионных дают положительные предпосылки для полномасштабного внедрения в промышленную энергетику таких топлив. Проанализировано влияние добавок и компонент водоугольных суспензий на их характеристики и свойства. Показано, что жидкие компоненты способствуют интенсификации процессов зажигания и горения. Также, их введение в состав топлива положительно влияет на реологические свойства суспензий, характеристики ее распыления, сжигания и концентрацию вредных выбросов.

Литература

1. Бекмуратова, Б. Т. Применение водоугольного топлива в теплоэнергетике / Б. Т. Бекмуратова // Бюллетень науки и практики. – 2020. – Т. 6. – № 12. – С. 261-267. – DOI 10.33619/2414-2948/61/27. – EDN YONJIV.
2. Патент на полезную модель № 87700 U1 Российская Федерация, МПК C10L 1/32, B01F 11/02. Технологическая линия для производства водоугольного топлива и его сжигания : № 2009120319/22 : заявл. 28.05.2009 : опубл. 20.10.2009 / С. В. Алексеенко, Л. В. Карташова, И. В. Кравченко [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "ТеплоПром". – EDN YROADP.
3. Результаты численного моделирования процесса сжигания водоугольного топлива / В. И. Мурко, А. Риестерер, С. А. Цепорина [и др.] // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2-1. – С. 230-234. – EDN NUTCBT.

4. Флек, Е. С. Особенности расчета теплообмена в топке котельной установки при сжигании водоугольного топлива / Е. С. Флек // Омский научный вестник. – 2017. – № 1(151). – С. 70-73. – EDN YICGTF.

5. Патент № 2036955 С1 Российская Федерация, МПК C10L 1/32. Способ приготовления водоугольного топлива из бурых углей : № 5051567/04 : заявл. 09.07.1992 : опубл. 09.06.1995 / Г. Н. Делягин; заявитель Научно-производственное объединение "Гидротрубопровод". – EDN NNOPL.

6. Белогурова, Т. П. Исследование золоотходов на основе кавитированного водоугольного топлива / Т. П. Белогурова, А. В. Цыратьева // Наукоемкие технологии и инновации : Юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения), Белгород, 09–10 октября 2014 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2014. – С. 49-53. – EDN TGVOSV.

7. Малышев, Д. Ю. Использование твердых продуктов пиролиза древесины в качестве добавки к водоугольным суспензиям / Д. Ю. Малышев, С. В. Сыродой // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век : Материалы XVII международной научно-практической конференции, Орёл, 02–04 декабря 2019 года. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019. – С. 281-284. – EDN MRVUXN.

8. Калинин, О. Н. Природоохранные аспекты внедрения технологии сжигания водоугольного топлива / О. Н. Калинин // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2019. – № 5(139). – С. 84-89. – EDN ZYHHWM.

9. Курганкина М.А., Вершинина К.Ю., Озерова И.П., Медведев В.В. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органоводоугольные топливные композиции. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. С. 72-82.

10. Вершинина, К. Ю. Характеристики зажигания капель органоводоугольных топлив на основе отработанных и промышленных масел / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Химия твердого топлива. – 2017. – № 3. – С. 63-69. – DOI 10.7868/S0023117717030100. – EDN YTAJOX.

11. Малышев, Д. Ю. Обоснование ресурсоэффективности технологий сжигания водоугольных топлив с добавками биомассы / Д. Ю. Малышев, С. В. Сыродой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 6. – С. 77-85. – DOI 10.18799/24131830/2020/6/2677. – EDN RPUFSD.

12. Малышев, Д. Ю. Влияние характерного размера капель био-водоугольного топлива на времена задержки зажигания / Д. Ю. Малышев, С. В. Сыродой // Наука молодых - будущее России : Сборник научных статей 4-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 8-ми томах, Курск, 10–11 декабря 2019 года / Ответственный редактор А.А. Горохов. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 118-122. – EDN KYMWUY.

13. Сазанов, Б.В. Промышленные теплоэнергетические установки и системы: учеб. пособие для вузов [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Б.В. Сазанов, В.И. Ситас. — Электрон. дан. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2014. — 275 с.

14. Патент № 2144059 С1 Российская Федерация, МПК C10L 1/32. Топливо : № 99102408/04 : заявл. 04.02.1999 : опубл. 10.01.2000 / Г. Н. Делягин, С. В. Ерохин, Г. П. Силенко [и др.]; заявитель Делягин Геннадий Николаевич, Ерохин Сергей Федорович, Силенко Георгий Петрович [и др.].

15. Эпштейн, С. А. Морфологические и термохимические превращения бурого угля при баротермической обработке спиртоводоугольного топлива / С. А. Эпштейн, Д. С. Худяков, Е. Г. Горлов // Химия твердого топлива. – 2004. – № 2. – С. 35-40. – EDN OXODPP.

16. Исследование характеристик распыления и зажигания водоугольных топлив с добавлением изопропилового спирта / Д. В. Гвоздяков, А. В. Зенков, В. Е. Губин [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21. – № 4. – С. 29-39. – DOI 10.14529/power210404. – EDN TRRWIE.

17. Баранова, М. П. Сжигание водоугольных суспензионных топлив из низкометаморфизованных углей / М. П. Баранова, Т. А. Кулагина, С. В. Лебедев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 9. – С. 24-26. – EDN TMLUHW.

18. Олейникова М.И. Получение водоугольного топлива из шламов углеобогащения. Охрана окружающей среды и заповедное дело. 2020. № 1. С. 132-144.

19. Баранова, М. П. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма / М. П.

Баранова // Труды Красноярского государственного технического университета. – 2006. – № 2-3. – С. 143-147. – EDN HJJJDM.

20. Борзов, А. И. Приготовление водоугольных суспензий из бурых углей с использованием различных мельничных устройств / А. И. Борзов, М. П. Баранова // Химия твердого топлива. – 2006. – № 4. – С. 40-45. – EDN HVJHKZ.

21. С.В. Алексеенко, Л.И. Мальцев, И.В. Кравченко, А.А. Дектерев, В.А. Кузнецов. Обзор работ по приготовлению водоугольного топлива и его сжиганию в котлах. Горение и плазмохимия. 19 (2021) 265-277.

22. Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Губин В.Е., Ведяшкин М.В. К вопросу об исследовании структуры потока водоугольного топлива в процессе его пневмомеханического распыла. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 4. С. 5-12.

23. Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Самборский В.Е. Прикладные аспекты технологии приготовления и сжигания водоугольного топлива. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2011. № 1 (6). С. 25-30.

24. Морозов А.Г., Коренюгина Н.В. Гидроударные технологии в производстве водоугольного топлива. Уголь. 2009. № 11 (1003). С. 54-56.

25. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Экспериментальные исследования реологических характеристик и гидравлических параметров транспортирования водоугольного топлива. International scientific and practical conference world science. 2017. Том 1. №12 (28). С. 35-42.

26. Егурнов А.И., Борок С.Д., Тевтуль Я.Ю. Взаимосвязь параметров состояния водоугольного суспензионного топлива. Современная наука. Исследования, идеи, результаты, технологии. 2014. №2. 15. 49-53.

27. Савицкий Д.П., Макаров А.С., Егурнов А.И. Физико-химические свойства водоугольного топлива. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2012. №1 (9). С. 10-14.

28. Э.Р. Зверева, Г.Р. Ахметвалиева, А.О. Макарова, Д.В. Ермолаев, Ю.К. Монгуш, А.Р. Шайхутдинова, О.С. Зуева. Изменение реологических свойств водоугольных суспензий в присутствии наноматериалов. Вестник казанского государственного энергетического университета. 2017. №3 (35). С. 76-83.

29. R. Chen, M. Wilson, Y.K. Leong, P. Bryant, H. Yang, D.K. Zhang. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels. Fuel, 90 (4) (2011), pp. 1689-1695.

30. Agnieszka Kijo-Kleczkowska. Combustion of coal-water suspensions. Fuel. Volume 90, Issue 2, February 2011, Pages 865-877.

31. B. C. Meikap, N. K. Purohit, V. Mahadevan. Effect of microwave pretreatment of coal for improvement of rheological characteristics of coal–water slurries. Journal of Colloid and Interface Science. Volume 281, Issue 1, 1 January 2005, Pages 225-235.

32. Y.-J. Shin, Y.-H. Shen. Preparation of coal slurry with organic solvents. Chemosphere, 68 (2) (2007), pp. 389-393.

33. G.V. Kuznetsov, S. Romanov, K.Yu. Vershinina, P.A. Strizhak. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil. Fuel. Volume 302, 15 October 2021, 121203.

34. E.Yu. Shadrin, I.S. Anufriev, E.B. Butakov, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, L.I. Maltsev, O.V. Sharypov. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. Fuel. Volume 303, 1 November 2021, 121182.

35. Xiaoxiang Wu, Qinghua Guo, Yan Gong, Jieyu Liu, Xiang Luo, Tao Wu, Guangsu Yu. Influence of burner geometry on atomization of coal water slurry in an entrained-flow gasifier. Chemical Engineering Science. Volume 247, 16 January 2022, 117088.

36. D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, S.V. Lavrinenko, Ya.V. Marysheva, K.B. Larionov. Spraying characteristics of alcohol-coal-water slurries with low coal content. Chemical Engineering & Technology. 2022. Vol. 45, iss. 5. P. 936-945.

37. Deng Jianxin, Ding Zeliang, Zhou Houming, Tan Yuanqiang. Performance and wear characteristics of ceramic, cemented carbide, and metal nozzles used in coal–water–slurry boilers. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Volume 27, Issue 5, September 2009, Pages 919-926.

38. Stephane G. Daviault, Omar B. Ramadan, Edgar A. Matida, Patrick M. Hughes, Robin Hughes. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. Fuel. Volume 98, August 2012, Pages 183-193.

39. Ping Lu, Mingyao Zhang. Experimental investigation on atomizing characteristics of coal-water paste for pressurized fluidized bed. *Fuel*. Volume 83, Issue 16, November 2004, Pages 2109-2114.
40. Xiuyuan Ma, Yufeng Duan, Meng Liu. Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Volume 46, April 2013, Pages 131-138.
41. Stephane G. Daviault, Omar B. Ramadan, Edgar A. Matida, Patrick M. Hughes, Robin Hughes. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. *Fuel*. Volume 98, August 2012, Pages 183-193.
42. Dmitry Gvozdyakov, Andrey Zenkov. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries. *Energy*. Volume 230, 1 September 2021, 120900.
43. Hsu, T.C., Yang, S.I. Viscosity effects of spray characteristics in air-blast atomizer. *Key Engineering Materials*. Volume 656-657, 2015, Pages 142-147.
44. D.O. Glushkov, S.V. Syrodoy, A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects. *Fuel Process. Technol.*, 148 (2016), pp. 224-235.
45. V.A. Pinchuk, T.A. Sharabura, A.V. Kuzmin. Improvement of coal-water fuel combustion characteristics by using of electromagnetic treatment. *Fuel Processing Technology*. Volume 167, 1 December 2017, Pages 61-68.
46. Jianguo Liu, Xiumin Jiang, Lingsheng Zhou, Hui Wang, Xiangxin Han. Co-firing of oil sludge with coal-water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 167, Issues 1–3, 15 August 2009, Pages 817-823.
47. V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat. *Applied Thermal Engineering*. Volume 106, 5 August 2016, Pages 561-569.
48. D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, A. Zh. Kaltaev. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste. *Energy*. Volume 257, 15 October 2022, 124813.
49. Kun Zhou, Qizhao Lin, Hongwei Hu, Huiqing Hu, Lanbo Song. The ignition characteristics and combustion processes of the single coal slime particle under different hot-coflow conditions in N_2/O_2 atmosphere. *Energy*. Volume 136, 1 October 2017, Pages 173-184.
50. A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Sci. Total Environ.*, 772 (2021), p. 144909.
51. Christian Gaber, Philipp Wachter, Martin Demuth, Christoph Hochenauer. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen. *Fuel*. Volume 282, 15 December 2020, 118692.
52. D.V. Antonov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, D.S. Romanov. Micro-explosive droplet fragmentation of environmentally promising coal-water slurries containing petrochemicals. *Fuel*. Volume 283, 1 January 2021, 118949.
53. A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Science of The Total Environment*. Volume 772, 10 June 2021, 144909.
54. G.S. Nyashina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak. Effects of plant additives on the concentration of sulfur and nitrogen oxides in the combustion products of coal-water slurries containing petrochemicals. *Environmental Pollution*. Volume 258, March 2020, 113682.
55. Сыродой С.В., Малышев Д.Ю., Косторева Ж.А. Совместное зажигание водоугольной суспензии и древесной биомассы. *Промышленная энергетика*. 2020. № 5. С. 44-49.
56. Пинчук В.А., Шарабура Т.А., Кузьмин А.В. Экспериментальные исследования коэффициента теплопроводности и теплоемкости водоугольного топлива. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. 2016. № 1 (17). С. 55-67.
57. Мурко В.И., Таилаков О.В., Хмяляинен В.А., Шеховцова В.О. Развитие экологически чистых технологий по использованию отходов обогащения и сжигания угля. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016. № 10. С. 249-258.
58. Зверева Э.Р., Ахметвалиева Г.Р., Макарова А.О., Ермолаев Д.В., Монгуш Ю.К.О., Шайхутдинова А.Р., Зуева О.С. Изменение реологических свойств водоугольных суспензий в присутствии наноматериалов. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2017. № 3 (35). С. 76-83.

59. Кравченко О.В., Андриенко Е.Ю. Энергетические и экологические аспекты использования фенольных сточных вод в качестве компонента водоугольных топлив. *Экология и промышленность*. 2011. № 3 (28). С. 67-71.

60. Ksenia Yu. Vershinina, Vadim V. Dorokhov, Daniil S. Romanov, Pavel A. Strizhak. Combustion dynamics of droplets of aqueous slurries based on coal slime and waste oil. *Journal of the Energy Institute*. Volume 104, October 2022, Pages 98-111.

61. Ksenia Yu. Vershinina, Vadim V. Dorokhov, Daniil S. Romanov, Pavel A. Strizhak. Combustion stages of waste-derived blends burned as pellets, layers, and droplets of slurry. *Energy*. Volume 251, 15 July 2022, 123897.

62. Dmitriy Gvozdyakov, Andrey Zenkov. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying. *Fuel Processing Technology*. Volume 218, July 2021, 106864.

Авторы публикации

Зенков Андрей Викторович – канд. техн. наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Томского Политехнического Университета. ORCID 0000-0002-7763-3266, avz41@tpu.ru.

Гвоздяков Дмитрий Васильевич – канд. техн. наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Томского Политехнического Университета. ORCID 0000-0002-7866-9180, dim2003@tpu.ru.

References

1. Bekmuratova, B. T. The use of coal-water fuel in thermal power engineering / B. T. Bekmuratova. *Bulletin of Science and practice*. 2020. Vol. 6. No. 12. pp. 261-267. DOI 10.33619/2414-2948/61/27. EDN YONJIV.

2. Utility model Patent No. 87700 U1 Russian Federation, IPC C10L 1/32, B01F 11/02. Technological line for the production of coal-water fuel and its combustion : No. 2009120319/22 : application 28.05.2009 : publ. 20.10.2009 / S. V. Alekseenko, L. V. Kartashova, I. V. Kravchenko [et al.] ; applicant Limited Liability Company «TeploProm». EDN YROADP.

3. Results of numerical modeling of the process of burning coal–water fuel / V. I. Murko, A. Riesterer, S. A. Tsetsorina [et al.]. *Polzunovsky vestnik*. 2011. № 2-1. pp. 230-234. EDN NUTCBT.

4. Fleck, E. S. Features of calculation of heat exchange in the furnace of a boiler plant when burning coal-water fuel / E. S. Fleck. *Omsk scientific Bulletin*. 2017. № 1(151). Pp. 70-73. EDN YICGTF.

5. Patent No. 2036955 C1 Russian Federation, IPC C10L 1/32. Method of preparation of coal-water fuel from brown coals : No. 5051567/04 : application. 09.07.1992 : publ. 09.06.1995 / G. N. Delyagin; applicant Scientific and Production Association "Hydrotruboprovod". EDN NNOPL.

6. Belogurova, T. P. *Research of ash wastes based on cavitated coal-water fuel* / T. P. Belogurova, A.V. Tsyratyeva. High-tech technologies and innovations : Jubilee International scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of V.G. Shukhov BSTU (XXI scientific readings), Belgorod, October 09-10, 2014. – Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2014. – pp. 49-53. – EDN TGVOSV.

7. Malyshev, D. Yu. *The use of solid wood pyrolysis products as an additive to coal-water suspensions* / D. Yu. Malyshev, S. V. Syrodoy. Energy and resource conservation – XXI century : Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference, Orel, 02-04 December 2019. – The Eagle: OSU named after I.S. Turgenev, 2019. – pp. 281-284. – EDN MRVUXN.

8. Kalinikhin, O. N. Environmental aspects of the introduction of coal-water fuel combustion technology / O. N. Kalinikhin. *Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture*. 2019. № 5(139). Pp. 84-89. EDN ZYHHWM.

9. Kurgankina M.A., Vershinina K.Yu., Ozerova I.P., Medvedev V.V. *On the issue of the transition of thermal power plants from traditional fuels to organo-coal fuel compositions*. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2018. Vol. 329. No. 9. pp. 72-82.

10. Vershinina, K. Yu. *Characteristics of ignition of droplets of organovodocarbon fuels based on spent and industrial oils 1* / K. Yu. Vershinina, D. O. Glushkov, P. A. Strizhak.

Chemistry of solid fuels. 2017. No. 3. PP. 63-69. DOI 10.7868/S0023117717030100. EDN YTAJJOX.

11. Malyshev D. Yu. Substantiation of resource efficiency of technologies for burning coal-water fuels with biomass additives / D. Yu. Malyshev, S. V. Syrodoy. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2020. vol. 331. No. 6. pp. 77-85. DOI 10.18799/24131830/2020/6/2677. EDN RPUFSD.

12. Malyshev D. Yu. *The influence of the characteristic size of bio-coal fuel droplets on ignition delay times* / D. Yu. Malyshev, S. V. Syrodoy. Science of the young - the future of Russia: Collection of scientific articles of the 4th International Scientific Conference of Promising developments of Young Scientists. In 8 volumes, Kursk, December 10-11, 2019 / Responsible editor A.A. Gorokhov. Kursk: Southwest State University, 2019. pp. 118-122. EDN KYMWUY.

13. Sazanov, B.V. *Industrial thermal power plants and systems: textbook. manual for universities* [Electronic resource] : textbook. manual / B.V. Sazanov, V.I. Sitas. Electron. dan. Moscow : Publishing House of MEI, 2014. 275 p.

14. Patent No. 2144059 C1 Russian Federation, IPC C10L 1/32. Fuel : No. 99102408/04 : application 04.02.1999 : publ. 10.01.2000 / G. N. Delyagin, S. V. Erokhin, G. P. Silenko [et al.]; the applicant Delyagin Gennady Nikolaevich, Erokhin Sergey Fedorovich, Silenko Georgy Petrovich [and others].

15. Epstein, S. A. Morphological and thermochemical transformations of brown coal during barothermal treatment of alcohol-coal fuel / S. A. Epstein, D. S. Khudyakov, E. G. Gorlov. *Chemistry of solid fuel*. 2004. No. 2. pp. 35-40. EDN OXODPP.

16. Investigation of the characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels with the addition of isopropyl alcohol / D. V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, V. E. Gubin [et al.]. *Bulletin of the South Ural State University*. Series: Energy. 2021. Vol. 21. No. 4. pp. 29-39. DOI 10.14529/power210404. EDN TRRWIE.

17. Baranova, M. P. Burning of water-coal suspension fuels from low-metamorphosed coals / M. P. Baranova, T. A. Kulagina, S. V. Lebede. *Chemical and oil and gas engineering*. 2009. No. 9. pp. 24-26. EDN TMLUHW.

18. Oleinikova M.I. Obtaining coal-water fuel from coal-enrichment sludge. *Environmental protection and conservation*. 2020. No. 1. pp. 132-144.

19. Baranova, M. P. *The influence of plasticizing additives on the rheological characteristics of coal-water suspensions from coals of varying degrees of metamorphism* / M. P. Baranova. Proceedings of the Krasnoyarsk State Technical University. - 2006. No. 2-3. pp. 143-147. EDN HIJJDM.

20. Borzov, A. I. *Preparation of coal-water suspensions from brown coals using various mill devices* / A. I. Borzov, M. P. Baranova. *Chemistry of solid fuels*. 2006. No. 4. pp. 40-45. EDN HVJHKZ.

21. S.V. Alekseenko, L.I. Maltsev, I.V. Kravchenko, A.A. Dekterev, V.A. Kuznetsov. Overview of works on the preparation of coal-water fuel and its combustion in boilers. *Gorenje and plasmochimistry*. 19 (2021) 265-277.

22. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Gubin V.E., Vedyashkin M.V. On the study of the structure of the flow of coal-water fuel in the process of its pneumomechanical spraying. *Bulletin of the South Ural State University*. Series: Energy. 2018. Vol. 18. No. 4. pp. 5-12.

23. Maltsev L.I., Kravchenko I.V., Kravchenko A.I., Samborsky V.E. Applied aspects of technology of preparation and combustion of coal-water fuel. *Modern science: research, ideas, results, technologies*. 2011. No. 1 (6). pp. 25-30.

24. Morozov A.G., Korenyugina N.V. Hydraulic shock technologies in the production of coal-water fuel. *Coal*. 2009. No. 11 (1003). pp. 54-56.

25. Chernetskaya-Beletskaya N.B., Baranov I.O., Miroshnikova M.V. Experimental studies of rheological characteristics and hydraulic parameters of coal-water fuel transportation. *International scientific and practical conference world science*. 2017. Volume 1. No.12 (28). pp. 35-42.

26. Egurnov A.I., Boruk S.D., Teutul Ya.Yu. Relationship of parameters of the state of coal-water suspension fuel. *Modern science. Research, ideas, results, technologies*. 2014. №2. 15. C. r49-53.

27. Savitsky D.P., Makarov A.S., Egurnov A.I. Physico-chemical properties of coal-water fuel. *Modern science: research, ideas, results, technologies*. 2012. No. 1 (9). pp. 10-14.

28. E.R. Zvereva, G.R. Akhmetvalieva, A.O. Makarova, D.V. Ermolaev, Y.K. Mongush, A.R. Shaykhutdinova, O.S. Zueva. Changes in rheological properties of coal-water suspensions in the presence of nanomaterials. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2017. No.3 (35). pp. 76-83.

29. R. Chen, M. Wilson, Y.K. Leong, P. Bryant, H. Yang, D.K. Zhang. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels. *Fuel*, 90 (4) (2011), pp. 1689-1695.
30. Agnieszka Kijo-Kleczkowska. *Combustion of coal-water suspensions*. Fuel. Volume 90, Issue 2, February 2011, Pages 865-877.
31. B. C. Meikap, N. K. Purohit, V. Mahadevan. Effect of microwave pretreatment of coal for improvement of rheological characteristics of coal–water slurries. *Journal of Colloid and Interface Science*. Volume 281, Issue 1, 1 January 2005, Pages 225-235.
32. Y.-J. Shin, Y.-H. Shen. Preparation of coal slurry with organic solvents. *Chemosphere*, 68 (2) (2007), pp. 389-393.
33. G.V. Kuznetsov, S. Romanov, K.Yu. Vershinina, P.A. Strizhak. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil. *Fuel*. Volume 302, 15 October 2021, 121203.
34. E.Yu. Shadrin, I.S. Anufriev, E.B. Butakov, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, L.I. Maltsev, O.V. Sharypov. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*. Volume 303, 1 November 2021, 121182.
35. Xiaoxiang Wu, Qinghua Guo, Yan Gong, Jieyu Liu, Xiang Luo, Tao Wu, Guangsu Yu. Influence of burner geometry on atomization of coal water slurry in an entrained-flow gasifier. *Chemical Engineering Science*. Volume 247, 16 January 2022, 117088.
36. D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, S.V. Lavrinenko, Ya.V. Marysheva, K.B. Larionov. Spraying characteristics of alcohol-coal-water slurries with low coal content. *Chemical Engineering & Technology*. 2022. Vol. 45, iss. 5. P. 936-945.
37. Deng Jianxin, Ding Zeliang, Zhou Houming, Tan Yuanqiang. Performance and wear characteristics of ceramic, cemented carbide, and metal nozzles used in coal–water–slurry boilers. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Volume 27, Issue 5, September 2009, Pages 919-926.
38. Stephane G. Daviault, Omar B. Ramadan, Edgar A. Matida, Patrick M. Hughes, Robin Hughes. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. *Fuel*. Volume 98, August 2012, Pages 183-193.
39. Ping Lu, Mingyao Zhang. Experimental investigation on atomizing characteristics of coal–water paste for pressurized fluidized bed. *Fuel*. Volume 83, Issue 16, November 2004, Pages 2109-2114.
40. Xiuyuan Ma, Yufeng Duan, Meng Liu. Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Volume 46, April 2013, Pages 131-138.
41. Stephane G. Daviault, Omar B. Ramadan, Edgar A. Matida, Patrick M. Hughes, Robin Hughes. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. *Fuel*. Volume 98, August 2012, Pages 183-193.
42. Dmitry Gvozdyakov, Andrey Zenkov. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries. *Energy*. Volume 230, 1 September 2021, 120900.
43. Hsu, T.C., Yang, S.I. Viscosity effects of spray characteristics in air-blast atomizer. *Key Engineering Materials*. Volume 656-657, 2015, Pages 142-147.
44. D.O. Glushkov, S.V. Syrodoy, A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects. *Fuel Process. Technol.*, 148 (2016), pp. 224-235.
45. V.A. Pinchuk, T.A. Sharabura, A.V. Kuzmin. Improvement of coal-water fuel combustion characteristics by using of electromagnetic treatment. *Fuel Processing Technology*. Volume 167, 1 December 2017, Pages 61-68.
46. Jianguo Liu, Xiumin Jiang, Lingsheng Zhou, Hui Wang, Xiangxin Han. Co-firing of oil sludge with coal–water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 167, Issues 1–3, 15 August 2009, Pages 817-823.
47. V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat. *Applied Thermal Engineering*. Volume 106, 5 August 2016, Pages 561-569.
48. D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, A. Zh. Kaltaev. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste. *Energy*. Volume 257, 15 October 2022, 124813.
49. Kun Zhou, Qizhao Lin, Hongwei Hu, Huiqing Hu, Lanbo Song. The ignition characteristics and combustion processes of the single coal slime particle under different hot-coflow conditions in N₂/O₂ atmosphere. *Energy*. Volume 136, 1 October 2017, Pages 173-184.
50. A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Sci. Total Environ.*, 772 (2021), p. 144909.

51. Christian Gaber, Philipp Wachter, Martin Demuth, Christoph Hochenauer. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen. *Fuel*. Volume 282, 15 December 2020, 118692.
52. D.V. Antonov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, D.S. Romanov. Micro-explosive droplet fragmentation of environmentally promising coal-water slurries containing petrochemicals. *Fuel*. Volume 283, 1 January 2021, 118949.
53. A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Science of The Total Environment*. Volume 772, 10 June 2021, 144909.
54. G.S. Nyashina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak. Effects of plant additives on the concentration of sulfur and nitrogen oxides in the combustion products of coal-water slurries containing petrochemicals. *Environmental Pollution*. Volume 258, March 2020, 113682.
55. Syrodoy S.V., Malyshev D.Yu., Kostoreva Zh.A. Joint ignition of coal-water suspension and wood biomass. *Industrial energy*. 2020. No. 5. pp. 44-49.
56. Pinchuk V.A., Sharabura T.A., Kuzmin A.V. Experimental studies of the coefficient of thermal conductivity and heat capacity of coal-water fuel. *Modern science: research, ideas, results, technologies*. 2016. No. 1 (17). pp. 55-67.
57. Murko V.I., Tayakov O.V., Khamalyainen V.A., Shekhovtsova V.O. Development of environmentally friendly technologies for the use of coal enrichment and combustion waste. *Mining information and Analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2016. No. 10. pp. 249-258.
58. Zvereva E.R., Akhmetvalieva G.R., Makarova A.O., Ermolaev D.V., Mongush Yu.K.O., Shaikhutdinova A.R., Zueva O.S. Changes in rheological properties of coal-water suspensions in the presence of nanomaterials. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2017. No. 3 (35). pp. 76-83.
59. Kravchenko O.V., Andrienko E.Yu. Energy and environmental aspects of the use of phenolic wastewater as a component of coal-water fuels. *Ecology and industry*. 2011. No. 3 (28). pp. 67-71.
60. Ksenia Yu. Vershinina, Vadim V. Dorokhov, Daniil S. Romanov, Pavel A. Strizhak. Combustion dynamics of droplets of aqueous slurries based on coal slime and waste oil. *Journal of the Energy Institute*. Volume 104, October 2022, Pages 98-111.
61. Ksenia Yu. Vershinina, Vadim V. Dorokhov, Daniil S. Romanov, Pavel A. Strizhak. Combustion stages of waste-derived blends burned as pellets, layers, and droplets of slurry. *Energy*. Volume 251, 15 July 2022, 123897.
62. Dmitriy Gvozdyakov, Andrey Zenkov. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying. *Fuel Processing Technology*. Volume 218, July 2021, 106864.

Authors of the publication

Andrey V. Zenkov – The Butakov Research Center of Engineering School of Energy and Power Engineering of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0002-7763-3266, avz41@tpu.ru.

Dmitry V. Gvozdyakov – The Butakov Research Center of Engineering School of Energy and Power Engineering of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. ORCID 0000-0002-7866-9180, dim2003@tpu.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки).

Получено 02.08.2023г.

Отредактировано 09.08.2023г.

Принято 10.08.2023г.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 620.95

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-4-101-114

КОНЦЕПЦИЯ ЗАМКНУТОГО РЕСУРСНОГО ЦИКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИННОВАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РАЗВИТИЯ БИОЭНЕРГЕТИКИ

Аристова А.А., Новикова О.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
novikova-olga1970@yandex.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Невозможность использования существующих информационных систем таких, как территориальных схем обращения с отходами (ТСОО) для формирования баланса спроса и предложения. ТСОО не позволяют выявить объем спроса и предложения на технологии переработки, а производители оборудования не ориентированы на понимание баланса спроса по стране. Технологическое развитие в части создания новых объектов энергетической переработки отходов требует обоснования перспектив для инвестирования. *ЦЕЛЬ.* Разработать концепцию замкнутого ресурсного цикла с использованием информационных потоков, направленных на выявление участников процесса. Искомый инструмент должен обеспечить понимание потребности в производстве биоэнергетического оборудования, потенциала спроса на НИОКР, а также на формирование государственных программ поддержки создания предприятий по переработке твердых коммунальных отходов (ТКО) и производств биоэнергетического оборудования. *МЕТОДЫ.* Разработка концепции замкнутого ресурсного цикла характеризуется проектированием концепции, включающее в себя методы дивергенции, трансформации и конвергенции. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В работе описана актуальность темы, связанная с невозможностью использования существующих информационных систем таких, как территориальных схем обращения с отходами (ТСОО) для формирования баланса спроса и предложения на технологии переработки. Выявлены потенциальные участники формирования замкнутого ресурсного цикла на всем жизненном цикле проекта по переработке отходов с определением роли участников и связей между ними, а также особенностей информационного потока каждого участника. Предложена концепция, основанная на формировании информационной системы, в которой каждый участник может максимально реализовать свои потребности в ресурсах и эффекте. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предлагаемая система позволяет усовершенствовать существующую систему обращения с отходами, обеспечивает возврат сформированных отходов в ресурсный цикл. Пока источник формирования отходов не удовлетворяет спрос на реализацию образующихся отходов, будет образовываться спрос новых мощностей по переработке и новых проектов, определяющие эффективность предлагаемой системы – баланс образованных и переработанных отходов. Главным отличием предлагаемой системы от федеральной государственной информационной системы учета и контроля за обращением с отходами I и II классов (ФГИС ОПВК) является принцип работы – система основана на источнике формирования отходов, обеспечением баланса формирующих и переработанных отходов. Регистрация участников информационной системы предлагается осуществлять на цифровой платформе через единую систему идентификации и аутентификации (ЕСИА).

Ключевые слова: биоэнергетика; замкнутый ресурсный цикл; энергетическая переработка; отходы производства; отходы потребления; информационная система.

Для цитирования: Аристова А.А., Новикова О.В. Концепция замкнутого ресурсного цикла с использованием инновационной информационной системы развития биоэнергетики //

THE CONCEPT OF A CLOSED RESOURCE CYCLE USING AN INNOVATIVE INFORMATION SYSTEM FOR THE DEVELOPMENT OF BIOENERGY

AA. Aristova, OV. Novikova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

novikova-olga1970@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The impossibility of using existing information systems, such as territorial waste management schemes (TSOs) to form a balance of supply and demand. TSOs do not allow us to identify the volume of demand and supply for processing technologies, and equipment manufacturers are not focused on understanding the balance of demand across the country. Technological development in terms of creating new facilities for energy waste processing requires justification of prospects for investment. *THE PURPOSE.* Develop the concept of a closed resource cycle using information flows aimed at identifying participants in the process. The desired tool should provide an understanding of the need for the production of bioenergy equipment, the potential for demand for R&D, as well as the formation of state programs to support the creation of enterprises for the processing of municipal solid waste (MSW) and the production of bioenergy equipment. *METHODS.* The development of the concept of a closed resource cycle is characterized by the design of the concept, which includes the methods of divergence, transformation, and convergence. *RESULTS.* The paper describes the relevance of the topic associated with the impossibility of using existing information systems such as territorial waste management schemes (TSMS) to form a balance of supply and demand for processing technologies. Potential participants in the formation of a closed resource cycle throughout the life cycle of a waste processing project are identified, with the role of participants and the links between them, as well as the characteristics of the information flow of each participant, identified. A concept is proposed based on the formation of an information system in which each participant can maximize their needs for resources and effect. *CONCLUSION.* The proposed system makes it possible to improve the existing waste management system, ensures the return of generated waste to the resource cycle. systems - the balance of generated and recycled waste. The main difference between the proposed system and the federal state information system for accounting and control of waste management of classes I and II is the principle of operation - the system is based on the source of waste generation, ensuring the balance of generating and processed waste.

Keywords: bioenergy; closed resource cycle; energy processing; production waste; consumption waste; information system.

For citation: Aristova AA., Novikova OV. The concept of a closed resource cycle using an innovative information system for the development of bioenergy. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):101-114. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-101-114.

Введение (Introduction)

Проблема накопления отходов различного происхождения требует организационных и технологических решений, в отношении возврата в ресурсный цикл постоянно возникающих отходов-ресурсов и переработки уже накопленных. В 2021 году на территории РФ было образовано порядка 8448,6 млн т отходов производства и потребления, что выше на 21,5% по сравнению с 2020 г. [1]. Одной из причин изменения объемов отходов производства и потребления является восстановление экономики РФ после сокращения влияния пандемии COVID-19, развитие отрасли добычи полезных ископаемых, увеличение численности населения (рис. 1).

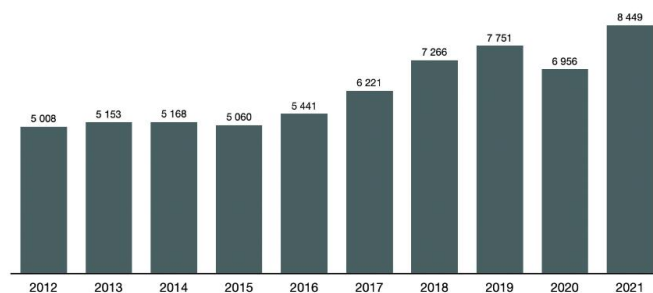


Рис. 1. Динамика объема образования отходов производства и потребления, млн т

Fig. 1. Dynamics of waste generation and consumption, mln

*Источник: составлено автором на основании данных [1].

Source: compiled by the author on the basis of data [1]

Доля твердых коммунальных отходов в 2021 году уменьшилась на 0,2% (48362,8 тыс. т) [1]. Более высокое значение показателя для ЦФО объясняется большей численностью населения по сравнению с другими федеральными округами (рис. 2).

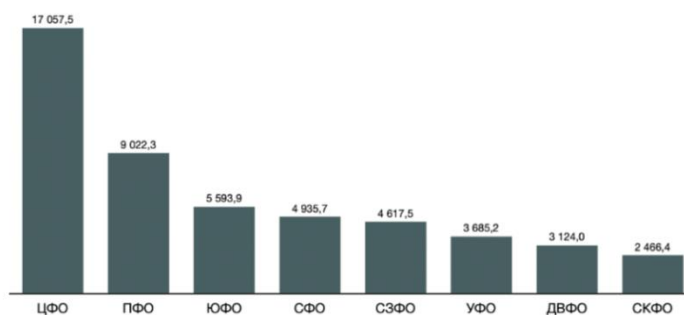


Рис. 2. Распределение объема образования ТКО по федеральным округам РФ в 2021 г., тыс. т

Fig. 2. Distribution of TKO education volume by federal districts of the Russian Federation in 2021, ths. Tons

*Источник: составлено автором на основании данных [1].

Source: compiled by the author on the basis of data [1].

Создание концепции замкнутого ресурсного цикла с использованием инновационной информационной системы обусловлено невозможностью использования существующих информационных систем таких, как территориальных схем обращения с отходами (ТСОО) для формирования баланса спроса и предложения. ТСОО не позволяют выявить объем спроса и предложения на технологии переработки, а производители оборудования не ориентированы на понимание баланса спроса по стране. Технологическое развитие в части создания новых объектов энергетической переработки отходов требует обоснования перспектив для инвестирования. Научное и практическое значение предлагаемой концепции обусловлено отсутствием единого подхода на государственном уровне создания информационной системы, учитывающей биоэнергетический потенциал и увязывающий экологические требования с решением вопроса энергетической безопасности.

Одно из направлений, рассматриваемых в числе энергетических способов утилизации отходов, предполагает использование биоэнергетических установок. Существуют примеры реализовать такие технологии [2, 3]. Так, Федеральный проект «Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами», реализованный в рамках Государственной программы РФ «Охрана окружающей среды» для создания эффективной системы обращения с отходами производства и потребления, на 2020 год включает мощности по утилизации ТКО путем их использования для производства электрической и тепловой энергии со значением 2,8 млн т, цель к 2023 году – 3,35 млн т в год [4]. Но нет системы, формирующей перспективы спроса и предложения по отходам, по проектам и технологиям переработки, в том числе биоэнергетической. Как отмечается экспертами, в России слишком мало действующих биогазовых установок, а внедрение новых проектов идет медленно и неэффективно [5]. Если говорить о крупных промышленных биогазовых установках, то на сегодняшний день введены в эксплуатацию только четыре промышленные установки: две биогазовые станции (БГС) Мосводоканала

(Люберцы и Курьянова), где в качестве сырья используются иловые осадки, и две БГС компании «АльтЭнерго» в Белгородской области – «Лучки» (2,4 МВт/ч, сырье – свиноводческие стоки, силосные массы и отходы местного перерабатывающего завода «Агро-Белогорье») и «Байцуры» (сырье – свиноводческие стоки, дополнительное сырье – силосные массы или рожь). Несколько проектов по малым и средним мощностям включают следующие: «МосМедыньАгропром» в Калужской области и «Мортадель» в Московской области, которые имеют собственные биогазовые установки; ООО «СельхозБиоГаз» реализован пилотный проект в Кировской области; ООО «ЭнергоРежим» в Оренбургской и Ростовской областях, Удмуртии и Пермском крае реализовала 15 проектов «под ключ» и готовится к реализации еще 5 проектов (стоимость каждого проекта – от 3,5 млн руб.). В 2015 году в Крыму (с. Тургенево, Белогорский район) была запущена выработка электроэнергии за счет сжигания свалочного газа. Количество вырабатываемой электроэнергии составляет около 60 кВтч в год. Огромный потенциал формирования бытовых отходов крупных городов и регионов позволяет рассмотреть их общие возможности использования [1]. Ленинградская область отличается большим количеством агропромышленных предприятий, крупных продовольственных сетей и пищевой промышленности, что признано перспективой для развития биоэнергетики. В 2019 году петербургская биотехнологическая компания «Эволюция биогазовых систем» (Эвобиос) ввела в эксплуатацию комплекс по переработке органических отходов на территории АО «Племзавод «Первомайский» (п. Плодовой, Приозерский район, Ленинградская обл.) [5]. Однако эти предприятия позволяют переработать очень незначительную часть отходов региона и вернуть в ресурсный цикл менее 13% (минимум – 0,9% в ДВФО, максимум – ЦФО 12,1%) формируемых твердых коммунальных отходов на момент 2021 г. (рис. 3).

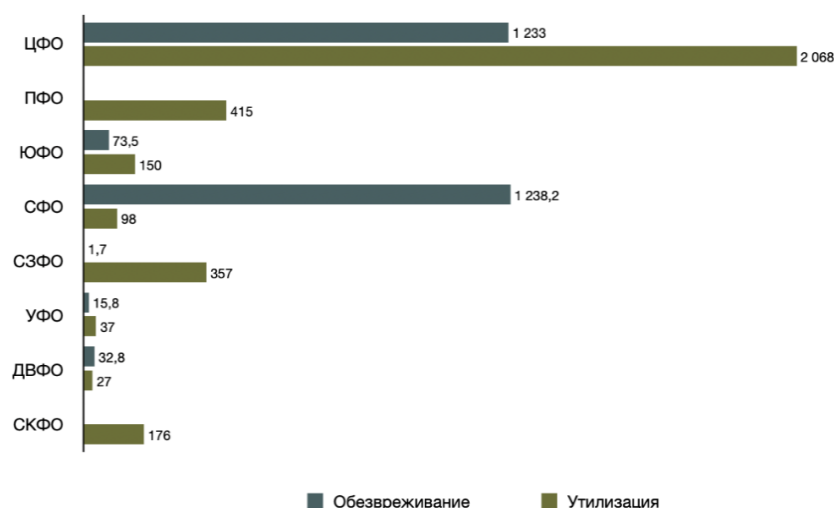


Рис. 3. Динамика обезвреживания и утилизации ТКО по федеральным округам РФ в 2021 г., тыс. т

*Источник: составлено автором на основании данных [1].

Fig. 3. Dynamics of decontamination and utilization of industrial complex in federal districts of the Russian Federation in 2021

Source: compiled by the author on the basis of data [1]

Несколько отечественных производителей биогазовых установок предлагают биогазовое оборудование для станций средней и малой мощности: ЗАО «Центр ЭкоРОС», ООО «Гринтек», ОАО «Волжский дизель имени Маминых», ООО «Мелькомпинжиниринг», ООО «Сибирский институт прикладных исследований», ЗАО «Энерг-биогаз», ОАО «Концерн КОНАТЭМ», ООО «Корпорация «БиоГазЭнергоСтрой», ООО «Агробиотех», ООО «СельхозБиоГаз» [5]. В частности, технология LANDCO, запатентованная компанией «Агробиотех» (г. Санкт-Петербург), позволяет полностью извлекать биогаз, как автономный источник тепла и электроэнергии, одновременно производя сложные комплексные жидкие микробиологические удобрения и чистую воду. Преимуществом биогазовой установки производства «СельхозБиоГаз» (г. Киров) является модульность установки, которая позволяет гибко подбирать мощности переработки в зависимости от потока органических отходов – от 100 кг до 1000 т в сутки. Российский разработчик биогазовых заводов, комплексов и установок НПО «BioGasRussia» (г. Яранск, Кировская обл.) также практикует индивидуализацию и предоставляет животноводческим, птицеводческим, крупным и мелким фермерскими и частным хозяйствам специальные комплексные установки, работающие автономно в соответствии с потребностями заказчика.

Несмотря на запуск системы поддержки биогазовой энергетики России в 2016 году, которая обязывает сетевые компании покупать «зеленую» электроэнергию по более высоким тарифам, биогазовый потенциал сельскохозяйственного сектора до сих пор остается практически невостребованным. Медленное развитие биогазового сектора в основном связано с низкой инвестиционной активностью. Отсутствуют конкурентноспособные отечественные технологии, делающие инвестиционные предложения более привлекательными. Инвестиции в оборудование, строительство и проектирование для производства 1 кВт на когенерационной установке в среднем составляют около 3–5 тыс. евро. При текущей стоимости газа $\$150/\text{м}^3$ срок окупаемости биогазового проекта составляет 7 лет. В Европе стоимость биогаза на сегодняшний момент около $\$1000/\text{м}^3$, тогда как цена газа – около $\$250/\text{м}^3$, что может быть конкурентоспособным. В экспорте биогаза из России (после сертификации) доминируют «Газпром», единственный экспортер газа, который не заинтересован в такой конкуренции и поэтому не может конкурировать. Для развития внутреннего рынка фермерам, заинтересованным в производстве биогаза, необходима поддержка интереса для повышения рентабельности их основного производства с помощью небольших установок и сделать его экологичным. Например, практический опыт ООО «ЭнергоРежим» показал, что в российских условиях оптимальными являются небольшие установки объемом 25–100 м^3 , способные производить 2,5–10 т органики с производством газа, тепла и 100 кВтч электроэнергии в сутки [5].

Для проведения системного анализа информационной среды, в качестве которой использовалась база данных ScienceDirect, на языке программирования Python 3 рассмотрен процесс сбора данных (parsing) с использованием библиотеки selenium. В результате системного анализа выделено 6 направлений, описательная характеристика которых рассмотрена ниже:

1. «Направление 1» определяется токенами climate”, “temperature”, “global”, “co2”. Данная совокупность токенов выступает в качестве одной из причин развития биоэнергетики – глобального изменения климата. Поскольку расширение масштабов использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) имеет важное значение для любых усилий по сдерживанию глобального потепления, возникает обоснованность выявления данного направления.

Актуальность заключается в том, что биоэнергетика может способствовать смягчению последствий изменения климата, даже несмотря на то, что при сжигании биотоплива может выделять больше углекислого газа на единицу произведённой энергии, чем ископаемое топливо, такое как уголь и нефть [6].

Значимость данного кластера подтверждается моделированием Международного энергетического агентства (МЭА) о сохранении глобального потепления ниже 2 °C в этом столетии, показывающим, что доля современной биоэнергетики в мировом энергобалансе вырастет с 4,5% до 17% к 2060 году, и определяет одну из основополагающих причин развития вектора биоэнергетики в мире.

2. «Направление 2» определяется токенами: “fuel”, “source”, “msw”, “resource”, “feedstock”. Данная совокупность токенов объединяет статьи, представляющие описательную характеристику ресурсов для получения энергии, или же с указанием их классификации. В двух случаях *значимость* направления обуславливается связью «вид отходов – используемая технология – получаемое сырье (продукция)», где данное направление стоит в 1 звене. *Актуальность* сосредоточена на том, что выбор эффективной переработки без понимания свойств отходов невозможна, поскольку одним из характерных свойств твердых коммунальных отходов является неоднородность состава связи [7]. Также от способа переработки опасного мусора зависит выделение ядовитых веществ в атмосферу. Кроме того, выбор способа переработки осуществляют, исходя не только из состава отходов, но и длительности использования и степени опасности окружающей среды, что указывается в описательной характеристике отходов и классификации [8,9].

3. «Направление 3» определяется токенами: “biomass”, “bioenergy”, “biogas”, “gas”, “technology”, “electricity”, “generation”. Данная совокупность токенов объединяет статьи, описывающих возможные технологии энергетической переработки биомассы с получением электроэнергии.

Актуальность сформированного направления основана на увеличении темпов продуцирования различных видов отходов, вследствие увеличения роста экономики мира, и порядка 33% этих отходов на данный момент нерационально используются за счет сжигания или же примитивного открытого хранения или захоронения [10]. По оценкам Всемирного банка, уровень экономического развития, рост численности населения и урбанизация стран в целом приведут к увеличению образования отходов с 2,01 млрд т в 2016 году до 3,40 млрд т

к 2050 году. Ввиду этого возникает необходимость минимизирования отходов посредством разумной утилизации с сопутствующей вторичной переработкой и выработкой энергии, позволяющая обеспечить экологическую замкнутость производственного цикла – важнейшего критерия перехода к циркулярной экономике. *Значимость* этого направления определяется углеродной нейтральностью биомассы и развитию в отношении устойчивого общества и переход от ископаемого топлива к производству электроэнергии на основе устойчивых источников топлива [11].

4. «Направление 4» определяется токенами: «utilization», «renewable», «conversion», «organic», «waste», «energy». Данная совокупность токенов объединяет статьи, посвященные проблемам переработки и утилизации отходов.

Актуальность данной тематики заключается в неразумном обращении с отходами, особенно в развивающихся странах, где оно представляет серьезную угрозу для общества и окружающей среды. Вследствие чего область обращения с отходами превратилась из сектора, ориентированного на первичную обработку и утилизацию, в отрасль оптимальной валоризации потоков отходов в широкий спектр продуктов, используя технологии биоочистки [12].

Значимость направления обуславливается необходимостью управления потоками отходов с целью разумного использования, производству энергии и сохранению первичных ресурсов.

5. «Направление 5» определяется токенами: «municipal», «government», «urban». Данная совокупность токенов указывает на роль общественных и государственных организаций в развитии использования биоэнергетики и переработки ТКО. Поскольку важнейшим критерием эффективного применения биотехнологического потенциала в развитии энергетики является поддержка государства, заключающаяся в наличии нормативно-правового регулирования потоков биомассы и финансового обеспечения необходимых проектов биоэнергетики, объясняет актуальность данного направления [13]. *Значимость* данного направления заключается в целесообразности проведения прямого или косвенного метода государственного регулирования обращения с отходами, идущее на производство сырья, предназначенного для производства инновационной продукции. А также в поддержке создания общественных организаций [14], деятельность которых направлена на решение проблем обращения с отходами и основана на привлечении внимания к проблемам общества и властей.

6. «Направление 6» определяется токенами: «country», «area», «sector», «land». Данная совокупность токенов представляет влияние климатических условий, месторасположения объектов биоэнергетики на возможности использования технологий переработки ТКО.

Актуальность данного направления заключается в наличии климатических характеристик, определяющих производство биотоплива путем переработки отходов, в том числе ТКО. Наиболее чувствительными к климатическим условиям и их изменениям является лесное и сельское хозяйство, и именно эти отрасли производят наибольшее количество сырья для биотоплива [15]. *Значимость* данного направления заключается в необходимости разработок моделей оценки, или повышения, энергетической эффективности биоэнергетического оборудования в зависимости от климатических факторов, а также в исследовании свойств сырья для получения биотоплива.

Материалы и методы (Materials and methods)

В исследовании применяется проектирование концепции. Специфика концепции управления, как предмета исследования, определяет метод интеграции исследования. Интеграция может быть достигнута путем применения методов дивергенции, трансформации и конвергенции последовательно в три этапа, что и применено в рамках статьи (рис. 4).



Рис. 4. Методы проектирования концепции

Fig. 4. Design methods of the concept

*Источник: составлено автором на основании данных [1].

Source: compiled by the author on the basis of data [1]

Дивергенция наиболее эффективно используется, когда предмет исследования не определен, в нашем случае абсолютно ясна причина исследования. Существуют три

способа достижения изменений подхода к использованию ресурсов: полностью замкнуть производственный цикл (переработка отходов производства); максимально сузить цикл (улучшение дизайна продукции); замедлить его (ремонт, аренда, совместное использование). В рамках статьи выбран первый способ, так как развитие замкнутого ресурсного цикла позволяет максимально повлиять на рост доли утилизации отходов (по РФ в среднем 13% за 2021 г.), учитывая, что в цикл переработки отходов также входят предприятия и полигоны по утилизации, не базирующиеся на энергетической переработке отходов. Кроме того, развитие циркулярной экономики накладывается на перспективы использования биоэнергетических установок, описанные ранее в научных работах [16,17]. Хотя биоэнергетика не может полностью заменить основные технологии генерации электроэнергии, так как данный сектор имеет еще потенциал НИОКР, но уже есть понимание, что ресурсный потенциал биоэнергетики велик и возобновляем. Следует подчеркнуть, что важнейшим критерием перехода к циркулярной экономике является экологическая устойчивость производственного цикла, которая может быть достигнута за счет использования биогазовых технологий, относящиеся к категории возобновляемых источников энергии. Следовательно, логично замкнутый ресурсный цикл с применением биоэнергетического оборудования выступает в качестве *объекта исследования*.

Следующим рассматриваемым методом исследования является метод трансформации, который заключается в отображении проблемы исследования в виде структуризации цели и задач исследования. Поскольку в рамках статьи выбран первый способ достижения экономики замкнутого цикла, необходимо выявить средства, позволяющие сформировать альтернативную концепцию традиционной модели экономики. Для этого ставим задачу в выявлении потенциальных участников формирования замкнутого ресурсного цикла, чья деятельность может способствовать его созданию. Поскольку формирование отходов происходит от каких-либо предприятий или жизнедеятельности населения, то основой системы выбран источник формирования отходов, так как цель концепции – обеспечение баланса сформированных и переработанных отходов путем биоэнергетической переработки. Отсюда возникает вопрос: какие ресурсы необходимы для создания биогазового комплекса? Безусловно для создания проектов потребуются в качестве разработчиков – проектные организации, в качестве источника основных фондов – производители биоэнергетического оборудования, с точки зрения финансирования данных разработок – муниципальные власти (как наиболее заинтересованные в формировании ЗРЦ на уровне муниципальной территории) и негосударственные инвесторы (как бизнес-партнеры). При формировании концепции учтено, что уже появляются на отечественном рынке эксплуатируемые биоэнергетические установки с определенными потребностями в необходимом сырье. То есть участниками ЗРЦ являются потребители отходов, которые самостоятельно реализовали бизнес-модель с понятными цифровыми параметрами входа и выхода.

Далее рассмотрим метод, называемый конвергенцией. Определение участников формирования ЗРЦ задает направление на выявление информационных связей между ними, позволяющие обеспечить ЗРЦ. Для этого проработаны всевозможные ситуации сотрудничества, направленные на создание ЗРЦ: выделены участники и обязательный процесс информационных потоков участников системы с центром системы – источником формирования отходов. То есть предложен информационный механизм формирования спроса и предложения ресурсов участников. Теперь ставится задача в поиске информационной среды, которая объединит в одном месте всех участников процесса, а также позволит каждому принимать решение о возможностях собственного развития и влияние на формирования ЗРЦ. Вследствие чего *предметом исследования* является концепция информационной системы реализации замкнутого ресурсного цикла (ЗРЦ).

Результаты (Results)

Поскольку ТОО не обеспечивают развитие и внедрение ЗРЦ, предлагается создание информационной системы, которая позволит участникам ресурсного цикла определить баланс спроса и предложения и выявить потенциал участия.

Участники и процессы ресурсного цикла рассматриваются с точки зрения реализации замкнутого ресурсного цикла по критерию максимизации энергетической переработки формируемых на источнике отходов.

Концепция инновационной информационной системы состоит из:

1. Цели – обеспечение баланса между образующимися и перерабатываемыми отходами путем биоэнергетической переработки.

2. Участников: источник формирования отходов; потребители отходов; проектные организации; производители биоэнергетического оборудования; муниципальные власти; негосударственные инвесторы.

3. Роли участников системы:

Источник формирования отходов – формирует данные по объемам и классам отходов; обеспечивает баланс формирующих и переработанных отходов; потребители отходов.

Потребитель отходов – размещает информацию по формируемым отходам; осуществляет поиск источников для реализации существующих у него ресурсных циклов (технологий переработки).

Проектная организация – размещает информацию о выполненных проектах и предложениях по типовым проектам; осуществляет поиск источников для формирования предложений по созданию ЗРЦ на основании ТЗ; осуществляет подбор оборудования и поиск производителей; обеспечивает полную инициацию проекта, включающую в себя выбор технологии переработки отходов на основе классификатора «вид отходов – технология» и подбор оборудования.

Производитель биоэнергетического оборудования – размещает информацию о типовом оборудовании, производимом на своих мощностях; осуществляет поиск рынка сбыта, по данным проектных организаций и источников формирования отходов.

Муниципальная власть – осуществляет поиск несбалансированных источников формирования отходов и размещает информацию о возможностях финансирования проектов ЗРЦ; возможный источник финансирования проектов путем создания или выполнения Государственных программ поддержки или системы субсидирования.

Негосударственный инвестор – осуществляет поиск несбалансированных источников формирования отходов и размещает информацию о возможностях финансирования проектов ЗРЦ; обеспечивает часть финансирования проектов, удовлетворяющих показателям эффективности.

4. Концептуальной схемы информационной системы с указанием участников процесса и вариантами процессов (рис. 5).

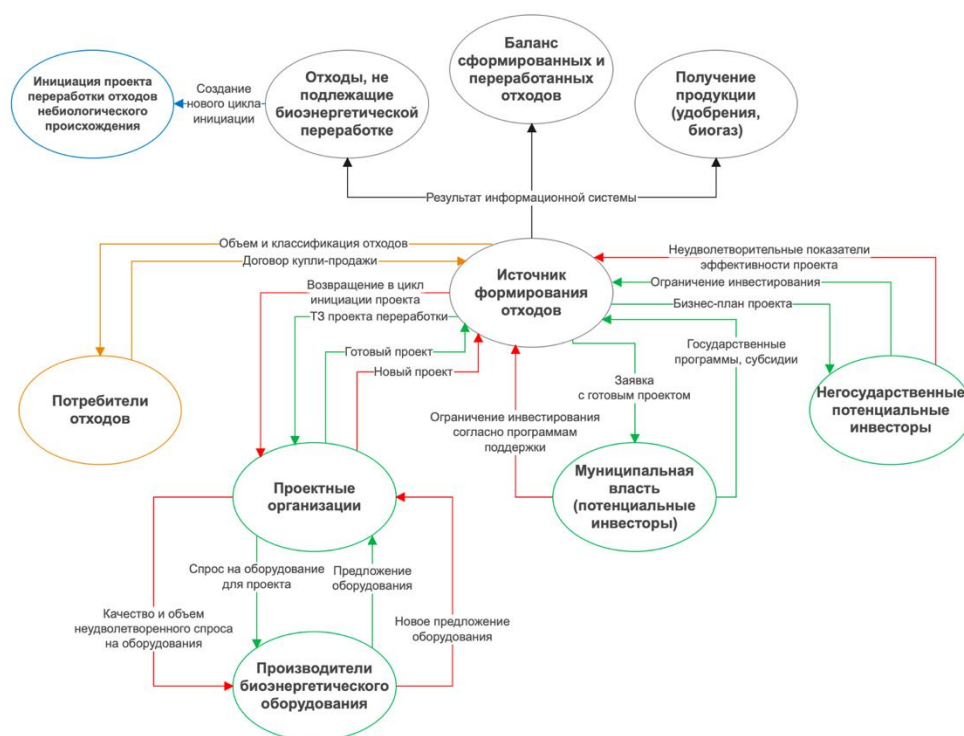


Рис. 5. Схема информационных потоков для обеспечения замкнутого ресурсного цикла

Fig. 5. Schema of information flows for a closed resource cycle

*Источник: составлено автором на основании данных[1].

Source: compiled by the author on the basis of data [1]

5. Информационных взаимосвязанных процессов между участниками для формирования ЗРЦ с использованием биоэнергетической переработкой (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Основные информационные процессы для формирования ЗРЦ с использованием биоэнергетического преобразования отходов
Main information processes for the formation of a ERP using bioenergy waste conversion

<i>Процесс</i>	<i>Информация на входе</i>	<i>Информация на выходе</i>
Формирование баланса сформированных и переработанных отходов источника формирования отходов	Договор купли-продажи отходов с указанием необходимых отходов; Готовый проект переработки; Государственные, региональные и муниципальные программы финансирования; Финансовые ограничения инвесторов	Объем и классификация отходов; ТЗ проекта переработки; Заявка на бюджетное финансирование с готовым проектом; Бизнес-план проекта
Формирование спроса на оборудование, обеспечивающие баланс сформированных и переработанных отходов	Предложение по номенклатуре и количеству оборудования	Спрос на оборудование от проектных организаций и потребителей отходов

**Источник: составлено автором на основании данных [1].*

Source: compiled by the author on the basis of data [1]

6. Показателей эффективности участников системы:

Источник формирования отходов – доля переработки отходов; снижение платы за утилизацию отходов; создание ЗРЦ предприятия.

Потребитель отходов – получение прибыли; увеличение мощностей предприятия.

Проектная организация – увеличение валовой выручки; увеличение прибыльности организации; увеличение имиджевой составляющей стоимости компании (gudvil).

Производитель биоэнергетического оборудования – расширение рынка заказчиков; экономическая целесообразность развития собственных технологий.

Муниципальная власть – реализация Федеральных проектов Государственных программ; создание дополнительных рабочих мест; реализация ЗРЦ для улучшения показателей по доле переработки отходов в регионе.

Негосударственный инвестор – получение прибыли; увеличение имиджевой составляющей стоимости компании-инвестора (gudvil).

Целесообразность разработки и применения информационной системы напрямую зависит от заинтересованности участников системы, что обуславливается определением эффективности применения информационной системы каждым участником.

7. Показателя эффективности информационной системы – баланса сформированных и переработанных отходов источника формирования отходов.

Обсуждение (Discussion)

При разработке концепции инновационной информационной системы для реализации ЗРЦ были рассмотрены недостатки существующих ТСОО. На данный момент не указываются на законодательном уровне целевые показатели, определяющие эффективность работы территориальных схем и соответственно нет ответственного органа за их достижение [18]. Одним из главных недостатков ТСОО является отсутствие системы управления потоками отходов в регионах с использованием современных информационных технологий и финансовых моделей этих систем. Кроме того, представленные характеристики и описания не дают полной картины потенциала использования отходов для создания ЗРЦ путем выработки энергии или же переработки с получением иной вторичной продукции. Например, в большинстве ТСОО дается характеристика и классификация отходов отдельных населенных пунктов и предприятий, данные отчетности по доли переработанных отходов, данные по наличию отдельных предприятий по переработке отходов, но не ясно как все эти объекты между собой связаны. То есть реальные потоки отходов-ресурсов могут быть межрегиональными и не ясно какая потребность у конкретного региона в каких технологиях переработки. Не понятно какая продукция переработки, в том числе энергия, наиболее востребована в конкретных населенных пунктах или регионах. То есть логистика и объемы формируются стихийно, а производитель оборудования не может оценить перспективы спроса на технологии.

В настоящее время все больше регионов занимаются разработкой программ модернизации жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), направленных на перевод

котельных на биомассу и биотопливо. Накопленный положительный опыт российских и зарубежных компаний в данном направлении позволяет масштабировать внедряемые технологии. Поскольку логистические издержки могут повлиять на капитальные затраты, цену оборудования и, следовательно, на экономический эффект всей биоэнергетической установки, целесообразно рассмотреть присутствие производителей территориально.

По оценкам экспертов, рынок котельного оборудования имеет следующее распределение: 40 % котельного оборудования предлагается российскими производителями; 25 % приходится на новое зарубежное оборудование; 20 % предложений поддержанного зарубежного оборудования; 10 % - модернизированное отечественное оборудование; 5 % - производители из Республики Беларусь [5].

Относительно небольшое количество производителей котельного оборудования специализируется на производстве котлов, работающих на биотопливе, и большинство из них расположены в Центральной и Северо-Западной частях России, тем не менее тенденции развития рынка топлива приводят их продукцию привлекательной для инвестиций. Наиболее активны в данной отрасли производители оборудования: ООО «Союз», ЗАО «ЗИОСАБ», ПО «Теплоресурс», ООО «ковровские котлы», ООО «Экодрев-Тверь», группа компаний «Адаптика». Оборудование китайских производителей активно поставляется на дальнем Востоке, однако сложно оценить масштабы их выхода на российский рынок. Среди зарубежных производителей в более высоких ценовых диапазонах наиболее востребована продукция австрийской компании POLYTECHNIK, финской Wartsila, немецких «Виссманн» и HSK, польской Namech, шведских KMB, Saxlund и Notab. К отечественным производителям котлов относятся Бийский котельный завод (БиКЗ), ООО «Ковровские котлы» (г. Ковров, Владимирская область), ООО «Экодрев-Тверь» (г. Тверь), ООО «БАЛТКОТЛОМАШ» (г. Санкт-Петербург), «КАМИ-Станкоагрегат» (г. Москва), ООО «Союз» (пос. Глебово, Владимирская область), «Комконт» и др.

Реализацию информационной системы предлагается осуществлять на цифровой платформе через единую систему идентификации и аутентификации (ЕСИА). Для регистрации участникам информационной системы необходимо указывать информацию в системе для возможности понимания своей роли другими участниками (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Участники информационной системы для обеспечения ЗРЦ
Participants in the ERP information system

Участник системы	Информация обязательная для размещения в информационной системе
Источник формирования отходов	Описание предприятия; Объем и классификация образующихся отходов; Ссылка на веб-сайт
Потребитель отходов	Описание предприятия; Требуемые объем и вид (класс) отходов; Ссылка на веб-сайт
Проектные организации	Описание организации; Реализованные проекты; Ссылка на веб-сайт
Производители биоэнергетического оборудования	Описание предприятия; Каталог производимого оборудования с указанием технических характеристик; Ссылка на веб-сайт
Муниципальные власти	Государственные программы поддержки проектов, или субсидии; Ссылка на веб-сайт
Негосударственные потенциальные инвесторы	Описание организации/физического лица; Ограничения инвестирования (возможный объем инвестиций, сфера деятельности проекта); Ссылка на веб-сайт

*Источник: составлено автором на основании данных [1].

Source: compiled by the author on the basis of data [1]

Целевая функция системы: максимизация доли переработанных отходов. На схеме (рис. 5) представлены два направления формирования ЗРЦ, которые могут существовать параллельно: желтым цветом – продажа отходов потребителю, который сам определяет технологию переработки за счет имеющихся мощностей; зеленым цветом – создание и реализация проекта по переработке для источника или группы источников формирования отходов. При этом в случае несоответствия проекта показателям эффективности на этапе определения источника финансирования, или же ограничение инвестирования согласно программам поддержки (выделено красным цветом), система возвращает проект на этап инициации. Возврат проекта на доработку проектной организации может включать в себя

следующие предложения: необходимость поиска новой технологии переработки, удовлетворяющей экономической эффективности, или же нового оборудования; рассмотрение других источников финансирования. Доработанный новый проект снова предлагается одному или нескольким источникам инвестирования: муниципальной власти и негосударственному потенциальному инвестору. Кроме того, источники инвестирования могут предложить поддержать заинтересовавший их проект источнику формирования отходов самостоятельно, указав государственные программы поддержки, субсидии или ограничения инвестирования. Тогда источник формирования отходов сам принимает решение об источнике инвестирования. Таким образом ЗРЦ для каждого источника отходов-ресурсов формируется с учетом информации в системе. Региональные власти, заинтересованные в максимизации переработки отходов, могут управлять ею, иницилируя недостающие элементы в балансе. Например, стимулирование предприятий-производителей конкретного оборудования, проектных организаций, исследований в области технологий переработки тех видов отходов, по которым еще не сформирован ЗРЦ.

В рамках реализации предлагаемой информационной системы заложено контролирование доли переработанных отходов каждого источника формирования отходов с целью предоставления информации об изменении ситуации в реальном времени для муниципальных властей. Данная мера позволит информационной системе стать своего рода сигналом со стороны участников системы органам муниципалитета для инициации соответствующих мер.

Вследствие чего на уровне муниципалитета могут быть реализованы акции по привлечению внимания, направленные на необходимость развития существующих технологий биоэнергетической переработки и биоэнергетического и котельного оборудования, а также привлечение инвесторов, для создания межрегионального обмена.

На Федеральном уровне данная система должна быть разработана для каждого ФО для обеспечения взаимосвязи между ними, что позволит развить ЗРЦ с использованием биоэнергетической переработки и повысить оперативность и обоснованность принятия управленческих решений на уровне регионов

Заключение (Conclusion)

В рамках разработки концепции ЗРЦ с использованием инновационной информационной системы выявлены участники системы: источник формирования отходов; потребители отходов; проектные организации; производители биоэнергетического оборудования; муниципальные власти; негосударственные инвесторы. Определены роли участников и связей между ними, а также особенностей информационного потока каждого участника.

Информационную систему предлагается реализовать на цифровой платформе с помощью единой системы идентификации и аутентификации (ЕСИА). Предлагаемая информационная система позволит собрать участников процесса для создания ЗРЦ, а также информацию для баланса сформированных и переработанных отходов потребителя, а также спроса на оборудование, обеспечивающего баланс сформированных и переработанных отходов.

Ожидаемые результаты: спрос на проекты по биоэнергетической переработке отходов; спрос на оборудование и развитие новых технологий; создание дополнительных рабочих мест для новых предприятий и улучшение показателей эффективности для муниципальных властей; снижение затрат на утилизацию отходов и повышение экологичности функционирования для источников формирования отходов.

До тех пор, пока источник формирования отходов не удовлетворяет спрос на реализацию формирующихся отходов, продолжает формироваться спрос новых мощностей переработки и новых проектов, что определяет эффективность предлагаемой системы – баланс сформированных и переработанных отходов.

Концепция направлена на достижение целей устойчивого развития региональной экономики, целей энергосбережения, минимизация потребностей добычи углеводородов, максимизации доли вторичных энергоресурсов, улучшение экологических показателей, максимизация создания новых или загрузка существующих производственных мощностей по производству оборудования для биоэнергетических установок.

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Доступно по: <https://news.solidwaste.ru/wp->

content/uploads/2022/09/Gosdoklada-OOS-2021-god-othody.pdf?ysclid=lfjvux9w2g554380960.

Ссылка активна на 28 марта 2023.

2. Андреев Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю., Трофимова И.Л. Энергия из биомассы: проблемы и ресурсы // Журнал С.О.К. 2022. №10. с. 52–56.

3. Кулагин В.А., Дунаева Н.В., Яковлева Д.Д. Новые технологии использования биогаза как способ решения экологических проблем // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91. №. 1. С. 87–102.

4. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». Национальный проект «Экология // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Доступно по: <https://2020.ecology-gosdoklad.ru/api/media/file/033e76349276306646f15c28434f9dac5687a1eb.pdf>. Ссылка активна на 28 марта 2023.

5. Отчет о реализации работы Технологической Платформы «Биоэнергетика» за 2021 год // ТП «Биоэнергетика». Доступно по: https://tp-bioenergy.ru/upload/file/spi_bioenergy_2021.pdf. Ссылка активна на 01 апреля 2023.

6. Weiguo L., Kui W., Hongke H., et al. Predicting potential climate change impacts of bioenergy from perennial grasses in 2050 // Resources, Conservation and Recycling. 2023. Vol. 190.

7. Nanda S., Berruti F. A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste // Journal of hazardous materials. 2021. Vol. 403.

8. Karuseva N., Livshits S., Kotsubinski A., et al. The impact of innovative technologies on consumers in the power supply market // E3S web of conferences. 2019. Vol. 140.

9. Saravanan A., Ramesh B., Srinivasan S., et al. A review on biological methodologies in municipal solid waste management and landfilling: Resource and energy recovery // Chemosphere. 2022. Vol. 309. Pt. 1.

10. Шилкина С.В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». 2020. №1. Доступно по: <https://resources.today/PDF/05ECOR120.pdf?ysclid=lg9b2mz3j5986046986>. Ссылка активна на 5 апреля 2023.

11. Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., et al. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050: World Bank Publications; 2018.

12. Malmgren A., Riley G., Dermot J. Biomass power generation // Ref Mod Earth Sys Env Sci. 2012. Vol. 5. pp. 27–53. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00505-9.

13. Barik D. Comprehensive remark on waste to energy and waste disposal problems // Energy from Toxic organic Waste for heat and Power generation. 2018. pp. 205–209. doi: 10.1016/B978-0-08-102528-4.400013-4.

14. Люди и мусор: кто кого? // Центр экологической информации и культуры. Доступно по: <https://herzenlib.ru/ludiimutor/sites/?ysclid=lbkp4mfegs383886547>. Ссылка активна на 02 апреля 2023.

15. Errera M., Dias T. da, Maya D., et al. Global bioenergy potentials projections for 2050 // Biomass and Bioenergy. 2023. Vol. 170.

16. Аристова А.А., Тянь Ц. Сравнительная характеристика перспектив развития биоэнергетики России и Китая // Развивая энергетическую повестку будущего: Сборник докладов Международной научно-практической конференции для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК; 10–11 декабря 2021., Санкт-Петербург. Издательство: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2021. С. 293–298.

17. Romaniuk N., Novikova O. Feasibility Study of the Use of Plasma Gasification for Residential Complexes // International Scientific and Practical Conference" Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future"(EAF 2021). 2022. pp. 217–223.

18. Аристова А. А. Выявление потенциала развития замкнутого ресурсного цикла на основе исследования территориальных схем обращения с отходами // Современные тенденции в развитии экономики энергетики: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции; 1 декабря 2022 г., Минск. Минск: БНТУ, 2023. С. 89–91.

19. Борисова Д. Н., Пирогов Е. Н. Анализ конструкций и опыт эксплуатации биогазовых установок // Вопросы устойчивого развития общества. 2022. №4. С. 1249–1253.

20. Negri F., Fedeli M., Barbieri M., et al. A versatile modular plant for converting biogas into advanced biofuels // Invention Disclosure. 2022. Vol. 2.

Авторы публикации

Аристова Анастасия Алексеевна – магистрант Высшей инженерно-экономической школы, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3003-2308>, anastasiya-aristova.aristova@yandex.ru

Новикова Ольга Валентиновна – к.э.н., доцент, доцент Высшей школы Атомной и тепловой энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7025-3634>, novikova-olga1970@yandex.ru

References

1. State Report "On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2021" // Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. Available at: <https://news.solidwaste.ru/wp-content/uploads/2022/09/Gosdoklada-OOS-2021-god-othody.pdf?ysclid=lfjvux9w2g554380960>. Accessed: 28 Mar 2023.
2. Andreenko TI., Kiseleva SV., Rafikova YY, Trofimova IL. Energy from biomass: problems and resources. *Journal S.O.K.* 2022; 10: 52–56.
3. Kulagin VA., Dunaeva NV., Yakovleva DD. New biogas use technologies as a method for solving environmental problems. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2021. 91(1):87-102. doi: 10.31857/S0869587321010060.
4. State Report "On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2020". National project "Ecology. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. Available at: <https://2020.ecology-gosdoklad.ru/api/media/file/033e76349276306646f15c28434f9dac5687a1eb.pdf>. Accessed: 28 Mar 2023.
5. Report on the implementation of the Technological Platform "Bioenergetics" for 2021. TP «Bioenergetics». Available at: https://tp-bioenergy.ru/upload/file/spi_bioenergy_2021.pdf. Accessed: 01 Apr 2023.
6. Weiguo L, Kui W, Hongke H, et al. Predicting potential climate change impacts of bioenergy from perennial grasses in 2050. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023; 190. doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106818.
7. Nanda S, Berruti F. A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste. *Journal of hazardous materials*. 2021;403. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123970
8. Karuseva N, Livshits S, Kotsubinski A, et al. The impact of innovative technologies on consumers in the power supply market. *E3S web of conferences*. 2019;140. doi: 10.1051/e3sconf/201914004009.
9. Saravanan A, Ramesh B, Srinivasan S, et al. A review on biological methodologies in municipal solid waste management and landfilling: Resource and energy recovery. *Chemosphere*. 2022;309(Pt 1). doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136630
10. Shilkina SV. Global trends in waste management and analysis of the situation in Russia. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, [online]. 2020. 1(7). Available at: <https://resources.today/PDF/05ECOR120.pdf?ysclid=lg9b2mz3j5986046986>. Accessed: 05 Apr 2023. (In Russ). doi: 10.15862/05ECOR120.
11. Kaza S, Yao L, Bhada-Tata P, et al. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*: World Bank Publications; 2018.
12. Malmgren A, Riley G, Dermot J. Biomass power generation. *Ref Mod Earth Sys Env Sci*. 2012; 5:27–53. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00505-9.
13. Barik D. Comprehensive remark on waste to energy and waste disposal problems. *Energy from Toxic organic Waste for heat and Power generation*. 2018:205–209. doi: 10.1016/B978-0-08-102528-4.400013-4.
14. People and garbage: who's who? *Center for Environmental Information and Culture*. Available at: <https://herzenlib.ru/ludiimutor/sites/?ysclid=lbkp4mfegs383886547>. Accessed: 02 Apr 2023.
15. Errera M, Dias T. da, Maya D, et al. Global bioenergy potentials projections for 2050. *Biomass and Bioenergy*. 2023; 170. doi: 10.1016/j.biombioe.2023.106721
16. Aristova AA., Tian Ts. Comparative characteristics of the prospects for the development of bioenergy in Russia and China. *Developing the energy agenda of the future: International Scientific and Practical Conference for representatives of the community of young*

fuel and energy engineers; 10-11 Dec 2021; St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), 2021. pp. 293-298.

17. Romaniuk N, Novikova O. Feasibility Study of the Use of Plasma Gasification for Residential Complexes. *International Scientific and Practical Conference "Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future" (EAF 2021)*. 2022:217–223. doi: 10.2991/aer.k.220308.035

18. Aristova AA. Identification of the development potential of a closed resource cycle based on research territorial waste management schemes. *Modern trends in the development of the energy economy: III International Scientific and Practical Conference; 1 Dec 2022; Minsk, Belarus*. Minsk: BNTU, 2023. pp. 89-91.

19. Borisova DN., Pirogov EN. Design analysis and operational experience of biogas plants. *Issues of sustainable development of society*. 2022; 4:1249-1253.

20. Negri F, Fedeli M, Barbieri M, et al. A versatile modular plant for converting biogas into advanced biofuels. *Invention Disclosure*. 2022;2. doi: 10.1016/j.inv.2022.100008

Authors of the publication

Anastasia A. Aristova – graduate student of the Higher School of Engineering and Economics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. ORCID: 0009-0001-3003-2308, anastasiya-aristova.aristova@yandex.ru.

Olga V. Novikova – PhD in Economic sciences, Associate Professor at the Department of Higher School of Nuclear and Thermal Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. ORCID: 0000-0001-7025-3634, novikova-olga1970@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.5.10. Экологическая безопасность.

Получено

20.07.2023г.

Отредактировано

07.08.2023г.

Принято

09.08.2023г.

Сдано в набор 15.08.2023г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 500 экз.

Подписано к печати 23.10.2023 г.
Усл. печ. л. 18,3
Заказ № 5287
Дата выхода в свет 31.10.2023 г.

Формат 60*90/8
Уч.изд. л. 11,62.
Цена свободная